

PAULO CESAR LOPES KRELLING

**CONCEPÇÃO DE
UM INCLINÔMETRO FOTO-MECÂNICO PARA
CONTROLE GEODÉSICO DE ESTRUTURAS**

**Tese apresentada ao Curso de Pós-
Graduação em Ciências Geodésicas da
Universidade Federal do Paraná como
requisito parcial à obtenção do título de
Doutor em Ciências Geodésicas.**

Orientador: Prof. Dr. Carlos A. Nadal

**CURITIBA
2006**

PAULO CESAR LOPES KRELLING

**CONCEPÇÃO DE
UM INCLINÔMETRO FOTO-MECÂNICO PARA
CONTROLE GEODÉSICO DE ESTRUTURAS**

**Tese apresentada ao Curso de Pós-
Graduação em Ciências Geodésicas da
Universidade Federal do Paraná como
requisito parcial à obtenção do título de
Doutor em Ciências Geodésicas.**

Orientador: Prof. Dr. Carlos A. Nadal

**CURITIBA
2006**

TERMO DE APROVAÇÃO

AGRADECIMENTOS

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização e divulgação do presente trabalho.

Especialmente àqueles que acreditaram (como o Prof. Dr. Luiz Danilo Damasceno, Prof. Dr. Luiz Veiga e Prof. Dr. Carlos Aurélio Nadal) na possibilidade de criação e desenvolvimento, mesmo em condições desfavoráveis, do equipamento que é o fruto deste trabalho.

Aqueles que participaram em discussões informais sobre o desenvolvimento do protótipo como o Prof. Dr. Wilson Alcântara Soares.

Aqueles que participaram, materialmente, contribuindo com horas de seu trabalho no desenvolvimento de idéias como o Dr. Álvaro Machado o M.Sc. Mosar Botelho.

Ao Laboratório de Instrumentação Geodésica do Departamento de Geomática do Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pelo apoio com ambiente de testes e equipamentos para qualificação do protótipo.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	xi
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xv
1 INTRODUÇÃO	01
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	03
2.1 MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS.....	04
2.2 TÉCNICAS GEODÉSICAS APLICADAS AO MONITORAMENTO.....	07
2.2.1. Nivelamento Geométrico de Precisão.....	07
2.2.2 Triangulação e Trilateração.....	08
2.2.3 Poligonação.....	10
2.2.4 Posicionamento por Satélite.....	11
2.2.5 Fotogrametria.....	12
2.2.6 Rede de Monitoramento.....	13
2.2.6.1 Deslocamento e Deformação.....	17
2.2.6.2 Métodos de determinação de coordenadas tridimensionais.....	18
2.2.6.2.1 Intersecção espacial trigonométrico.....	18
2.2.6.2.2 Método da intersecção espacial analítica.....	19
2.2.6.2.3 Método Intersecção espacial analítica com superdeterminação de medidas.....	19
2.2.6.2.4 Método polar.....	20
2.2.6.2.5 Metodologia proposta por MOREIRA.....	20
2.2.6.2.5.1 Ponto de orientação.....	20
2.2.6.2.5.2 Cálculo de coordenadas.....	21
2.3 TÉCNICAS NÃO GEODÉSICAS.....	26
2.3.1 LVDT – Linear Variable Differential Transformer.....	26
2.3.2 Extensômetros Resistivos.....	28
2.3.2.1 Extensômetros.....	28
2.3.2.2 O extensômetros de fio.....	31
2.3.2.3 O extensômetros de lâmina.....	32
2.3.2.4. O extensômetro de semiconductor.....	32
2.3.2.5 O efeito piezelétrico.....	33
2.3.2.6 Piezoresistores.....	35
2.3.2.7 Sensor resistivo de força.....	35
2.3.2.8 Extensor de corda vibrante.....	36
2.3.2.9 Transdutor de corrente de Focault.....	37
2.3.3 Sensores Óticos.....	39
2.3.3.1 Interferômetros	39
2.3.3.2 Fibra ótica.....	43

2.3.3.3	Vídeo extensômetros.....	44
2.4	EXTENSÔMETROS DE FIO OU FITA.....	44
2.5	MEDIDOR DE DESLOCAMENTOS (STRAINMETER)	45
2.6	ACELERÔMETROS.....	46
2.6.1	Acelerômetros Piezo-Resistivos.....	46
2.6.2	Sensores Capacitivos.....	47
2.6.3	MEMS.....	47
2.6.4	Acelerômetros MEMS.....	49
2.7	INCLINÔMETROS.....	55
3	O INCLINÔMETRO FOTO-MECÂNICO.....	60
3.1	RELEVÂNCIA DO PROJETO.....	60
3.2	MÉTODOS A SEREM EMPREGADOS.....	62
3.2.1	PARA CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO.....	62
3.2.2	PARA AVALIAÇÃO DO EQUIPAMENTO.....	63
4	ANÁLISES PRELIMINARES PARA PROJETO DO PROTÓTIPO.....	64
4.1	RELATIVAS A ALAVANCA PRINCIPAL.....	64
4.2	RELATIVAS A ALAVANCA SECUNDÁRIA.....	67
4.3	RELATIVAS ÀS FORÇAS ENTRE ALAVANCAS.....	68
5	CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO.....	76
5.1	DETERMINAÇÃO DO LASTRO DA ALAVANCA PRINCIPAL.....	76
5.2	DIMENSÕES DO PROTÓTIPO.....	78
5.3	ANÁLISE DE EFEITOS SECUNDÁRIOS.....	79
5.3.1	Efeitos da Temperatura.....	79
5.3.1.1	Sobre a estrutura do equipamento.....	80
5.3.1.2	Sobre a alavanca principal.....	84
5.3.1.3	Sobre a alavanca secundária.....	86
5.3.1.4	Sobre os fixadores à estrutura.....	89
5.3.1.5	Efeito conjunto da temperatura.....	90
5.3.2	Efeitos Geométricos.....	91
5.3.2.1	Inclinação da superfície refletora.....	91
5.3.2.2	Curvatura da superfície refletora.....	92
5.4	ARQUITETURA DO PROTÓTIPO.....	93
5.5	DETERMINAÇÃO DA RESOLUÇÃO DO SENSOR ÓTICO.....	96
6.	CALIBRAÇÃO DO PROTÓTIPO.....	102
6.1	OBJETIVOS DA CALIBRAÇÃO.....	102
6.2	PROCEDIMENTOS TEÓRICOS PARA CALIBRAÇÃO.....	102
6.2.1	Ângulo de Rotação e FAE.....	102
6.2.2	Constante K.....	103
6.3	BASE PARA CALIBRAÇÃO.....	105
6.4	DETERMINAÇÃO DA MATRIZ DE ROTAÇÃO E FATOR DE AMPLIAÇÃO ESPECÍFICO (FAE).....	106
6.5	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PARA CALIBRAÇÃO.....	109
7	EXPERIMENTOS REALIZADOS.....	114
7.1	TESTE DO SENSOR ÓTICO.....	114
7.1.1	Leituras Aleatórias.....	115

7.1.2	Teste de Regiões Contíguas.....	121
7.1.3	Teste de Retorno.....	124
7.2	CALIBRAÇÃO DO PROTÓTIPO.....	126
7.2.1	Determinação dos Parâmetros de Calibração.....	126
7.2.2	Aplicação a Dados Observados.....	128
7.2.3	Parâmetros Determinados.....	130
7.2.4	Parâmetros determinados usando K.....	131
8	CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E PERSPECTIVAS.....	135
8.1	CONCLUSÕES.....	135
8.1.1	– Relativas à Resolução e Precisão.....	135
8.1.2	– Relativas aos Erros de Leitura.....	135
8.1.3	– Relativas ao FAE - Fator de Ampliação Específico.....	136
8.1.4	– Relativas ao Efeito da Temperatura.....	136
8.1.5	– Relativas ao Ângulo de Rotação.....	136
8.1.6	– Relativas à constante K.....	137
8.1.7	– Relativas ao Equipamento.....	137
8.1.8	– Relativas ao Coletor de Dados.....	137
8.1.9	– Relativas ao Protótipo Testado.....	138
8.2	RECOMENDAÇÕES.....	139
8.2.1	Desenvolvimento de Softwares.....	139
8.2.2	Visualização de Resultados.....	139
8.3	PERSPECTIVAS.....	140
9	REFERÊNCIAS.....	142
9.1	OBRAS CONSULTADAS.....	148
9.2	DOCUMENTOS CONSULTADOS.....	151
10	APÊNDICE 1 - PLANTAS, DESENHOS E CROQUIS DO PROTÓTIPO.....	153
11	APÊNDICE 2 – APLICATIVO PARA COLETA DE DADOS.....	164
12	APÊNDICE 3 – SOFTWARE PARA COLETA DE DADOS.....	172
13	APÊNDICE 4 – DISPONIBILIZAÇÃO DE DADOS.....	180
14	ANEXO 1 - TERMOS TÉCNICOS UTILIZADOS EM INSTRUMENTAÇÃO GEODÉSICA.....	184
15	ANEXO 2 - INSTRUMENTAÇÃO E ANOMALIAS EM BARRAGENS.....	187

LISTA DE TABELAS

QUADRO 1	- COORDENADAS TRIDIMENSIONAIS DAS EXTREMIDADES DA MIRA.....	23
TABELA 1	- ANÁLISE DE FORÇAS DA ALAVANCA PRINCIPAL (PÊNDULO)	65
TABELA 2	- ANÁLISE DE FORÇAS DO PÊNDULO PRINCIPAL PARA PEQUENOS ÂNGULOS.....	66
TABELA 3	- ANÁLISE DO COMPRIMENTO DO BRAÇO MAIOR DA ALAVANCA SECUNDÁRIA.....	68
TABELA 4	- ANÁLISE DE FORÇAS ATUANTES ENTRE ALAVANCAS.....	70
TABELA 5	- FORÇAS GERADAS PELAS ALAVANCAS PRINCIPAL E SECUNDÁRIA.....	71
TABELA 6	- ANÁLISE DA MENOR VARIAÇÃO MENSURÁVEL (mm) EM FUNÇÃO DO EQUIPAMENTO E DA ALTURA DA EDIFICAÇÃO (m).....	72
QUADRO 2	- ANÁLISE DE SITUAÇÃO PARA MONTAGEM DO EQUIPAMENTO.....	74
TABELA 8	- ANÁLISE DE FORÇAS ATUANTES.....	77
TABELA 9	- COMPONENTES DO PROTÓTIPO.....	78
TABELA 10	- EFEITO DA TEMPERATURA SOBRE O SUPORTE.....	84
TABELA 11	- EFEITO DA TEMPERATURA SOBRE A ALAVANCA PRINCIPAL.....	86
TABELA 12	- EFEITOS SOBRE O BRAÇO MENOR DA ALAVANCA SECUNDÁRIA.....	87
TABELA 13	- EFEITO SOBRE O BRAÇO MAIOR DA ALAVANCA SECUNDÁRIA.....	88
TABELA 14	- EFEITO SOBRE OS FIXADORES.....	90
TABELA 15	- EFEITO CONJUNTO DA TEMPERATURA (mm) PARA $\Delta t = 25^\circ \text{C}$	90
TABELA 16	- DIFERENÇAS DE LEITURAS.....	99
TABELA 17	- DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO DO INCLINÔMETRO FOTO MECÂNICO.....	111
TABELA 18	- APLICAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO AOS DADOS OBSERVADOS.....	113
TABELA 19	- RESOLUÇÃO DO SENSOR ÓTICO – DESLOCAMENTOS ALEATÓRIOS	115
TABELA 20	- RESOLUÇÃO DO SENSOR ÓTICO - SUPERFÍCIE IRREGULAR	117
TABELA 21	- RESOLUÇÃO DO SENSOR ÓTICO.....	118
TABELA 22	- RESOLUÇÃO DO SENSOR ÓTICO- SUPERFÍCIE IRREGULAR.....	119

TABELA 23	- FAE - FATOR DE AMPLIAÇÃO ESPECÍFICO	120
TABELA 24	- TESTE DE LEITURAS CONTÍGUAS.....	122
TABELA 25	- TESTE DE RETORNO AO PONTO INICIAL	125
TABELA 26	- CALIBRAÇÃO DO INCLINÔMETRO FOTO MECÂNICO.....	127
TABELA 27	- REDUÇÃO DE OBSERVAÇÕES.....	129
TABELA 28	- CALIBRAÇÃO DO INCLINÔMETRO – USANDO K.....	133
TABELA 29	- APLICAÇÃO A DADOS OBSERVADOS - USANDO K ..	134
TABELA 30	- EFEITOS DOS ERROS DE LEITURA SOBRE PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO PARA O EQUIPAMENTO TESTADO.....	136
QUADRO 3	- CONTEÚDO DOS CAMPOS	180

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1	- ESQUEMA GENÉRICO DO LVDT (FLW, INC. COSTA MESA, CA. 92626, USA).....	26
FIGURA 2	- DESENHO ESQUEMÁTICO DA MUDANÇA DE FASE DEVIDO À POSIÇÃO DO NÚCLEO (RDP ELECTRONICS LTD).....	27
FIGURA 3	- PONTE DE WHEATSTONE	30
FIGURA 4	- MODELOS DE EXTENSÔMETROS AXIAL, BIAxIAL E TRIAXIAL (VISHAY INTERTECHNOLOGY, INC.)...	33
FIGURA 5	- ESTRUTURA INTERNA DE UM “ELECTREC” (//CCRMA.STANFORD.EDU).....	34
FIGURA 6	- ESQUEMA DE UM SENSOR DE RESISTIVO DE FORÇA (//CCRMA.STANFORD.EDU).....	36
FIGURA 7	- ESQUEMA DE UM EXTENSOR DE CORDA VIBRANTE.....	37
FIGURA 8	- EXTENSÔMETRO DE CORDA VIBRANTE.....	37
FIGURA 9	- ESQUEMA DO TRANSDUTOR DE CORRENTE DE EDDY	38
FIGURA 10	- ESQUEMA DO INTERFERÔMETRO DE MICHELSON- MORLEY.....	40
FIGURA 11	- POLIMENTO DE ESPELHO PARA TELESCÓPIO COM 8 METROS DE DIÂMETRO (4D TECHNOLOGY CORPORATION)	41
FIGURA 12	- REPRESENTAÇÃO DA IMAGEM INTERFEROMÉTRICA DA SUPERFÍCIE DO ESPELHO APRESENTADO NA FIGURA 11 (4D TECHNOLOGY CORPORATION)	41
FIGURA 13	- IMAGEM DE UM LEVANTAMENTO INTERFEROMÉTRICO DAS IMPERFEIÇÕES DA SUPERFÍCIE DE UM CD (4D TECHNOLOGY CORPORATION)	41
FIGURA 14	- PADRÕES COMUMENTE USADOS COM FIBRAS ÓTICAS (VISTA DE TOPO).....	43
FIGURA 15	- PADRÕES COMUMENTE USADOS COM FIBRAS ÓTICAS (VISTA LATERAL).....	43
FIGURA 16	- EXTENSÔMETRO DE FITA E PAINEL COMPLEMENTAR PARA LEITURA DO EXTENSÔMETRO (SLOPE INDICATOR INC.).....	45
FIGURA 17	- EXEMPLO DE STRAINMETER.....	46
FIGURA 18	- ESQUEMA DE UM ACELERÔMETRO PIEZO RESISTIVO.....	46
FIGURA 19	- FIO DE CABELO HUMANO E UM MOTOR DE SILÍCIO(BERKELEY SENSOR & ACTUATOR CENTER)	48

FIGURA 20	- FOTO MICROSCÓPICA DE UM DISPOSITIVO MEMS (HTTP://MEMS.SANDIA.GOV/SCRIPTS/IMAGES.ASP)..	48
FIGURA 21	- LEI DE HOOKE.....	51
FIGURA 22	- SISTEMA MASSA-MOLA UTILIZADO PELO ACELERÔMETRO ADXL5 (HTTP://CCRMA.STANFORD.EDU)	52
FIGURA 23	- VISTA ESQUEMÁTICA DO SISTEMA CAPACITIVO DO ADXL50 (WWW.ANALOG.COM)	53
FIGURA 24	- FOTO DO INTERIOR DO CHIP DO ACELERÔMETRO ADXL50 (WWW.ANALOG.COM).....	53
FIGURA 25	- SISTEMA DE CAPACITORES DUPLOS (UTILIZADOS PARA MEDIR O DESLOCAMENTO DA MASSA NO ACELERÔMETRO ADXL50).....	54
FIGURA 26	- ACELERÔMETRO COMPLETO COM O SENSOR MEMS E OS COMPONENTES ELETRÔNICOS ASSOCIADOS ANTES DO ENCAPSULAMENTO	55
FIGURA 27	- INCLINÔMETRO DE DA VINCI (RECONSTITUÍDO A) PARTIR DE PROJETO ORIGINAL – FIGURA 29)	56
FIGURA 28	- PROJETO ORIGINAL DE INCLINÔMETRO DE DA VINCI.....	56
FIGURA 29	- INCLINÔMETRO DE ESFERA (RIEKER INC. FOLCROFT, PENNSYLVANIA,USA).....	57
FIGURA 30	- MODELOS DE INCLINÔMETRO E SENSORES ELETROLÍTICOS(RIEKER INC. FOLCROFT, PENNSYLVANIA,USA).....	58
FIGURA 31	- SENSOR ELETROLÍTICO MONTADO EM CIRCUITO CONDICIONADOR DE SINAL.....	58
GRÁFICO 1	- COMPONENTES TANGENCIAL E HORIZONTAL DAS FORÇAS.....	65
FIGURA 32	- LIMITE DE MOVIMENTOS DO ESTIMULADOR DO SENSOR ÓTICO.....	75
FIGURA 33	- EFEITO DA TEMPERATURA SOBRE O SUPORTE DO EQUIPAMENTO.....	81
FIGURA 34	- EFEITO DA TEMPERATURA SOBRE A ALAVANCA PRINCIPAL.....	85
FIGURA 35	- EFEITO DA TEMPERATURA SOBRE O BRAÇO MENOR DA ALAVANCA SECUNDÁRIA.....	87
FIGURA 36	- EFEITO DA TEMPERATURA SOBRE O BRAÇO MAIOR DA ALAVANCA SECUNDÁRIA.....	88
FIGURA 37	- ESQUEMA GERAL DO MODELO M23.....	94
FIGURA 38	- ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO MODELO M23	95
FIGURA 39	- FOTO DA BARRA DE PARALAXE.....	96
FIGURA 40	- SENSOR QUE FOI AFIXADO À BARRA.....	97
FIGURA 41	- INTERFERÔMETRO DO LAIG.....	98
FIGURA 42	- CARRO DO INTERFERÔMETRO.....	98
GRÁFICO 2	- LEITURAS INTERFEROMÉTRICAS.....	100

GRÁFICO 3	- LEITURAS INTERFEROMÉTRICAS APÓS FILTRAGEM.....	100
FIGURA 43	- FUNCIONAMENTO DO INCLINÔMETRO.....	103
FIGURA 44	- MODELO DE BASE PARA CALIBRAÇÃO.....	106
FIGURA 45	- MOVIMENTAÇÕES ESPERADA E OBSERVADA.....	107
FIGURA 46	- SITUAÇÕES IDEAL E REAL DO SISTEMA DE COORDENADAS DO SENSOR ÓPTICO.....	109
FIGURA 47	- CARRO DO INTERFERÔMETRO COM SENSOR ÓPTICO AFIXADO.....	114
FIGURA 48	- DIAGRAMA DA DISTRIBUIÇÃO DA ESCALA.....	120
FIGURA 49	- EFEITO DO INÍCIO DA CONTAGEM.....	123
FIGURA 50	- PROTÓTIPO DO INCLINÔMETRO FOTO-MECÂNICO.	130
FIGURA 51	- ESQUEMA GERAL DO INCLINÔMETRO	153
FIGURA 52	- ESQUEMA GERAL COM DIMENSÕES.....	154
FIGURA 53	- ALAVANCA PRINCIPAL.....	155
FIGURA 54	- PLANTA DA ESTRUTURA DO EQUIPAMENTO.....	156
FIGURA 55	- SISTEMA DE CONEXÃO ENTRE ALAVANCAS.....	157
FIGURA 56	- SUPORTES E FIXADORES.....	158
FIGURA 57	- APOIO DA ALAVANCA SECUNDÁRIA.....	159
FIGURA 58	- DETALHES DO APOIO DA ALAVANCA SECUNDÁRIA.....	160
FIGURA 59	- SUPORTE DO SENSOR ÓPTICO.....	161
FIGURA 60	- ESQUEMA GERAL DE MONTAGEM.....	162
FIGURA 61	- TELA PRINCIPAL DO COLETOR DE DADOS.....	163
FIGURA 62	- GRID DO COLETOR DE DADOS.....	165
FIGURA 63	- TELA DO COLETOR DE DADOS APÓS INÍCIO.....	166
FIGURA 64	- MAU POSICIONAMENTO RELATIVO ESTIMULADOR-SENSOR.....	167
FIGURA 65	- MÁIS LEITURAS DEVIDAS À SUPERFÍCIE IRREGULAR DO ESTIMULADOR.....	168
FIGURA 66	- CORRETO POSICIONAMENTO DO ESTIMULADOR COM SUPERFÍCIE PLANA.....	169
FIGURA 67	- ALAVANCA SECUNDÁRIA MAL ESCOLHIDA.....	170
FIGURA 68	- TELA PRINCIPAL DO “CONTI FTP SERVER v1.0”.....	182
FIGURA 69	- TELA PRINCIPAL DO INTERNET EXPLORER.....	181
FIGURA 70	- SOLICITAÇÃO DE DADOS COMPLEMENTARES.....	182

RESUMO

Este trabalho contém os resultados das atividades desenvolvidas com o objetivo de construir um inclinômetro foto-mecânico destinado ao monitoramento geodésico/geotécnico de estruturas de engenharia civil. Além da pesquisa bibliográfica (que aborda uma revisão dos princípios utilizados em equipamentos destinados a levantamentos geodésicos/geotécnicos para monitoramento de estruturas), são apresentados os estudos para construção do inclinômetro (exequibilidade, análise de esforços, dimensionamento de modelos, materiais aplicáveis, sua disponibilidade e custo provável, interferência de efeitos externos sobre leituras). Inclui ainda testes sobre o sensor ótico (determinação da resolução real, influência da disposição geométrica sobre as leituras, regularidade de leituras e outros), procedimentos para calibração (que fornece os parâmetros da matriz de rotação e o FAE - Fator de Ampliação Específico do equipamento, úteis para transformar dados brutos em informações adequadas ao processo de monitoramento de estruturas) e análises sobre as causas prováveis de variações de valores observados. O equipamento testado apresentou resolução média de 1mm/100m, precisão de 2mm/100m e fator de ampliação específico de 9,98324.

ABSTRACT

This work shows developed activities results to construct a photo-mechanic clinometer. Besides bibliographic research (geodetic methods and geotechnic equipment principles to civil engineering structures monitoring) preliminar studies to make a new photo mechanic clinometer (efforts analyses, dimensions evaluations, materials, external effects) is presented too. Optical sensor tests (effective resolution, geometric influences, lesure regularity), equipment calibration (to determine rotation matrix parameters and specific ampliation factor, usefull to convert raw data in information) and possible observation errors analysis are included. A 1mm/100m mean resolution, 2mm/100m precision and a specific ampliation factor of 9,98324 equipment has been reached.

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho está diretamente ligado ao monitoramento de estruturas de engenharia civil, cuja finalidade é a observação de seu comportamento em uso ao longo do tempo.

Para este tipo de atividade empregam-se diversos métodos de observação, sejam eles geodésicos ou não (segundo as diferentes conceituações existentes), que utilizam equipamentos para mensurações empregando diferentes princípios de funcionamento.

Inicialmente o equipamento aqui apresentado foi criado objetivando o emprego no monitoramento de barragens, porém sua aplicação pode ser estendida a outras áreas. Diante disto, além da precisão pretendida, a possibilidade de comunicação remota é um fator extremamente importante.

O conteúdo refere-se portanto ao projeto, desenvolvimento e construção de um equipamento que possa ser utilizado no monitoramento geodésico e/ou geotécnico de estruturas, isto é, aplicável à medição de deslocamentos em uma estrutura de construção civil. Será denominado Inclinômetro Foto-Mecânico, por utilizar-se de princípios fotônicos e mecânicos na detecção de movimentos. As informações obtidas por ele também poderão ser utilizadas para outros fins além do monitoramento da estrutura, isto é, atividades como testes de comportamento estrutural em situação de carregamento em uso.

Como objetivo geral no trabalho foi estipulado o desenvolvimento de um equipamento capaz de avaliar a variação relativa de ângulos verticais que atinja a resolução de 1mm/100m (0,0005°). Para a conquista de tal objetivo foram estabelecidos objetivos específicos tais como: análise da tecnologia a ser empregada no protótipo; estudo de modelos possíveis; análise teórica das possibilidades de construção do inclinômetro; análise de esforços; projeto do protótipo do inclinômetro;

construção do protótipo do inclinômetro; aprimoramento prático do protótipo; elaboração de testes para avaliação do protótipo; testes de leituras do sensor ótico (resolução real); leituras do sensor instalado no equipamento; leituras com o equipamento completo (intervalos constantes, intervalos variáveis, teste de retorno ao ponto original, avaliação de causas possíveis de erros de leituras); determinação dos parâmetros de calibração do protótipo (determinação da matriz de orientação, FAE - Fator de Ampliação Específico); redução de dados observados e desenvolvimento de software para coleta de dados.

Inicialmente apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre o assunto (capítulo 1), envolvendo os conceitos sobre métodos de monitoramento, técnicas disponíveis e princípios utilizados em equipamentos para levantamento geotécnicos. O capítulo 3 apresenta especificamente a proposta concretizada neste trabalho bem como os métodos adotados para tal. O capítulo 4 apresenta as análises preliminares para projeto do protótipo. A construção do equipamento consta do capítulo 5 e os procedimentos para o indispensável processo de calibração no capítulo 6. Além dos tópicos mencionados são apresentados os testes de validação no capítulo 7, enquanto as conclusões, recomendações e perspectivas estão incluídas no capítulo 8. As referências bibliográficas encontram-se no capítulo 9. O apêndice 1 contém um conjunto de plantas e desenhos para construção do equipamento, o apêndice 2 as telas do aplicativo para coleta de dados e o 3 tem a codificação do software. O anexo 1 apresenta os termos técnicos utilizados em instrumentação geodésica (FAGGION, 2004) e o anexo 2 a instrumentação normalmente utilizada em barragens e anomalias observadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O item 2.1 apresenta a conceituação corrente acerca dos métodos utilizados para o monitoramento de estruturas de construção civil. A partir dali pode-se observar a idéia de métodos geodésicos e não geodésicos.

Dada a enorme variedade dos sensores disponíveis no mercado para o desenvolvimento de monitoramento geotécnico (diferentes formas, amplitudes de leitura, resoluções, dimensões, preços, resistência a impactos, aplicações, constituição) serão apresentados apenas os princípios que os regem. O usuário interessado poderá verificar nos endereços apresentados no item 9.2 o equipamento mais adequado às suas necessidades, disponibilidades financeira, técnica e material.

O interesse pela observação de deslocamentos em estruturas de engenharia advém da necessidade de verificar-se as condições de segurança com a finalidade de preservar a vida humana. Entre outros itens, deslocamentos totais, diferenciais e vibrações assumem papel importante na análise de durabilidade de estruturas.

Existem diversas maneiras através das quais se pode medir movimentos e, conseqüentemente, inúmeros sensores baseados em diferentes princípios físicos, como por exemplo: sensores mecânicos (paquímetros, micrômetros, goniômetros, etc.), sensores magnéticos (indutivos, capacitivos, efeito Hall, etc.), sensores elétricos (“strain gages”), sensores ópticos (células fotoelétricas, fotodiodos, fototransistores, etc) e outros.

As palavras e/ou expressões chave para pesquisa podem ser, acelerômetros (“accelerometers”), extensômetros (“extensometers”), clinômetros (“clinometers”), tiltímetros (“tiltimeters”), MEMS, “laser extensometers”, “strain gauges”, piezômetros (“piezometers”), “LVDT- Linear Variable Differential Transformer”, “optical

sensors”, interferômetros (“interferometers”), interferometria (“interferometry”) entre outras.

2.1 MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS

Segundo TESKEY; PORTER (1988) apud CHAVES (1994, p.35), as deformações de estruturas de engenharia podem ser determinadas pelos seguintes métodos:

- métodos de levantamentos
- métodos geotécnicos e
- métodos estruturais

KUANG (1984) apud CHAVES (1994, p.38) classifica os métodos de monitoramento em duas categorias, os métodos geodésicos e os métodos não geodésicos, sendo que aqueles compreendem os métodos geodésicos terrestres, fotogramétricos e técnicas espaciais.

Ainda segundo o autor, os métodos não geodésicos abrangem os métodos geotécnicos e projetos especializados.

KAHMEN; FAIG (1994, p.565) dizem que para estudar deslocamentos podem ser usados métodos físicos e geodésicos. Os métodos físicos são utilizados primeiramente para detectar movimentos relativos. Entre os equipamentos empregados pode-se destacar os pêndulos, extensômetros, interferômetros, e outros.

Métodos geodésicos são primeiramente utilizados para detectar movimentos absolutos. Da mesma forma, DEPARTMENT OF ARMY (1994) enfatiza que os levantamentos geodésicos têm sido tradicionalmente utilizados principalmente para a

determinação de deslocamentos absolutos de pontos selecionados sobre a superfície do objeto em relação a alguns pontos de referência considerados estáveis.

DEPARTAMENT OF ARMY (1994, p.9.9) diz que as técnicas de medição de deslocamentos têm tradicionalmente sido categorizadas em dois grupos de acordo com os dois grupos de profissionais que utilizam esta tecnologia:

a) levantamentos geodésicos que incluem levantamentos terrestres convencionais, fotogrametria, posicionamento por satélites e algumas técnicas especiais (interferometria, nivelamento hidrostático, alinhamento e outros).

b) medidas geotécnicas e estruturais do local do deslocamento utilizando “tiltmeters”, “strainmeters”, “extensometers”, “joint meters”, “plumb lines”, etc.

As técnicas de mensuração geodésicas visam determinar se um ponto ou conjunto destes, sofre variação em suas coordenadas ao longo do tempo, ou seja, se houve algum deslocamento dos mesmos. As medidas com a finalidade de monitoramento devem ser feitas tanto vertical como horizontalmente, com o objetivo de determinar as coordenadas tridimensionais dos pontos.

De acordo com GOSH (1983) apud CHAVES (1994, p.11), a Associação Internacional de Construção de Barragens tem recomendado que 0,7 % do custo total da construção da barragem sejam gastos nos levantamentos geodésicos.

Em contrapartida o autor apresenta o que chama de alguns obstáculos: a complexidade de medição requer a presença de muitos operadores durante vários dias e é muito difícil adotar métodos geodésicos para monitoramento contínuo.

Cada tipo de levantamento apresenta suas vantagens e desvantagens. De acordo com DEPARTAMENT OF ARMY (1994, p.9.9), levantamentos geodésicos, utilizando uma rede de pontos interconectados por ângulos e ou medidas de distância,

usualmente proporcionam suficiente redundância de observações para análises estatísticas de qualidade e detecção de erros. Ainda segundo o autor, esta técnica proporciona informações globais sobre o comportamento do objeto, enquanto as medições geotécnicas proporcionam informações localizadas e, muito freqüentemente, informações locais sem qualquer verificação a não ser a comparação com outras medidas independentes.

DEPARTMENT OF ARMY (1994, p.9.9) diz ainda que instrumentos geotécnicos são mais fáceis de uma adaptação para fins de automação e monitoramento contínuo, já os levantamentos geodésicos terrestres convencionais são mais trabalhosos e requerem operadores treinados.

CHAVES (1994, p.53) destaca algumas vantagens dos métodos geodésicos:

- a) fornecem o estado global de uma estrutura;
- b) contém o esquema próprio de verificar os resultados e são capazes de avaliar
 - a acurácia da medição globalmente;
- c) fornecem versatilidade e adequabilidade para qualquer meio-ambiente e situação de operação.

2.2 TÉCNICAS GEODÉSICAS APLICADAS AO MONITORAMENTO

Algumas técnicas de levantamento geodésico utilizadas para fins de monitoramento são: nivelamento geométrico de precisão, triangulação, trilateração geodésica, poligonação, determinação de coordenadas utilizando o GPS (“*Global Positioning System*”- Sistema de Posicionamento Global) e fotogrametria. Em trabalhos de monitoramento de grandes estruturas é comum associar estas diferentes técnicas, como o posicionamento por GPS para a determinação das coordenadas planas dos pontos e o nivelamento geométrico de precisão para o controle altimétrico. É comum a utilização de um conjunto de pontos denominada rede de monitoramento para a elaboração de tais atividades.

Adicionalmente, HECK (1984) apud CHAVES (1994, p.54) diz que o método geodésico, assim como o topográfico, é caracterizado por observações diretas de distâncias, ângulos, diferenças de altitude, direções verticais e horizontais, através do uso de teodolitos, níveis, medidores eletrônicos de distância, taqueômetros eletrônicos, miras invar, etc.

2.2.1 – Nivelamento Geométrico de Precisão

O nivelamento geométrico é a operação que visa a determinação do desnível entre dois pontos a partir da leitura em miras (estádias) graduadas efetuadas com um nível. Para a determinação de desníveis com precisão normalmente é empregado o método de visadas iguais. Nele as duas miras são colocadas à mesma distância do nível sobre os pontos entre os quais se deseja determinar o desnível, sendo então efetuadas as leituras (VEIGA, 2003). É um processo bastante simples, onde o desnível é determinado pela diferença entre uma leitura de ré e uma de vante. Os equipamentos empregados são os níveis (ópticos-mecânicos e digitais) e miras de invar. Atualmente é cada vez mais comum a utilização de níveis digitais juntamente com miras invar

gravadas em código de barra. O quadro 1 apresenta a precisão de alguns modelos de níveis digitais. De acordo com VEIGA (2003), os níveis digitais possuem os mesmos componentes mecânicos e ópticos de um instrumento clássico, mas diferem destes no que diz respeito à forma de leitura. Esta baseia-se na decodificação de um código de barras existente na mira.

QUADRO 1 - PRECISÃO DOS NÍVEIS DIGITAIS PARA LEITURA ELETRÔNICA			
Modelo	Fabricante	Precisão mm/km mira invar	Precisão mm/km mira convencional
DL-101 C12	Topcon	0,4	1,0
DiNi	Trimble	0,3	1,0
DNA03	Leica	0,3	1,0
SDL30	Sokkia	0,6	1,0

Fonte: TOPCON(2003), TRIMBLE (2003), LEICA (2003) e SOKKIA (2003).

De acordo com KAHMEN; FAIG (1988, p.565), níveis automáticos com micrômetro e miras invar são utilizados para obter desvios padrões menores que 1mm/km. Em trabalhos utilizando a técnica de nivelamento geométrico de alta precisão, MEDEIROS (1999) conseguiu estabelecer o desnível entre determinadas seções com precisão abaixo de $0,5 \text{ mm K}^{1/2}$ (sendo K a distância média nivelada). Cabe salientar que os trabalhos foram realizados utilizando-se um nível óptico-mecânico (modelo N3 da Wild).

Maiores detalhes sobre o procedimento de nivelamento podem ser encontrados em BRASIL (1975), BRASIL (1998) e MEDEIROS (1999).

2.2.2 Triangulação e Trilateração.

O método de triangulação é um dos métodos mais antigos utilizados para a determinação de coordenadas planimétricas de pontos. De acordo com BRASIL (1983, p.6), entende-se por triangulação o procedimento em que se obtém figuras geométricas

a partir de triângulos justapostos ou sobrepostos, formados através da medição dos ângulos em cada vértice. Adicionalmente à medição dos ângulos existe a necessidade de se estabelecer a escala da triangulação, que é realizada através da determinação de uma distância, denominada de base.

A trilateração é processo semelhante à triangulação, porém, ao invés de serem observados os ângulos, os lados dos triângulos é que são observados, trabalhando-se portanto com distâncias. No caso da geodésia estas distâncias são medidas utilizando-se os medidores eletrônicos de distância. Atualmente existem no mercado diversos modelos de medidores eletrônicos de distâncias, com precisões que podem chegar a $1\text{mm}+1\text{ppm}$.

A partir da rede básica de monitoramento definida pelos pontos levantados por triangulação ou trilateração, as coordenadas dos pontos a serem monitorados na estrutura são determinadas.

De acordo com CHAVES (1994, p.60), na triangulação existem dois tipos de processos de medição: a interseção e resecção. Na interseção as coordenadas do objeto a ser posicionado são determinadas a partir de observações angulares realizadas de dois pontos conhecidos. As distâncias dos pontos da rede até o objeto são determinadas pela lei dos senos.

No caso da resecção, o equipamento de medição é instalado sobre o ponto cujas coordenadas devem ser determinadas e são realizadas observações aos pontos de apoio. É necessária a observação a três ou mais pontos de apoio para a solução matemática do problema.

MOREIRA (1988) apresenta em seu trabalho, algumas técnicas para a determinação de coordenadas tridimensionais de pontos, entre as quais a Interseção Espacial Trigonométrica e a Interseção Espacial Analítica, que serão descritas

posteriormente. Atualmente também é possível determinar as coordenadas dos pontos monitorados através de técnicas de irradiação, onde um ângulo em relação a uma direção conhecida e a distância entre o ponto de apoio e o ponto observado são determinados (medidos), trabalhando num esquema de coordenadas polares. Isto pode ser realizado empregando-se os medidores eletrônicos de distância que funcionam com laser, que não necessitam de um prisma refletor ou os medidores tradicionais, porém neste caso deve-se dispor de refletores posicionados na estrutura a ser monitorada.

Existem hoje no mercado as chamadas estações totais robotizadas, que possuem servo-motores e algoritmos para reconhecimento automático de alvos, que podem ser programadas e efetuar as observações de forma automatizada, sem a necessidade da presença de um operador.

2.2.3 Poligonação

A poligonação é um dos métodos mais empregados para a determinação de coordenadas de pontos, principalmente para a definição de apoio planimétrico. Uma poligonal é uma série de linhas consecutivas para as quais são conhecidos os comprimentos e direções, obtidos através de medições em campo. O levantamento de uma poligonal é realizado através do método de caminhamento, percorrendo-se o itinerário definido por uma série de pontos, medindo-se todos os ângulos e lados e uma orientação inicial. A partir destes dados e de uma coordenada de partida, é possível calcular as coordenadas de todos os pontos que formam esta poligonal. Para verificação da qualidade do levantamento (erros de fechamento angular e linear) é desejável que as orientações inicial e final, bem como os pontos de saída e chegada sejam conhecidos (é o que ocorre em linhas poligonais “enquadradas” ou “fechadas”).

Este método pode ser aplicado, por exemplo, para o levantamento de galerias ou quando os pontos a serem controlados estão próximos uns dos outros (CHAVES, 1994, p.68).

2.2.4 - Posicionamento por Satélite

Um dos grandes avanços nas técnicas de posicionamento das últimas décadas é o sistema de posicionamento por satélites denominado de GPS (“*Global Positioning Systems*” ou Sistema de Posicionamento Global). Neste sistema, a coordenada de um ponto é obtida através do rastreamento e processamento dos sinais enviados por uma constelação de satélites que orbitam ao redor da Terra.

Normalmente o estabelecimento e densificação de uma rede de controle horizontal baseado na técnica de posicionamento GPS, é realizado de modo relativo empregando-se o método estático. Como vantagens na utilização do sistema GPS pode-se citar a facilidade de obtenção de dados e precisão na determinação das coordenadas. Devido à eliminação da degeneração intencionalmente produzida dos sinais, bem como ao desenvolvimento de novas técnicas para utilização dos receptores e processamento de dados, obtém-se coordenadas com precisão milimétrica para posicionamentos relativos (desde que obedecidas algumas condições de distância ponto base-receptor, tempo e intervalo de coleta de sinal, número de frequências dos receptores, ausência de interferências nos sinais, entre outras). O receptor RTK – “Real Time Kinematics” permite a determinação da posição do receptor itinerante com a frequência de um Hz (disponível no LAIG) embora já existam receptores com a possibilidade de determinação com 10 e 20 Hz (ROBERTS, G. W., 2001). Isto abre a possibilidade de determinação de vibrações em estruturas utilizando este tipo de equipamento praticamente em tempo real. Infelizmente o seu custo ainda é elevado.

Diversos trabalhos têm sido realizados utilizando o sistema GPS para monitoramento de estruturas, entre eles pode-se citar CHAVES (1994), TEIXEIRA (2001), SCHON; KUTTERER (2003) e ROBERTS et al. (2003).

2.2.5 - Fotogrametria

A determinação das coordenadas dos pontos é realizada por processos fotogramétricos, onde o objeto a ser monitorado é fotografado de duas ou mais posições, e através de observações e medidas sobre as fotos é possível obter informações geométricas, como coordenadas de pontos.

Tanto a fotogrametria aérea como a terrestre são empregadas para o monitoramento. Para a questão de monitoramento de estruturas tem-se empregado a técnica de fotogrametria a curta distância.

De acordo com DEPARTMENT OF ARMY (1994, p.9-14) as principais vantagens de usar a fotogrametria são a redução do tempo de trabalho de campo, a possibilidade de obtenção simultânea de coordenadas tridimensionais (X, Y e Z) e, a princípio, um número ilimitado de pontos pode ser monitorado.

MENDONÇA (1984), realizou o monitoramento de uma laje utilizando fotogrametria a curta distância, usando os conceitos da fotogrametria analítica, comparando os resultados obtidos com os fornecidos por instrumentos mecânicos chamados de relógios comparadores ou defletômetros, apresentando segundo o autor resultados melhores que 0,01mm.

KERSTEN; MAAS (1995) relatam testes efetuados com o objetivo de determinar coordenadas tridimensionais de pontos por técnicas fotogramétricas com o objetivo de monitorar uma represa. Os autores afirmam que técnicas de fotogrametria digital automáticas ou semi-automáticas podem ser uma ferramenta eficiente para

medidas de deslocamento como uma opção para densificação de medidas de redes geodésicas por técnicas convencionais.

Sistemas baseados em *laserscannig* terrestres também estão sendo utilizados para estudos aplicados ao monitoramento.

STATHAS et al. (2003) realizaram um teste para avaliar a performance de estações totais a laser e um sistema laser scanner terrestre para fins de monitoramento. Nos testes realizados foi empregado um plano, cujos parâmetros foram determinados por técnicas de mínimos quadrados.

Segundo os autores, estes instrumentos constituem novos instrumentos para a determinação de deslocamentos em estruturas.

2.2.6 Rede de Monitoramento

De acordo com DEPARTMENT OF ARMY (1994, p.9-2), os procedimentos gerais para monitorar a deformação de uma estrutura envolvem a medida de deslocamentos espaciais de pontos selecionados (alvos), a partir de pontos de referência, que têm suas posições controladas.

Quando os pontos de referência estão localizados na estrutura, apenas deslocamentos relativos podem ser determinados. Deslocamentos absolutos poderão ser determinados se os pontos de referência estiverem localizados fora da estrutura ou da região afetada pela represa ou reservatório.

Os movimentos de uma represa determinados por medições acuradas são divididos em movimentos relativos, por exemplo entre pontos vizinhos, e absolutos, com respeito a uma posição previamente estabelecida e com coordenadas conhecidas (KAHMEN; FAIG, 1988, p.565).

Na rede absoluta os pontos utilizados para a realização do monitoramento são posicionados de forma que fiquem fora do objeto observado ou da área de influência das forças motivadoras dos movimentos, possibilitando desta forma determinar deslocamentos absolutos dos pontos que estão sendo monitorados. Na rede relativa todos os pontos estão localizados no objeto deformável.

De acordo com CHAVES(1994), no caso das redes absolutas deve-se confirmar previamente estabilidade dos pontos de referência, para assim identificar os possíveis deslocamentos de um ponto no objeto. Ainda segundo o autor, nas redes relativas a análise dos deslocamentos é complicada pelo fato de todos os pontos sofrerem movimentos relativos.

De acordo com CHAVES (1994, p.35), no método de rede de levantamento, uma rede uni, bi ou tridimensional, com pontos localizados na estrutura e em locais “estáveis” fora da estrutura é observada em várias épocas. Esta poderá ser uma rede fotogramétrica, rede GPS e ou rede convencional (triangulação / trilateração)

Durante a implantação da rede de monitoramento é necessário realizar um planejamento inicial para a escolha da disposição dos pontos, uma vez que esta afeta a precisão final do levantamento. Este planejamento inicial utiliza a pré-análise aplicada a levantamentos de campo. De acordo CHRZANOWSKI (1977, p.1), a escolha do profissional de levantamentos deve ser baseada na pré-análise do projeto de forma que os métodos e instrumentos selecionados vão satisfazer os requerimentos de precisão estabelecidos no projeto, ao mesmo tempo em que o trabalho seja feito da forma mais econômica.

Adicionalmente, DEPARTMENT OF ARMY (1994, p 9-19) cita que de forma geral o esquema de monitoramento inclui, entre muitos outros aspectos, os seguintes tópicos:

- Identificação dos parâmetros a serem observados;

- Seleção da localização dos pontos de monitoramento (tanto os pontos no objeto a ser medido como os pontos de referência);
- Determinação (pré-análise) da precisão requerida e extensão das medidas;
- Determinação da frequência de repetição das observações;
- Seleção dos tipos de instrumentos e sensores que serão utilizados (várias alternativas);
- Projeto dos testes e facilidade de calibração;
- Projeto do sistema de gerenciamento dos dados;
- Preparação do cenário para a falta de instrumentação (projeto de redundância);
- Análise de custos e decisão final sobre o esquema de monitoramento selecionado.

Adicionalmente, SILVA (1997) apud AGUIRRE (2000, p.1) estabelece quatro etapas na definição de uma rede de monitoramento: “ A primeira etapa, denominada de especificação, requer um conhecimento a priori da grandeza dos deslocamentos, que é, também, uma condição para estabelecer a precisão dos equipamentos utilizados. A segunda etapa, denominada concepção, visa atingir a melhor configuração das estações de controle de observação. A terceira etapa, denominada de implantação, é a etapa de maior custo, porque é a que envolve técnicas de medição e problemas tais como centragem do instrumento, pontaria aos alvos e nivelamento do equipamento.

A quarta etapa, denominada análise, é a última etapa na qual as observações são estatisticamente analisadas. Nesta etapa, a análise estatística consiste na detecção de erros grosseiros (“blunders”), estimação de parâmetros e comparação entre conjuntos de dados provenientes de épocas diferentes. Esta análise visa determinar as reais

variações das coordenadas. Nesta etapa é feito também um estudo de otimização da rede do ponto de vista da confiabilidade interna.”

Entre os trabalhos que relatam a aplicação de técnicas de levantamento de pontos para fins de monitoramento, pode-se destacar o de PRETORIUS et al. (2001). Neste trabalho é apresentada a metodologia empregada para o monitoramento de uma represa na África do Sul. Para tanto, foram implantadas redes de triangulação, poligonais precisas e linhas de nivelamento. O LAIG - Laboratório de Instrumentação Geodésica possui equipamentos semelhantes aos utilizados neste trabalho, como por exemplo, a Estação Total TC2002, nível digital NA 3003 e prisma preciso de reflexão total. Uma vez estabelecida a rede de monitoramento deve-se realizar as observações.

CHEN (1988) apud CHAVES (1994, p.50) define a frequência dos levantamentos da seguinte forma:

Durante o enchimento do reservatório:

1. barragem de concreto de 7 a 10 dias
2. barragem de terra-enrocamento: de 7 a 10 dias

Do enchimento à estabilização da barragem (de 3 a 5 anos):

1. barragem de concreto: de 0,5 a 1 mês
2. barragem de terra- enrocamento: 1 mês

No período normal de operação:

1. barragem de concreto: de 1 a 3 meses
2. barragem de terra- enrocamento: 3 meses.

2.2.6.1 Deslocamento e deformação

De acordo com CHAVES (1994, p3), as mudanças geométricas de uma estrutura podem ocorrer na geometria externa, caracterizando um deslocamento da estrutura como um todo, ou na geometria interna, caracterizando uma deformação.

No caso de um deslocamento, a geometria externa permanece a mesma, sofrendo apenas uma variação na posição e ou orientação do objeto. Em se tratando de um deslocamento, o mesmo pode ser horizontal ou vertical, bem como envolver apenas uma translação e ou rotação. Cabe salientar que um deslocamento não necessariamente provoca uma deformação.

Quando ocorre o deslocamento há uma mudança da geometria interna, alterando-se a forma e/ou tamanho da estrutura.

De acordo com GAGG (1994, p.3) dependendo de suas extensões, as medidas de deslocamentos podem ser classificadas em escala local, regional, continental e global. O monitoramento de uma barragem poderia ser enquadrado na escala local.

Os trabalhos de monitoramento geodésico buscam detectar variações de coordenadas (planimétricas e/ou altimétricas) de um conjunto de pontos, dentro de um período específico de tempo. Os resultados obtidos pelas técnicas geodésicas indicam se os pontos tiveram suas coordenadas modificadas (deslocamento). Uma etapa posterior, realizada em conjunto com profissionais de outras áreas é verificar se estes deslocamentos causaram uma deformação. A causa deste deslocamento ou é assunto para os especialistas em estruturas.

GAGG (1997, p.4) afirma que, se comparada com outros tipos de levantamentos, as medidas de deslocamentos têm as seguintes características:

- a) necessidade de alto grau de acuracidade;

- b) repetibilidade de observações;
- c) integração de diferentes tipos de observações;
- d) análise sofisticada dos dados adquiridos;
- e) necessidade de amplo conhecimento interdisciplinar para uma interpretação física correta do fenômeno.

2.2.6.2 Métodos de determinação de coordenadas tridimensionais

Conforme MOREIRA (1998), os principais métodos tratados na literatura fundamentam-se na Interseção Espacial, sendo este o mais utilizado pelos sistemas desenvolvidos para o cálculo de coordenadas tridimensionais de pontos fixos, aqui denominados alvos.

2.2.6.2.1 Interseção espacial trigonométrico - visadas exteriores

Neste método há uma divisão dos cálculos em 2 etapas distintas:

- 1- cálculo das coordenadas planas;
- 2- cálculo da coordenada altimétrica do alvo.

Esta divisão proporciona resultados inconsistentes, mas, ainda assim, é um método muito utilizado em trabalhos topográficos, que dispensam precisão apurada. Para a obtenção do posicionamento tridimensional, faz-se necessário o conhecimento das coordenadas de dois pontos, aqui chamados estações, devidamente materializados, que formarão a base linear do levantamento. A partir desta serão determinadas as direções das visadas estação-alvo e as coordenadas do alvo P. Conhecendo-se as coordenadas (x,y,z) das estações A e B, é possível calcular as coordenadas do alvo.

2.2.6.2.2 - Método da interseção espacial analítica

Este método considera os ângulos horizontais e verticais conjuntamente para o cálculo das coordenadas tridimensionais do alvo, tal que erros cometidos nas leituras dos ângulos horizontais influenciam os valores das coordenadas altimétricas, sendo a recíproca verdadeira. Para a determinação da coordenada altimétrica pode ser utilizado tanto o ângulo zenital como o de altura do alvo.

Os aparelhos A e B devem ser reciprocamente colimados, para depois efetuarem-se as visadas ao alvo P. Neste caso, o termo colimados é entendido como a visada do aparelho devidamente estacionado em A em relação ao centro óptico daquele estacionado em B, e de B em A, estabelecendo a linha de base do método em questão. O aparelho A é considerado origem do sistema de referência, e a direção AB é visada com um ângulo horizontal $00^{\circ} 00' 00''$.

2.2.6.2.3 Método da interseção espacial analítica com superdeterminação de medidas

Segundo MOREIRA (1998), este método foi apresentado por IBIAPINA (1993), apoiado no Método de Interseção Espacial Analítica no qual é proposta a associação, a cada ponto da rede com coordenadas conhecidas, de versores que definem a direção destes pontos ao alvo. O método exige a determinação de uma reta perpendicular comum entre duas retas reversas no espaço.

Havendo superdeterminação de medidas, a solução ideal para o cálculo das coordenadas espaciais do alvo considera que os valores compensados destas coordenadas são iguais à média aritmética das "m" soluções obtidas pela combinação das "n" estações, tomadas duas a duas. (MOREIRA, 1998).

2.2.6.2.4 Método polar

Estando o instrumento estacionado sobre um ponto de coordenadas conhecidas, a partir dele são realizadas leituras de ângulo zenital, azimute e da distância inclinada do aparelho ao alvo, sendo que este não pode ser inacessível.

Após a definição de um sistema de referência (x,y,z) , orientando-se o aparelho, é possível fazer-se leituras horizontais e verticais, sendo que as distâncias inclinadas são realizadas eletronicamente.

2.2.6.2.5 Metodologia proposta por MOREIRA (1998)

Conforme MOREIRA (1998), na metodologia desenvolvida por IBIAPINA (1993), que fundamenta-se no Método de Interseção Analítica Espacial, os aparelhos devem, necessária e obrigatoriamente, ser intervisíveis.

Recomenda-se que em um processo de determinação de coordenadas tridimensionais devem ser eliminadas, ao mesmo tempo, as visadas recíprocas e simultâneas às extremidades das miras horizontais de invar, cujo propósito seria o de obter o fator de escala para o levantamento. São também necessárias as transformações entre sistemas de referência, evitando-se cálculos desnecessários.

2.2.6.2.5.1 Ponto de orientação

O ponto de orientação é importante no processo de determinação de coordenadas tridimensionais, pois é em relação a ele que os instrumentos empregados no controle determinarão a rigidez da estrutura vistoriada.

Sua função é servir de base para a execução das irradiações. Após sua determinação escolhe-se uma direção de orientação, que passará a ser o eixo Y do

sistema de referência adotado, devendo ser materializado no terreno por um ponto fixo e de fácil identificação.

Um sistema de centragem forçada deve ser empregado no processo. Assim, durante o mesmo controle ou em etapas posteriores, o ponto materializado por este sistema poderá ser reocupado, uma vez que a estimativa de repetibilidade na ocupação do ponto é da ordem do décimo de milímetro. (NADAL, 2000).

2.2.6.2.5.2 Proposta para o cálculo de coordenadas

A- Método topográfico-trigonométrico

Conforme MOREIRA (1998), este método difere do Método de Interseção Espacial Trigonométrico sob dois aspectos:

as coordenadas planas do alvo são calculadas pela Lei dos senos e não em função das tangentes dos azimutes das linhas de visada entre as estações fixas e o alvo;

a coordenada altimétrica é calculada em função dos lados do triângulo espacial, cujos vértices são as duas estações fixas e o alvo, e não através das distâncias entre as coordenadas planas do alvo e as de cada estação fixa.

De acordo com o mesmo autor, o método admite que as linhas de visada sejam concorrentes no alvo, e que o erro angular em cada triângulo está implícito no ângulo do vértice, isto é, no ângulo de interseção dessas linhas. Este erro engloba tanto aqueles referentes ao operador, às condições ambientais, aos defeitos sistemáticos do aparelho, às dificuldades de enquadramento do alvo e todos os outros fatores que possam influenciar na medição angular.

No presente método as coordenadas planimétricas e altimétricas do alvo são calculadas separadamente. Mesmo assim, os erros cometidos nas leituras dos ângulos horizontais influenciam no cálculo das coordenadas altimétricas. Essa dependência ocorre porque as distâncias, em todas as combinações, são calculadas em função dos ângulos internos de cada triângulo, que por sua vez são calculados em função dos azimutes, que são calculados em função dos ângulos horizontais, fazendo com que os erros dos ângulos horizontais sejam propagados às coordenadas altimétricas dos alvos.

O método destina-se à determinação das coordenadas de pontos fixos, bem como estabelecer a estimativa das precisões destas determinações. O método utiliza os conceitos básicos da Topografia Clássica e da Trigonometria, combinados com a idéia de visualização de um ponto de referência simultânea por todos os aparelhos envolvidos no processo.

B - Método das distâncias mínimas

Este método fundamenta-se na minimização de uma função matemática, definida pela somatória das distâncias entre as linhas de visadas de todos os aparelhos envolvidos no processo e o lugar geométrico supostamente ocupado pelo ponto de coordenadas desconhecidas, aqui denominado alvo (MOREIRA, 1998).

As linhas de visada não são concorrentes no alvo, mas passam muito próximos a ele. Assim, quando o alvo é visado por vários aparelhos, ao mesmo tempo, a somatória das distâncias aparelho-alvo deve ser mínima para que os valores das coordenadas sejam corretos e ajustados. Daí a designação de Método das Distâncias Mínimas.

C - Método de minimização e ajuste

Este método serve para o cálculo e determinação de coordenadas tridimensionais de alvos ou pontos fixos, fundamentando-se no princípio de que estas coordenadas são definidas através de uma função, cujas variáveis são as coordenadas do centro óptico dos aparelhos envolvidos no processo, os ângulos zenitais e os azimutes das linhas de visada desses aparelhos em direção ao alvo. Assim, os ângulos horizontais lidos devem ser transformados em azimutes, relacionados ao referencial adotado. (MOREIRA, 1998).

O cálculo de coordenadas tridimensionais neste caso emprega o ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados, cujo princípio fundamental é minimizar a somatória dos quadrados das diferenças entre os valores estimado e observado.

D - Análise comparativa e resultados

MOREIRA (1998) faz algumas considerações sobre os dados obtidos em cada um dos métodos propostos para o cálculo de coordenadas tridimensionais. As diferenças encontradas nas determinações destas são mínimas, tornando-se dispensável a utilização de testes estatísticos para a sua avaliação.

As coordenadas das extremidades da mira horizontal, empregada no estudo, obtidas em cada um dos métodos de determinação, apresentam-se no quadro 1 MOREIRA (1998).

QUADRO 1 – COORDENADAS TRIDIMENSIONAIS DAS EXTREMIDADES DA MIRA						
Métodos	Extremidade 1			Extremidade 2		
	X 1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)
1.Clássico	103,531	95,240	102,153	102,303	93,661	102,158
2.Interseção	103,531	95,240	102,153	102,303	93,661	102,158
3.Topográfico Trigonométrico	103,531	95,240	102,153	102,303	93,661	102,158
4.Distância Mínima	103,532	95,238	102,153	102,303	93,660	102,158
5.Mínimo Ajuste	103,533	95,236	102,153	102,304	93,658	102,158

Segundo MOREIRA (1998), o Método Clássico, também conhecido como de Visadas Exteriores ou Interseção a Vante, e o Método de Interseção com Superdeterminação de Medidas, apresentam características idênticas quanto a precisão, sendo que a metodologia de cálculo influi somente nos valores das precisões relativas das determinações, e não nos valores das coordenadas determinadas.

O Método Topográfico-Trigonométrico foi concebido inicialmente para fornecer valores aproximados para as coordenadas de alvos fixos. No entanto, os resultados comprovam que ele apresenta as mesmas características quanto à precisão.

No Método das Distâncias Mínimas, as determinações das distâncias aparelho-alvo proporcionam valores mínimos às precisões, as quais são calculadas em função daquelas coordenadas. Assim, este método apresenta valores mais precisos, pelo fato da minimização da função objetivo.

Já o Método de Minimização e Ajuste é o mais preciso de todos, visto que fornece todas as estimativas ajustadas por Mínimos Quadrados. O autor considera este o mais trabalhoso, pois requer um bom conhecimento sobre Ajustamento de Observações.

MOREIRA (1998) faz algumas recomendações em seu estudo:

- que os métodos Clássico, Interseção Espacial com Superdeterminação de Medidas, e Topográfico-Trigonométrico, devem ser empregados somente quando a distribuição das estações for aproximadamente linear, uma vez que ângulos verticais agudos ou obtusos provocam inconsistência nos cálculos, tendo em vista que estes métodos fazem uso da Lei dos Senos para calcular as coordenadas dos alvos;

- nos métodos Clássico e Interseção Espacial com Superdeterminação de Medidas, distâncias desproporcionais entre as estações e a distância média entre a linha dos alvos e a linha de base devem ser evitadas. Esse detalhe garante que os

ângulos dos vértices dos triângulos, junto aos alvos, não tenham valores reduzidos, proporcionando imprecisões nos cálculos;

- no Método da Minimização das Distâncias, as estações podem ter qualquer distribuição espacial, desde que todas visualizem o ponto de orientação estabelecido. Pode ser empregado quando se deseja obter as coordenadas ajustadas, porém, não interessando os valores de outras estimativas ajustadas, uma vez que o número de equações sempre será igual ao de incógnitas.

É importante salientar a necessidade da verificação, retificação e calibração dos instrumentos empregados no monitoramento e controle de obras de engenharia, pois a precisão e confiabilidade dos resultados estão diretamente relacionadas à qualidade do instrumental empregado no processo.

Do ponto de vista geodésico, os métodos mais empregados para avaliação de movimentos constitui-se na comparação de coordenadas tridimensionais ou planas e/ou de desníveis de pontos de controle (PC) obtidas em épocas diferentes.

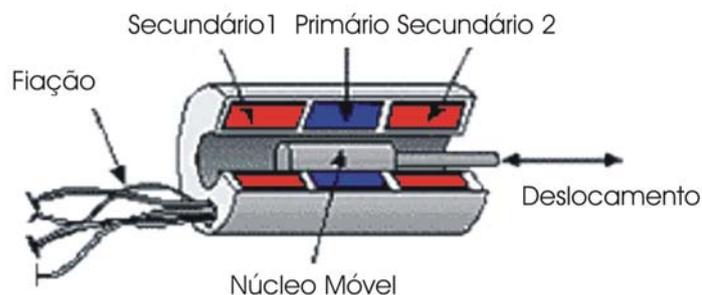
2.3 TÉCNICAS NÃO GEODÉSICAS

Outra forma de monitoramento é através de transdutores, nome genérico empregado para a observação indireta de variações, usualmente utilizando-se de efeitos eletro-óptico-magnéticos. Estes equipamentos estão sujeitos às variações que a estrutura experimenta e, em função dos efeitos sofridos, apresentam e/ou induzem variações em outras grandezas mensuráveis tais como corrente elétrica, tensão, campos magnéticos, variação da intensidade de feixes de ondas eletromagnéticas, entre outras.

2.3.1 LVDT – Transdutor Linear de Deslocamentos Variáveis

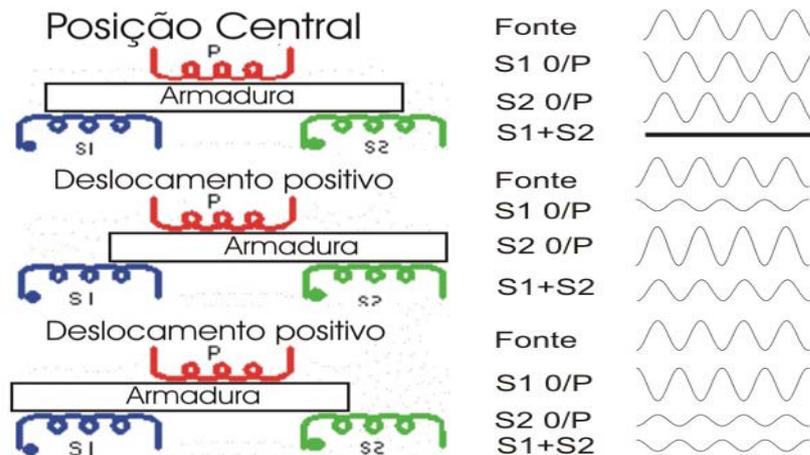
O conhecido LVDT – “Linear Variable Differential Transformer” (algumas vezes traduzido como “transdutor linear de deslocamentos variáveis”) é um exemplo deste tipo de transdutor (esquema na figura 1). Este equipamento (também conhecido por “palpador analógico”) é constituído, basicamente, por um conjunto de três bobinas, uma primária (P) e duas secundárias (S).

FIGURA 1 – ESQUEMA GENÉRICO DO LVDT
(FLW, INC. COSTA MESA, CA. 92626, USA)



A bobina primária experimenta uma excitação provocada por uma corrente alternada (normalmente na região de 1-10kHz em 0,5 – 10V rms) e o trânsito de um núcleo magnético móvel (denominado armadura) induz a formação de correntes nas bobinas secundárias. Estas são construídas em série, porém com orientação oposta.

FIGURA 2 – DESENHO ESQUEMATICO DA MUDANÇA DE FASE DEVIDO À POSIÇÃO DO NÚCLEO (RDP ELECTRONICS LTD)



Quando o núcleo está em posição central as correntes induzidas nas bobinas secundárias anulam-se (figura 2). Quando há seu deslocamento num sentido a bobina para onde ele se desloca adquire uma corrente induzida maior enquanto a outra experimenta menor indução. Isto cria um desequilíbrio de correntes que é linearmente proporcional ao sentido e à magnitude do deslocamento. O que se observa, na realidade, é a frente de onda da corrente alternada induzida uma vez que ela não possui uma polaridade propriamente dita. (BROCANELLI, C. (1983))

O LVDT é composto por diversos elementos eletrônicos como moduladores, demoduladores, amplificadores, controle de zero/ganho, além do sensor propriamente dito, que permitem medidas precisas. Estes acessórios destinados à análise da frente de onda apresentam elevado custo.

Cada uma das partes do equipamento (bobinas e núcleo magnético) é presa à estrutura sob análise e as deformações relativas experimentadas por ela são transmitidas mecanicamente. Como há correspondência linear entre o deslocamento da armadura e a frente de onda obtida nas bobinas secundárias, pode-se avaliar o

deslocamento sofrido segundo uma direção. Este equipamento usualmente tem aplicação para deslocamentos unidirecionais.

A principal vantagem deste sensor é a robustez. Isto provém do fato de os componentes do mecanismo não se tocarem, o que lhe dá longa vida útil além do que se pode construí-lo a prova d'água e em formatos adequados à mais difíceis situações. Os LVDTs diferenciam-se pelo ambiente de aplicação. Existem os destinados a ambientes sob alta pressão, alta radiação, submersíveis, alta temperatura, diferentes amplitudes de movimentos, diferentes resoluções e dimensões. Como o princípio de funcionamento baseia-se na transferência eletromagnética a capacidade de resolução é praticamente infinita. A menor fração de variação do campo magnético pode ser medida por um sistema eletrônico adequado. A combinação destes fatores aliados à precisão e repetibilidade assegura que esta tecnologia é ainda uma das melhores em termos de medida de deslocamentos.

2.3.2 Extensômetros Resistivos

2.3.2.1 Extensômetros

Extensômetros resistivos são transdutores de ampla utilização em Engenharia. Tais sensores são empregados para a medição de movimentações de estruturas mecânicas, prestando-se também para o desenvolvimento de ferramentas específicas de medição como células de carga, torquímetros, entre outros. Os extensômetros baseiam-se na variação da resistência de um condutor elétrico quando submetido a uma deformação mecânica (Oliveira, 2002).

A resistência elétrica de um condutor uniforme pode ser descrita como função de seu comprimento L , seção transversal A e resistividade ρ da seguinte maneira:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

Obtendo-se a variação total de R obtém-se

$$dR = \left(\frac{L}{A}\right)d\rho + \left(\frac{\rho}{A}\right)dL - \left(\rho \frac{L}{A^2}\right)dA$$

dividindo esta expressão por R e substituindo o seu valor invariado

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A}$$

O termo dA nesta expressão representa a variação da seção transversal do condutor. Tal variação é vinculada à deformação axial dL através do coeficiente de Poisson (ν), podendo-se então escrever a aproximação de primeira ordem de tal vínculo como:

$$\frac{dA}{A} = -2\nu\left(\frac{dL}{L}\right) + \nu^2\left(\frac{dL}{L}\right)^2 \approx -2\nu\frac{dL}{L}$$

Substituindo esta expressão na equação modificada da variação de R tem-se:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L}(1 + 2\nu)$$

Definindo-se S_A , a sensibilidade da liga metálica do condutor, como a razão entre as variações específicas de resistência e de deformação linear tem-se

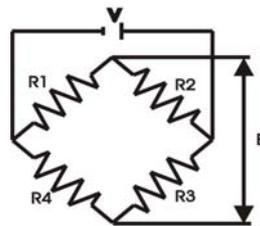
$$S_A = \left(\frac{dR}{R}\right) / \left(\frac{dL}{L}\right) = 1 + 2\nu + \left(\frac{d\rho}{\rho}\right) / \left(\frac{dL}{L}\right)$$

Valores experimentais de S_A para diferentes tipos de materiais resistivos encontram-se entre os limites de 2,0 e 4,0. A maioria dos materiais utilizada para a construção dos extensômetros resistivos possui sensibilidade em torno de 2,0. Sabendo-se que o valor do coeficiente de Poisson (ν) é em torno de 0,3 pode-se

concluir da expressão da sensibilidade de condutores acima que ela é influenciada em sua maior parte pelo termo $(1+2\nu)$ associado a sua variação de comprimento. A variação da sensibilidade em função da mudança da resistividade é responsável apenas por uma pequena parcela da sensibilidade total do condutor (Oliveira, 2002).

Os extensômetros resistivos necessitam de circuito auxiliar de condicionamento que permitem converter a sua deformação, e conseqüente mudança de resistência elétrica, em uma tensão proporcional medida em Volts. Tais circuitos, chamados pontes extensométricas, são baseados no princípio de equilíbrio de tensão das pontes resistivas de Wheatstone (figura 3) (BEKEIERMAN, S., 2003).

FIGURA 3 - PONTE DE WHEATSTONE



O funcionamento da ponte pode ocorrer através da aplicação de uma tensão de alimentação (V) estabilizada ou através de um sinal de tensão alternada de alta frequência. Os resistores presentes são substituídos pelo extensor. A substituição pode ser dar em um, dois, três ou nos quatro resistores. O caso de emprego de uma tensão de alimentação modulada em frequência é utilizada com sucesso na minimização da influência de ruídos na leitura da tensão proporcional ao deslocamento, exigindo contudo um dispendioso circuito de modulação, demodulação e comparação de fase dos sinais elétricos de referência de operação da ponte.

Conforme os materiais utilizados como elemento resistivo, os extensômetros podem ser de fio, de lâmina (metal-foil strain gages), de semicondutor (OLIVEIRA, 2002). Pode-se construir extensômetro uni axial, axial múltiplo além de modelos

específicos conformes à sua aplicação. Inicialmente a base do extensômetro era feita de papel, sendo que até hoje alguns fabricantes mantêm em sua linha de produção esse tipo de extensômetro. Com o desenvolvimento da tecnologia de materiais, os extensômetros atualmente são produzidos com vários tipos de materiais de base que são: poliamida, epóxi, fibra de vidro reforçada com resina fenólica, baquelita, poliéster. Cada tipo de material utilizado como base, em combinação com o material utilizado na fabricação da lâmina, faz com que o extensômetro tenha uma aplicação específica para medição dinâmica, medição estática, ou para utilização em alta temperatura e outras. Os fabricantes têm à disposição grande variedade de tamanhos e modelos de extensômetros, permitindo assim a escolha correta para cada caso específico.

2.3.2.2 O extensômetro de fio

O extensômetro de fio é constituído de fio resistivo colado em um suporte, que serve para transmitir as deformações da peça em estudo para o fio, que constitui o elemento sensível, e também tem a finalidade de isolá-lo eletricamente. Inicialmente os extensômetros de fio eram constituídos de fios enrolados em uma bobina achatada (devido à falta de uniformidade dos fios de diâmetros menores de 0,025 mm necessários para se obter extensômetros com alta resistência elétrica e tamanho menor que 6 mm). À medida que se melhorou a tecnologia de fabricação de fios muito finos, foi possível fabricar extensômetros de pequenos tamanhos, com o fio disposto em forma de "zig-zag" em um plano. Atualmente o extensômetro de fio é muito pouco utilizado em comparação com o extensômetro de lâmina.

2.3.2.3 O extensômetro de lâmina (“metal-foil strain gages”)

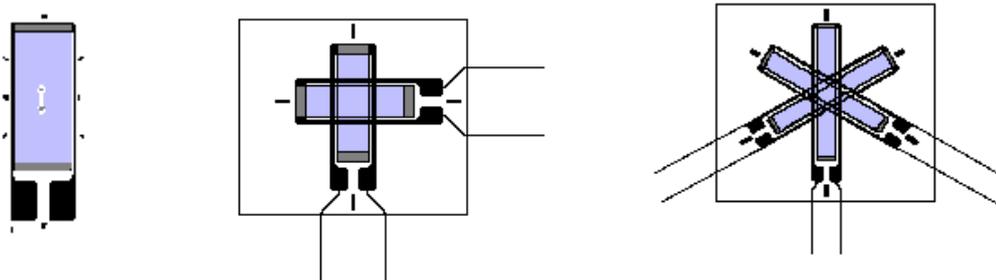
Estes extensômetros, em princípio, são idênticos aos de fio. A diferença básica está no processo de fabricação, em que se usa uma finíssima lâmina de uma liga resistiva (da ordem de 3 a 10 mm) recortada por processo de máscara fotosensitiva corroída com ácido (idêntico ao processo de fabricação de circuito impresso). Atualmente se fabricam extensômetros para as mais variadas finalidades, e com os mais diversos tipos de grades. As vantagens deste tipo de extensômetro sobre o de fio, além da versatilidade de fabricação, é que possui uma área maior de colagem, e em consequência disto, diminui-se a tensão no adesivo, obtendo-se assim deformação lenta e histerese bem menores. Outra vantagem é o da dissipação térmica, bem melhor que nos de fio, possibilitando desta maneira circuitos mais sensíveis, uma vez que o nível de excitação do extensômetro depende da dissipação térmica do mesmo. Estas lâminas são montadas em suporte (base) de epóxi, resina fenólica, poliamida e outros com espessura da ordem de 3,0 a 5,0 mm, tornando-se bastante flexíveis e permitindo assim uma colagem perfeita nas diversas superfícies. As ligas resistivas utilizadas para fabricação de extensômetros são: Constantan, Isoelastic, K-alloy, Karma e outros.

2.3.2.4 O extensômetro de semicondutor:

O extensômetro de semicondutor consiste basicamente de um pequeno e finíssimo filamento de cristal de silício que é geralmente montado em suporte epóxico ou fenólico. As características principais dos extensômetros elétricos de semicondutores são sua grande capacidade de variação de resistência em função da deformação e seu alto valor do fator de extensômetro, que é de aproximadamente 150, podendo ser positivo ou negativo. Para os extensômetros metálicos a maior variação de resistência é devida às variações dimensionais, enquanto que nos de semicondutor é mais atribuído ao efeito piezo-resistivo.

Para um extensômetro ideal, o fator de extensômetro deveria ser uma constante, e de maneira geral os extensômetros metálicos possuem o fator de extensômetro que pode ser considerado como tal. Nos extensômetros semicondutores, entretanto, o fator do extensômetro varia com a deformação, numa relação não linear. Isto dificulta quando da interpretação das leituras desses dispositivos. Entretanto é possível se obter circuitos eletrônicos que linearizem esses efeitos. Atualmente, os extensômetros semicondutores são bastante aplicados quando se deseja uma saída em nível mais alto, como em células de cargas, acelerômetros e outros transdutores.

FIGURA 4 - MODELOS DE EXTENSÔMETROS AXIAL, BIAxIAL E TRIAXIAL (VISHAY INTERTECHNOLOGY, INC.)



A figura 4 apresenta o extensômetro axial único (utilizado quando se conhece a direção do deslocamento), o bi-axial e a roseta de 3 direções (são três extensômetros uni axiais sobre uma mesma base, sensíveis a três direções). É normalmente utilizada quando as direções principais de deformações não são conhecidas.

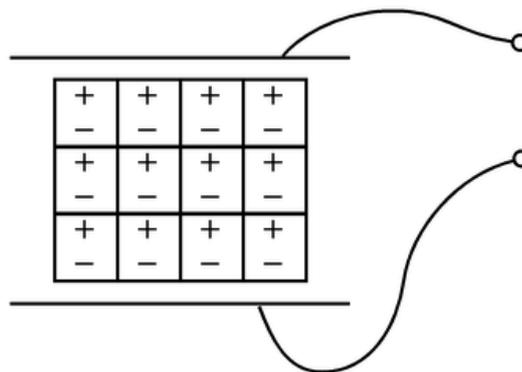
2.3.2.5 O Efeito piezelétrico

O efeito piezelétrico é o efeito onde a energia é convertida entre mecânica e elétrica. Foi descoberto na década de 1880 pelos irmãos Curie. Especificamente quando uma pressão (piezo significa pressão, em grego) é aplicada a um cristal polarizado a deformação mecânica resultante gera uma carga elétrica (figura 5). Os microfones piezo elétricos são um exemplo deste fenômeno. Microfones transformam

a pressão acústica em tensão. Alternativamente quando uma tensão elétrica é aplicada ao cristal polarizado este apresenta uma deformação mecânica que per si pode criar uma pressão acústica. Exemplo disto são os alto-falantes piezo-elétricos.

“Eletrec” (figura 5) são sólidos que possuem polarização elétrica permanente. Em geral, o alinhamento destes dipolos elétricos pode resultar numa carga que pode ser medida na superfície do sólido. Na prática, esta pequena carga é rapidamente dissipada por cargas livres na atmosfera circundante que são atraídas pelas cargas da superfície. Esta disposição é comumente utilizada em microfones.

FIGURA 5 - ESTRUTURA INTERNA DE UM “ELECTREC”
(//CCRMA.STANFORD.EDU/CCRMA/COURSES/252/SENSORS/SENSORS.HTML)



A polarização permanente empregada nos eletrec também é observada nos cristais. Nestas estruturas cada célula tem um dipolo e estas são orientadas de tal forma que os dipolos são alinhados. Novamente, isto resulta num excesso de cargas que atraem cargas da atmosfera circundante, transformando o cristal num corpo eletricamente neutro. Se uma força suficiente for aplicada ao cristal piezelétrico ter-se-á uma deformação. A deformação rompe a orientação dos dipolos elétricos e cria-se uma situação em que a carga não é completamente cancelada. Isto resulta num excesso temporário de cargas superficiais, que subsequente, manifesta-se como uma tensão que é desenvolvida ao longo do cristal.

Com o objetivo de utilizar este princípio para construir um sensor para medir distância, deve-se poder medir a carga superficial do cristal. Duas lâminas metálicas formam um sanduíche em torno do cristal para constituir um capacitor. Como mencionado anteriormente, uma força externa causa uma deformação elástica no cristal que resulta numa carga proporcional à força aplicada. Esta carga resulta numa tensão elétrica

$$V = \frac{Q_f}{C}$$

onde Q_f é a carga resultante da força f , e C é a capacitância do aparato.

Da maneira como foi descrito, o cristal piezelétrico age como transdutor que transforma força, um stress mecânico, em carga elétrica que pode ser convertida em tensão.

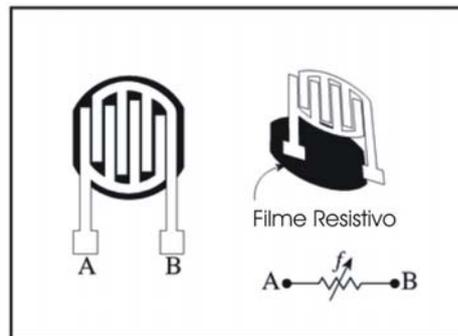
2.3.2.6 Piezoresistores

A mudança na resistência de um material em função do esforço aplicado é chamada de efeito piezo-resistivo. Piezoresistores são relativamente fáceis de fabricar com silício.

2.3.2.7 Sensor resistivo de força

O esquema de um sensor resistivo de força é apresentado na figura 6. Dois filamentos A e B são fixados sobre uma base de material resistivo. Sem carga aplicada os filamentos A e B apresentam uma conexão rígida pelo material da base. A medida que é aplicada uma força sobre o arranjo a resistência da base altera-se modificando a conexão entre os filamentos. Esta alteração é proporcional à carga aplicada e pode ser medida em volts.

FIGURA 6 - ESQUEMA DE UM SENSOR DE RESISTIVO DE FORÇA.
 (//CCRMA.STANFORD.EDU/CCRMA/COURSES/252/SENSORS/SENSORS.HTML)



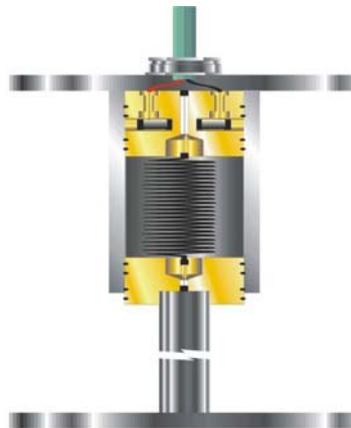
2.3.2.8 Extensômetro de corda vibrante

Os extensômetros de corda vibrante (figura 7 e 8) são instrumentos de grande precisão projetados para medir deformações ou tensões em aço ou estruturas de concreto (muros, pilares, túneis, etc.)

O interior do equipamento (figura 7) contém um fio de aço sob tensão entre as bases de referência, de forma que a estabilidade seja confiável em longo prazo. Todo o sistema é lacrado. Duas bobinas eletromagnéticas, colocadas em ambos os lados do fio, se encarregam da excitação, assim como converter as vibrações subseqüentes em um sinal elétrico de frequência relacionado com o comprimento da corda (fio vibrante) segundo a fórmula $L-L_0=k(F_2-F_{02})$, onde L_0 e F_{02} são respectivamente o comprimento e a frequência natural de vibração antes da tração e L e F_2 são o comprimento e a frequência após a tração e k uma constante.

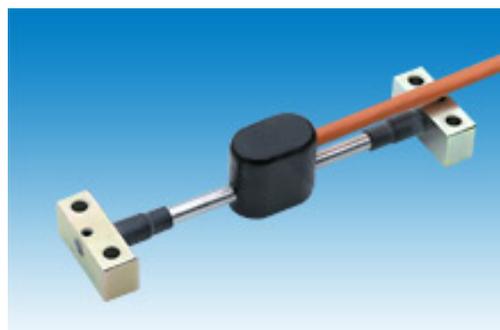
O sistema de medidas é insensível a qualquer alteração produzida na resistência do cabo ou dos contatos. As mudanças de tensão na corda modificam a frequência de vibração. Esta frequência se mede utilizando uma unidade de leitura portátil ou através de um sistema automático de aquisição de dados (WWW.GEOMECHANICS.COM).

FIGURA 7 - ESQUEMA DE UM EXTENSOR DE CORDA VIBRANTE



Para controlar o efeito térmico cada aparato deve ser provido de sensor de temperatura. Os extensômetros de grande base são um caso particular dos extensômetros de corda vibrante e são utilizados principalmente para controle de deformações, controles de juntas, controle de depósitos de materiais soltos (KANE, W. F., and BECK, T. J., 1996a) ou movimentos de fissuras .

FIGURA 8- EXTENSÔMETRO DE CORDA VIBRANTE

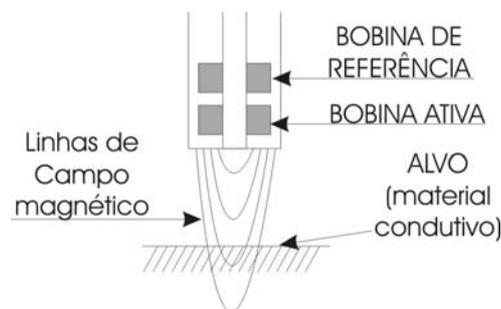


2.3.2.9 Transdutor de corrente de Foucault

O transdutor de corrente Foucault usa o efeito de corrente (circular) de fuga para sentir a proximidade de materiais não magnéticos porém condutores. Este é constituído por duas bobinas: uma ativa (principal) e uma de balanceamento. A bobina ativa sente

a presença de um objeto condutor próximo e a bobina de balanceamento é utilizada para equilibrar o circuito de ponte de saída bem como para compensação de temperatura (figura 9). ([HTTP://JOE.BUCKLEY.NET/PAPERS/EDDYC/ECTEK2.HTM](http://JOE.BUCKLEY.NET/PAPERS/EDDYC/ECTEK2.HTM))

FIGURA 9 - ESQUEMA DO TRANSDUTOR DE CORRENTE DE FOCAULT



Como características típicas deste sensor pode-se citar sua espessura de 2 a 75 mm (diâmetro) e comprimento de 20 a 40 mm com intervalo de aplicação de 0,25 a 30 mm e resolução 0,1 μm . Este equipamento tem a vantagem de possuir alta resolução, alta frequência e trata-se de um sensor que não tem contato com a superfície observada. Seu limite de aplicação é relativamente pequeno e a relação entre a distância e a impedância da bobina primária é não linear e dependente da temperatura, o que é compensado pela bobina de balanceamento. A não linearidade pode ser avaliada por calibração eliminando este inconveniente.

Este sensor funciona com materiais condutivos com espessura suficiente. Não pode ser utilizado em materiais não condutivos ou filmes metalizados. Para resolver o problema pode-se acoplar material condutivo de espessura suficiente ao alvo em estudo. A forma e a condutividade dos materiais do alvo pode afetar a resposta do sensor o que justifica a necessidade de calibração.

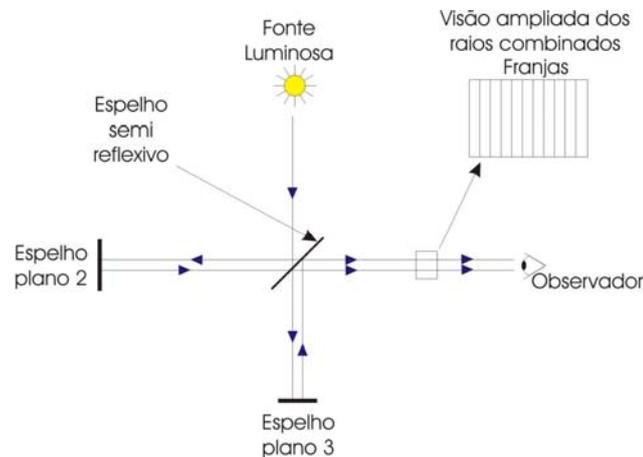
2.3.3 Sensores Óticos

2.3.3.1 Interferômetros

Os interferômetros utilizam-se do princípio de que duas ondas coincidentes em fase amplificam-se reciprocamente enquanto que duas ondas que têm fases opostas cancelam-se reciprocamente. Inicialmente a maioria dos interferômetros utilizava fontes de luz branca. Atualmente os pesquisadores utilizam fontes de luz monocromática, como o laser, além de utilizar a característica dual da luz (onda e matéria) na construção de interferômetros. Um dos primeiros interferômetros de massa foi o interferômetro de elétrons, posteriormente seguido pelo de nêutrons. Aproximadamente em 1990 foi demonstrado o primeiro interferômetro atômico seguido por interferômetros aplicando moléculas. Atualmente não se sabe qual o tamanho máximo das partículas aplicáveis em interferometria. O exemplo mais comum de interferômetro é o do tipo Michelson (ou Michelson-Morley). Basicamente é constituído por uma fonte monocromática (emitindo luz ou ondas de matéria), um detector, dois espelhos e um espelho semitransparente. Estes elementos são dispostos como na figura 10. ([HTTP://REPAIRFAQ.ECE.DREXEL.EDU/SAM/LASERDIO.HTM#DIOINT](http://REPAIRFAQ.ECE.DREXEL.EDU/SAM/LASERDIO.HTM#DIOINT))

Existem dois caminhos percorridos pela energia da fonte ao detector. Um em que a energia reflete no espelho semitransparente atinge o espelho plano 2 e retorna através do espelho semitransparente até o detector. O outro inicialmente transpassa o espelho semitransparente, reflete-se no espelho 3, reflete-se no espelho semitransparente e projeta-se sobre o detector. Se estes dois caminhos diferirem por um número inteiro de comprimento de onda ocorre uma interferência construtiva e um sinal forte no detector. Se diferirem por um número inteiro e meio de comprimentos de ondas ocorre uma interferência destrutiva e, conseqüentemente, um fraco sinal no detector.

FIGURA 10- ESQUEMA DO INTERFERÔMETRO DE MICHELSON-MORLEY



A primeira vista isto parece contradizer o princípio de conservação de energia. Ela é conservada, todavia, porque existe uma redistribuição da energia no detector, onde a energia das posições destrutivas são redistribuídas para locais de energia construtivas. Este processo cria áreas de luminosidade e escuridão representadas por círculos concêntricos claros e escuros (franjas). A separação entre tais círculos é da ordem de 1 comprimento de onda. Se houver a movimentação de um dos espelhos reflexivos de uma unidade desta ordem haverá alternância da coloração das franjas. Alguns sensores são capazes de perceber esta mudança. Para o laser Hélio-Neônio o comprimento de onda é de 632,8 nm, é propagado numa frequência de 40MHz. O sinal portador é modulado pelo movimento da superfície sobre a qual incide e se reflete. A reflexão do sinal é detectada por um fotodiodo e pode ser demodulada na frequência, produzindo um sinal de velocidade, ou utilizando-se técnicas de demodulação de fase, para se obter um sinal de deslocamento. Os interferômetros são instrumentos de grande versatilidade quanto ao número de pontos que são capazes de medir. Sistemas de direcionamento do feixe de Laser permitem a realização de varredura de uma superfície composta de inúmeros pontos de medida de movimento transversal. além de imagiamento com alta precisão de superfícies, como por exemplo, espelhos para telescópios. As figuras 11, 12 e 13 apresentam aplicações do interferômetro para determinação do relevo de superfícies.

FIGURA 11 - POLIMENTO DE ESPELHO PARA TELESCÓPIO COM 8 METROS DE DIÂMETRO (4D TECHNOLOGY CORPORATION)



FIGURA 12 - REPRESENTAÇÃO DA IMAGEM INTERFEROMÉTRICA DA SUPERFÍCIE DO ESPELHO APRESENTADO NA FIGURA 11 (4D TECHNOLOGY CORPORATION)

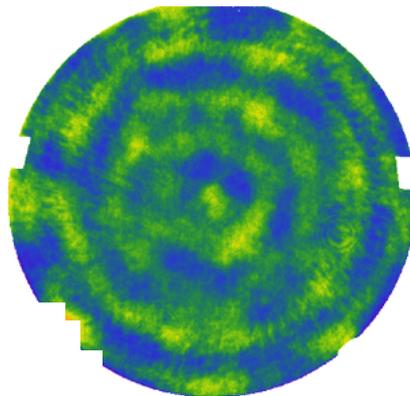
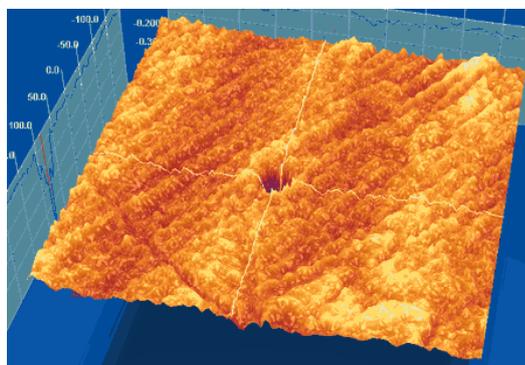


FIGURA 13 - IMAGEM DE UM LEVANTAMENTO INTERFEROMÉTRICO DAS DA SUPERFÍCIE DE UM CD (4D TECHNOLOGY CORPORATION)



O silício é um material reflexivo, como outros materiais usados na fabricação de semicondutores (alumínio, por exemplo). Por esta razão alguns meios podem ser utilizados para avaliar o deslocamento ou deformações em microestruturas e membranas, entre outros itens. O feixe laser é direcionado para a superfície a ser monitorada de tal maneira que as franjas de interferência sejam formadas. Analisando-se tais franjas, o deslocamento e as deformações podem ser detectados e quantificados. Uma área onde freqüentemente isto é aplicado é a da microscopia eletrônica.

Os interferômetros óticos são instrumentos de medida sem contato, o que os torna eficientes na leitura de movimentos de vibração de alta freqüência. Uma desvantagem de tais instrumentos é a necessidade de orientação correta das superfícies de incidência e reflexão da luz, o que dificulta a medida de velocidade de pontos com orientação oblíqua ao plano de medida.

Uma aplicação da interferometria com luz branca é a medida precisa de bases geodésicas de precisão, inventada por Yrjö Väisälä. O caminho da energia é dividido em dois e um deles é padronizado em 1 m, utilizando dois espelhos. O outro se dirige para um espelho a 6 m de distância. Somente se o percurso do segundo caminho for equivalente a exatamente 6 vezes o primeiro percurso as franjas serão visíveis. Utilizando-se um padrão de quartzo de 1 m de comprimento é possível medir distâncias de até 864 m, aplicando-se multiplicações. Estas bases são utilizadas para calibrar equipamentos para medidas de distâncias. Aplicações modernas da interferometria laser estão na calibração das divisões de miras aplicadas em nivelamentos e na monitoração da queda livre de esferas ou prismas reflexivos em gravímetros absolutos, permitindo a determinação da aceleração da gravidade.

2.3.3.2 Fibra ótica

O sensor de fibra ótica, ou sensor fotônico, é um sensor de deslocamento que possui dois grupos de fibras óticas: um conectado à fonte de luz e denominado de fibras transmissoras e outro conectado a foto detectores (fotodiodo) e conhecido como fibras receptoras. Os dois conjuntos estão agrupados em um único conjunto (figuras 14 e 15).

Considerando a figura 15 (vista em corte lateral do dispositivo), a luz gerada na fonte é canalizada através das fibras transmissoras até a cabeça do sensor. A luz então viaja até a superfície do alvo e parte dela é refletida. Uma porção da luz refletida é coletada pelas fibras receptoras e transmitida aos foto-sensores onde sua intensidade é medida. A intensidade da luz refletida é dependente da distância entre a cabeça sensora e a superfície alvo.

FIGURA 14 – PADRÕES COMUMENTE USADOS COM FIBRAS ÓTICAS (VISTA DE TOPO)

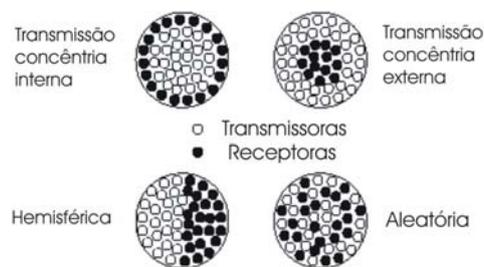
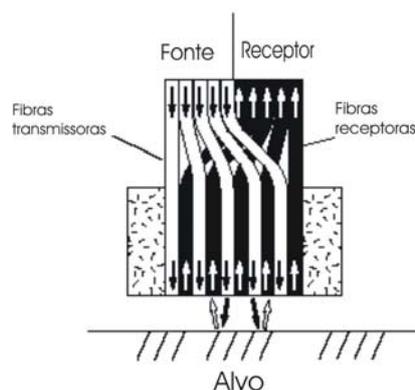


FIGURA 15 - PADRÕES COMUMENTE USADOS COM FIBRAS ÓTICAS (VISTA LATERAL)



2.3.3.3 Vídeo extensômetros

O princípio de medida está baseado na digitalização da imagem do corpo de provas no qual pontos de apoio são afixados. A câmara capta imagens a intervalos regulares e a variação da separação de marcas de referência medida em pixel é avaliada continuamente (WWW.GALDABINI.IT). A imagem da câmara pode ser, por exemplo, de 795x596 pixels. Dependendo da escala em que a foto é tomada obtém-se a resolução de detecção da variação. O processamento pode ser em tempo real desde que o sistema consiga identificar os alvos utilizados. Este sistema permite alta resolução, pode ser multidimensional e não há contato entre o equipamento de medição e o objeto observado. Pode medir compressão, tração e flexão.

2.4 EXTENSÔMETRO DE FIO OU FITA

Os extensômetros de fita (figura 16) são utilizados para detectar e monitorar mudanças em distâncias entre pontos de referência. Aplicações típicas são a monitoração da convergência de paredes em túneis, deformações em aberturas subterrâneas e monitoração de estruturas de contenção, pontes e outras estruturas (HTTP:// SLOPE INDICATOR.COM). Pontos de controle são instalados de forma permanente na estrutura e a extremidade da fita é presa a um dos pontos. O corpo do instrumento é fixado ao outro ponto e a fita é tracionada utilizando a manivela do dispositivo até que duas marcas coincidam. O operador anota as leituras da fita e do display digital. A soma das leituras corresponde à distância medida. A repetição das leituras a intervalos regulares permite a observação do comportamento da estrutura.

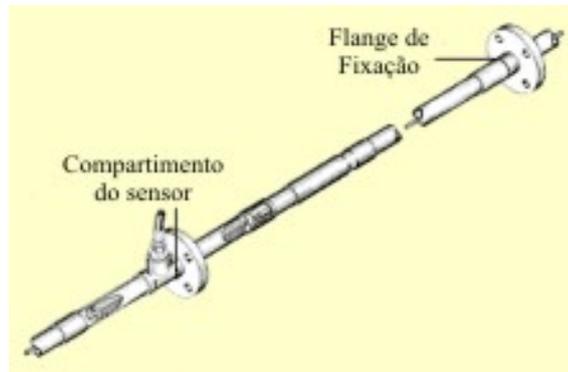
FIGURA 16 - EXTENSÔMETRO DE FITA E PAINEL COMPLEMENTAR PARA LEITURAS (SLOPE INDICATOR INC.)



2.5 MEDIDOR DE DESLOCAMENTOS (“STRAINMETER”)

O medidor de tração (figura 17) emprega, basicamente, um potenciômetro (transdutor) conectado a uma roda montada entre duas âncoras para monitorar o movimento do solo. Estes componentes estão conectados de forma que o movimento de uma âncora em relação à outra causa uma mudança na saída do potenciômetro. A leitura inicial é tomada como datum. As leituras subseqüentes são comparadas à leitura datum para calcular a magnitude, velocidade e aceleração do movimento. Estes equipamentos são usualmente instalados em série ao longo do eixo de deslocamentoprevisto. Podem ser arranjados em grupos com diferentes alinhamentos. Aplicações típicas deste equipamento são a monitoração de aterros bem como tensão de rompimento de estruturas terrestres.

FIGURA 17 - EXEMPLO DE “STRAINMETER”
(SLOPE INDICATOR INC.)



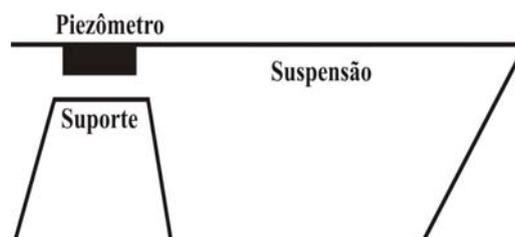
2.6 ACELERÔMETROS

Acelerômetros são sensores destinados, basicamente, para a percepção de variações de velocidade.

2.6.1 Acelerômetros Piezo-resistivos

Sensores microscópicos de aceleração, os acelerômetros, basicamente, consistem de uma massa presa por uma mola (figura 18). À medida que o artefato é acelerado, uma força (força = massa x aceleração) é desenvolvida e afeta a mola sustentadora. Resistores piezelétricos situados no artefato, onde a massa encontra o suporte (local onde o esforço é maior) podem ser usados para detectar a aceleração.

FIGURA 18 - ESQUEMA DE UM ACELERÔMETRO
PIEZO RESISTIVO



2.6.2 Sensores Capacitivos

Capacitores são componentes elétricos que armazenam carga. Um capacitor simples é formado dispondo-se duas placas paralelamente uma à outra. A capacitância deste componente é dada por $C = k/x_0$, onde k é uma propriedade do material ($k=eA$) e das placas e x_0 a distância entre elas. Pode-se escrever:

$$C = \frac{eA}{x_0}$$

onde A é a área da placas e e é uma constante dependente do material entre as placas (desde que as dimensões das placas sejam maiores que as distâncias entre elas, de maneira que os limites das placas possam ser desconsiderados). Para o ar e é aproximadamente $8,9 \cdot 10^{12}$ F/m. Pode-se observar que a capacitância é inversamente proporcional à distância entre as placas. É possível utilizar esta técnica para medir pequenos deslocamentos (microns e décimos de micra) com alta precisão (sub nanômetro) todavia a instrumentação requerida para medir a variação da capacitância é eletronicamente complexa.

2.6.3 MEMS- Sistemas Micro Eletro Mecânicos

Sistema micro eletro mecânico (MEMS) é uma tecnologia que combina componentes computacionais, com mecânica microscópica (figuras 19 e 20) tais como sensores, válvulas, rodas dentadas, espelhos e atuadores incorporados em chips semicondutores.

FIGURA 19 - UM FIO DE CABELO HUMANO E UM MOTOR DE SILÍCIO JUNTOS.
(BERKELEY SENSOR & ACTUATOR CENTER)

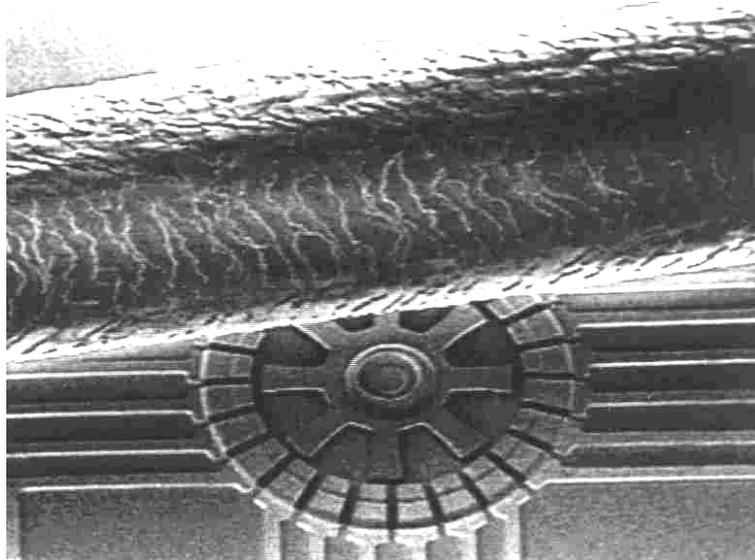


FIGURA 20 - FOTO MICROSCÓPICA DE UM DISPOSITIVO MEMS
([HTTP://MEMS.SANDIA.GOV/SCRIPTS/IMAGES.ASP](http://MEMS.SANDIA.GOV/SCRIPTS/IMAGES.ASP))



Dispositivos MEMS são tipicamente construídos sobre um substrato (chip) e podem conter também a eletrônica para interagir com o dispositivo MEMS. Devido à pequena dimensão e massa, os componentes MEMS podem ser acionados eletrostaticamente (efeitos bimetálicos e/ou piezelétrico também podem ser usados).

Os componentes MEMS podem ser observados capacitivamente. Por esta razão os incluem suprimento de energia, comparadores de carga capacitiva, e circuito

condicionador de sinal. A conexão com o mundo exterior se dá via pacotes de circuitos integrados.

2.6.4 Acelerômetros MEMS

Os acelerômetros estão entre os primeiros produtos desenvolvidos no âmbito dos micro-sistemas. Particularmente para aplicações industriais fabricando robôs, sensores inerciais originalmente desenvolvidos para a aviação (acelerômetros e giroscópios) são mais adequados devido à robustez, estabilidade e pequeno tamanho. Diversas tecnologias principais competem para abranger a maioria das aplicações que requerem acelerômetros.

Acelerômetros piezo-elétricos e piezo-resistivos não oferecem resposta de carga estática mas são adequados para a maioria das aplicações gerais e para medições de alto impacto. Eles geram uma carga elétrica (piezoelétrica) ou uma alteração de resistência (piezo-resistiva) em resposta à tensão. Os acelerômetros capacitivos micromecânicos oferecem uma resposta de carga estática real e podem ser altamente precisos e sensíveis. Eles funcionam bem com aplicações que requerem integração matemática para obter dados da velocidade e posição do composto. Os acelerômetros estão sendo cada vez mais atraídos para mercados diferentes do automotivo e da aviação, onde podem ser usados para medir a inércia. Eles também medem indiretamente a inclinação, o que é usado principalmente em transportes, perfuração, telemetria, direcionamento de cegos ou outras aplicações médicas e vibração ou choques - usados principalmente em medições sísmicas, registrador de dados, segurança de mercadorias ou monitoramento do estado das máquinas. Na indústria, os acelerômetros têm sido usados para medição e monitoramento de vibrações, permitindo a manutenção preventiva melhor e prevenindo, conseqüentemente, falhas maiores de sistemas complexos. De um modo geral, ainda estão sendo utilizados sensores piezo-resistivos para essa finalidade, mesmo que os acelerômetros MEMS

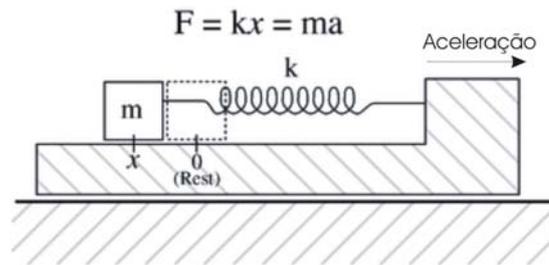
capacitivos tenham conseguido substituí-los em algumas aplicações. Na indústria agrícola, as oportunidades estão se abrindo para veículos guiados automaticamente - eles irão precisar de sensores inerciais combinados com sistemas GPS.

Existe uma gama enorme de acelerômetros. Além das dimensões e do peso, a escolha dos acelerômetros adequados a um implemento recai sobre sua sensibilidade. Atualmente utiliza-se como unidade de sensibilidade o g , a aceleração da gravidade enquanto as medidas tem como unidade Volt/ g ou Colomb/ g . Os acelerômetros mais sensíveis disponíveis no mercado têm a sensibilidade da ordem de 0,0017 g , embora a grande maioria situe-se acima de 2 g . Outro elemento a ser considerado é o limite de resistência ou seja, até quantos g poderá ser utilizado. Existem alguns modelos que aceitam até 10.000 g . Existem diversas possibilidades no âmbito dos acelerômetros. Pode-se adquirir exclusivamente o acelerômetro em si (apenas o sensor) como também o conjunto acelerômetro-processador do sinal, ou seja, o circuito eletrônico complementar para converter os sinais capacitivos em velocidade, distância e inclinação. É importante lembrar que apenas este material não basta. Um sistema complementar deve ser adicionado para se obter resultados práticos o que, por sua vez pode tornar o produto final algo de custo extremamente elevado. Equivale a dizer da compra de um cinescópio a custo baixo, por exemplo. Por si só não é suficiente para ter-se uma televisão pois necessita-se de um enorme conjunto de componentes complementares.

Os acelerômetros têm uma enorme possibilidade de aplicações. Podem ser utilizados para observação de vibrações em veículos, máquinas, prédios, sistemas de controles de processos e segurança de instalações. Podem ser utilizados também para observar atividades sísmicas, inclinação, distâncias e velocidades. O ambiente pode ou não estar sujeito a força da gravidade. Estes equipamentos podem ser uni, bi ou tri axial. Além de possuírem diversas frequências de observação possuem uma enorme banda de variação da sensibilidade e resistência.

O princípio básico de um acelerômetro é o de um sistema massa-mola (figura 21). Este sistema (dentro do âmbito de deformação linear) é governado pelo princípio físico conhecido por Lei de Hooke.

Figura 21 - Lei de Hooke



Esta lei refere-se ao fato de que a deformação sofrida por um corpo material é linearmente relacionada à força causadora da deformação. Estes materiais, para os quais a Lei de Hooke é uma aproximação aplicável, são conhecidos como materiais elásticos lineares. Para sistemas que obedecem a esta lei a deformação produzida é proporcional à força aplicada. Ou seja,

$$F = kx,$$

onde k é a constante de proporcionalidade entre o deslocamento (x) e a força (F).

Outro princípio físico importante é o da segunda lei de Newton onde a força resultante é dada por $F = ma$. Se este sistema experimenta uma aceleração então, por esta lei, haverá uma força resultante igual a $m.a$. Esta força causará uma compressão ou distensão submetida à lei $F = ma = kx$. Apresentada de outra forma tem-se

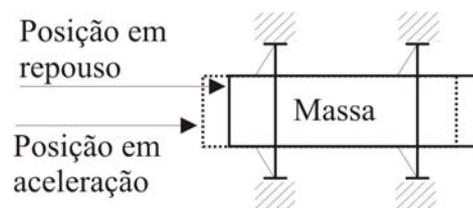
$$\frac{a}{x} = \frac{k}{m}$$

Como k e m são constantes a razão aceleração-deformação também o será. Isto quer dizer que dobrando-se o deslocamento x , por exemplo, dobra-se-á a aceleração, o que indica que a aceleração e o deslocamento são diretamente proporcionais.

Visto desta maneira, transforma-se o problema de medir aceleração em medição de deslocamento da massa conectada à mola. Este sistema somente responde a acelerações ao longo do eixo da mola. É chamado de acelerômetro uni direcional. Com o objetivo de medir múltiplos eixos de aceleração o sistema poderá ser duplicado ao longo de cada eixo desejado.

Um exemplo de acelerômetro que obedece ao esquema de Hooke é o ADXL50 (que já se encontra fora de produção mas apresenta configuração de simples entendimento) cujo sistema mola-massa é esquematicamente apresentado na figura 22. A massa é uma barra de silício e a mola é constituída de 4 braços cada um preso a uma extremidade da massa.

FIGURA 22 - SISTEMA MASSA-MOLA UTILIZADO PELO ACELERÔMETRO ADXL50 (<http://ccrma.stanford.edu/CCRMA/Courses/252/sensors/node9.html>)



A avaliação do deslocamento da massa é feita utilizando o sistema capacitivo através de uma construção similar à apresentada na figuras 23 e 24. A parte central é a massa e, presos a ela, existem lamínulas que se projetam entre lâminas a partir das quais de obtém as capacitâncias. Este conjunto está apoiado em um substrato de silício. Este acelerômetro, especificamente, já tem incorporado o sistema de condicionamento de sinal, de fornecimento de energia além do sensor propriamente dito.

FIGURA 23 - VISTA ESQUEMÁTICA DO SISTEMA CAPACITIVO DO ADXL50 (WWW.ANALOG.COM)

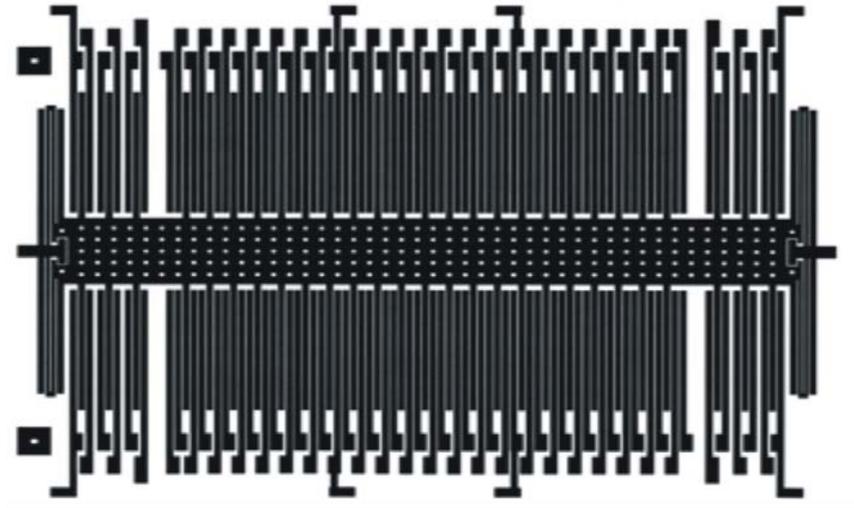


FIGURA 24 - FOTO DO INTERIOR DO CHIP DO ACELERÔMETRO ADXL50
(WWW.ANALOG.COM)

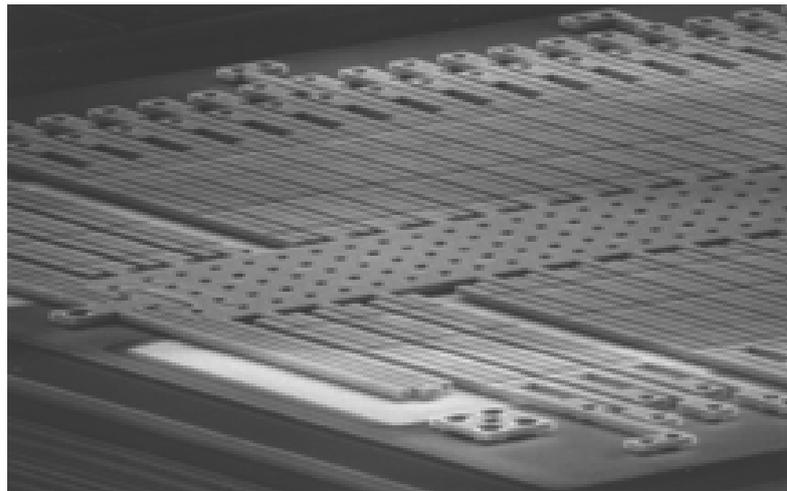
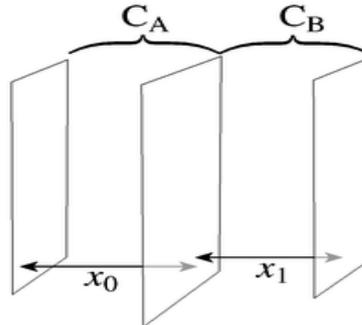


FIGURA 25 - SISTEMA DE CAPACITORES DUPLOS (UTILIZADOS PARA MEDIR O DESLOCAMENTO DA MASSA NO ACELERÔMETRO ADXL50)



Este acelerômetro ao invés de usar um capacitor simples adotou um capacitor duplo (figura 25). Desta forma se o sensor estiver em repouso as capacitâncias em relação a ambos os capacitores terão valores dados por:

$$C_B = \frac{k}{(x_0 - x)}$$

Com a movimentação da massa uma capacitância aumentará com a aproximação a uma das placas e diminuirá em relação à outra devido ao distanciamento simultâneo. Este acelerômetro mede a diferença entre as capacitâncias, ou seja:

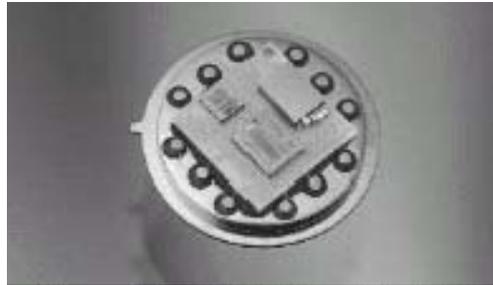
$$\Delta C = C_A - C_B = C_{x_0} \left[\frac{1}{x_0 + x} - \frac{1}{x_0 - x} \right] = \frac{-2x}{x_0^2 - x^2}$$

Para pequenas distâncias a fórmula pode ser simplificada para:

$$\Delta C \approx \frac{-2}{x_0^2}$$

A diferença entre capacitâncias é inversamente proporcional ao quadrado da distância. Um processo integrativo pode fornecer a velocidade e o deslocamento. Disto é que se valem alguns sistemas inerciais que permitem o cálculo da posição.

FIGURA 26 - ACELERÔMETRO COMPLETO COM O SENSOR MEMS E OS COMPONENTES ELETRÔNICOS ASSOCIADOS ANTES DO ENCAPSULAMENTO (WWW.ANALOG.COM)



Como pode ser observado nos dados a seguir, as dimensões destes componentes são muito pequenas: massa de prova de $0,1\mu\text{g}$, capacitância em cada lado do capacitor diferencial $10,1\text{pF}$, a menor variação de capacitância detectável é de 10^{-18} F , variação total de capacitância para toda a escala é de 10 fentoFahrad, espaço entre as placas do capacitor é de $1,3\mu\text{m}$, menor deslocamento detectável da massa de prova é de $0,2\text{Å}$ (um décimo de um diâmetro atômico), distância entre a massa de prova suspensa e o substrato é de $1,6\mu\text{m}$, frequência de ressonância é de 10 a 22kHz. As principais indústrias do Japão já introduziram técnicas que combina acelerômetros e giroscópios no mesmo pacote e as indústrias européias já começaram a se envolver também nessa nova aplicação.

2.7 INCLINÔMETROS

Outra classe de equipamentos destinada à monitoração de estruturas é a dos inclinômetros. Utilizando-se de princípios como os apresentados anteriormente, destina-se à observação, direta ou indireta, da variação de ângulos verticais. Basicamente existem dois métodos: determinação relativa a partir de uma leitura inicial ou determinação absoluta utilizando a gravidade como elemento de referência.

Este tipo de equipamento tem sido fonte de interesse desde longo tempo. A título ilustrativo é apresentada a réplica do inclinômetro construído por Leonardo Da Vinci (figuras 27 e 28), provavelmente entre 1483 e 1486. Este equipamento foi utilizado para controlar a posição do ar nas máquinas voadoras imaginadas por ele. Para a máquina atingir a posição horizontal indispensável para certas condições de vôo, a pequena esfera no interior da cúpula de vidro deveria permanecer exatamente no centro do vidro.

FIGURA 27 - INCLINÔMETRO DE DA VINCI (RECONSTITUÍDO A) PARTIR DE PROJETO ORIGINAL – FIGURA 29)

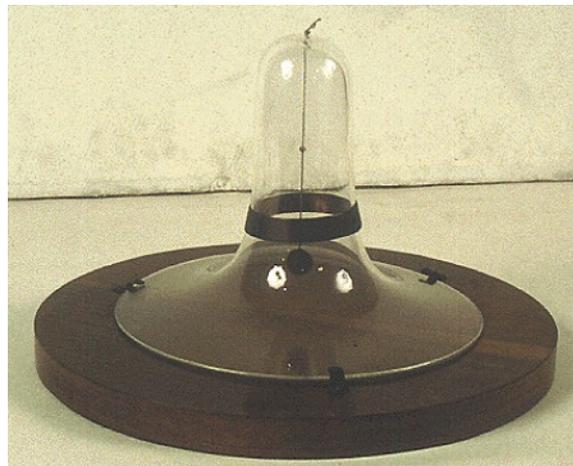
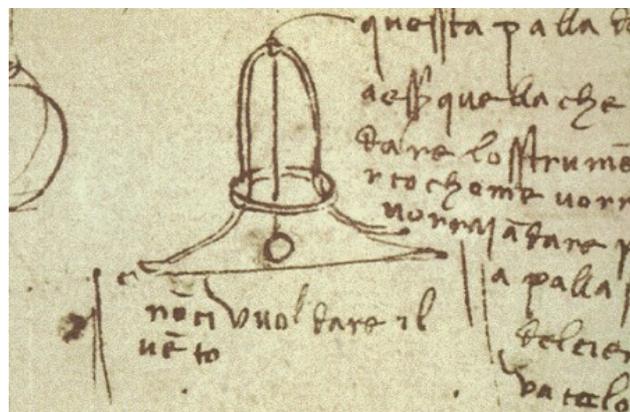


FIGURA 28 - PROJETO ORIGINAL DE INCLINÔMETRO DE DA VINCI



Os inclinômetros têm diversos princípios de funcionamento: pêndulos, (que referenciam a variação angular à vertical do local), esferas (figura 29), líquidos (níveis tubulares com substâncias eletrolíticas, que permitem a avaliação da inclinação baseando-se na medição da voltagem de saída do sistema, figura 30), medição angular direta, entre outros. Podem ser uni ou bidirecionais. Suas precisões são variáveis atingindo $0,001^\circ$.

Usualmente, embora de maneira não formal, há uma prática de denominar de maneiras diferentes os inclinômetros segundo sua aplicação. Podem receber a denominação de inclinômetros, clinômetros, tiltímetros. O termo inclinômetro é empregado com mais frequência no âmbito de obras da construção civil, embora quando se trata de embarcações este nome também seja largamente utilizado. Por este motivo deve-se tomar cuidado com pesquisa de preços pois os equipamentos mais baratos podem ser destinados a aplicação em medicina ou barcos, por exemplo, apesar de receberem a mesma denominação. O termo tiltímetro aplica-se mais a área geológica e geomecânica. A área espacial adota inclinômetro como a palavra mais adequada. Mesmo em inglês existem diversas denominações comuns como “inclinometer”, “clinometer”, “tilt meter”, “tilt indicator”, “slope meter”, “slope gauge”, “gradient meter”, “gradiometer”, “level gauge”, “level meter”, “pitch & roll indicator”.

FIGURA 29 - INCLINÔMETRO DE ESFERA (RIEKER INC. FOLCROFT, PENNSYLVANIA, USA)



FIGURA 30 - MODELOS DE INCLINÔMETRO E
SENSORES ELETROLÍTICOS
(RIEKER INC. FOLCROFT,
PENNSYLVANIA,USA)



FIGURA 31 - SENSOR ELETROLÍTICO MONTADO EM
CIRCUITO CONDICIONADOR DE SINAL



Como se pode verificar, através da revisão bibliográfica, os princípios utilizados são inúmeros. Vão desde o efeito gravitacional até o efeito eletromagnético, passando por fenômenos óticos, mecânicos, elásticos e outros. Um lugar comum nos equipamentos disponíveis são o custo elevado, a pouca disponibilidade, dificuldade de manutenção, limitação na aplicação quanto à amplitude de movimento observado. Nos capítulos seguintes serão apresentados os estudos desenvolvidos visando a construção de um inclinômetro relativo que se utiliza do efeito da força gravitacional sobre o fiel.

Se considerarmos a conceituação de KUANG (1984) apud CHAVES (1994, p.38), o equipamento a ser construído encaixa-se na categoria de levantamentos não geodésicos, estaria incluído na de levantamentos geotécnicos. Para KAHMEN; FAIG (1994, p.565) no entanto, estamos diante de um método físico (“plumb line”)

adequado para determinação de movimentos relativos. Segundo DEPARTMENT OF ARMY (1994, p.9.9) estaríamos elaborando medidas geotécnicas e estruturais. Na realidade o equipamento é um híbrido que atende às duas conceituações existentes de levantamentos geodésicos e geotécnicos. Se considerarmos as variações observadas entre sensores colocados na estrutura estaremos efetuando medidas geotécnicas. Se, no entanto, avaliarmos as variações entre sensor instalado na estrutura e sensor igual instalado em ponto de referência externo é possível efetuar uma avaliação absoluta das variações, o que enquadra o equipamento no modo geodésico.

3 O INCLINÔMETRO FOTO MECÂNICO

3.1 RELEVÂNCIA DO PROJETO

Este trabalho está diretamente ligado ao monitoramento de estruturas de engenharia civil, cuja finalidade é a observação de seu comportamento em uso ao longo do tempo, valendo-se de diversos métodos de observação, sejam eles geodésicos ou não (segundo as diferentes conceituações existentes), que utilizam equipamentos para mensurações empregando diferentes princípios de funcionamento.

Inicialmente o equipamento aqui apresentado foi criado objetivando o emprego no monitoramento de barragens, porém sua aplicação poderá ser estendida a outras áreas, o que faz com que, além da precisão pretendida, a possibilidade de comunicação remota ser um fator extremamente importante.

Os dispositivos para avaliação de movimentos em estruturas têm características que são conflitantes entre si, quando se deseja o atendimento simultâneo a três condições: baixo valor de investimento, grande amplitude do movimento a ser observado e alta resolução.

A maioria dos equipamentos disponíveis é adequada para movimentações de pequena amplitude tais como 0,5-30mm (como os “strain gage”, LVDT, interferômetros) e, freqüentemente, têm elevado custo para os acessórios destinados à decodificação dos sinais produzidos pelos sensores. Os equipamentos que possuem aplicação em grandes amplitudes de movimento, por sua vez, têm resolução menor. Os equipamentos adequados a grandes amplitudes e alta precisão têm custo elevado. Convém salientar ainda que, embora os sensores por si só possam ter baixo custo, os elementos periféricos para condicionamento dos sinais por eles gerados podem atingir altas cifras.

Com o evento da tecnologia MEMS (Sistemas Micro Eletro Mecânicos), o preço de sensores como acelerômetros, por exemplo, tiveram uma baixa acentuada, mas sua sensibilidade para fins de monitoração estrutural atinge a resolução na ordem do décimo do grau e, nos mais precisos do mercado, atingem aproximadamente um milésimo do grau sexagesimal (2" a 4") ficando, porém, reféns da relação sensibilidade/ruído, sejam eles capacitivos ou resistivos (fato observado a partir de consultas a fabricantes).

A produção de equipamentos baratos e confiáveis tem o potencial de torná-los instrumentos comuns e de uso freqüente, o que daria maior segurança na monitoração de estruturas e, por consequência, na preservação de vidas.

A monitoração remota apresenta uma vertente interessante na medida que possui custo significativamente menor quando comparado aos procedimentos geodésicos convencionais, onde se faz necessária a presença de equipe de campo. Evidentemente o uso de estações robotizadas, por exemplo, podem dispensar o uso de tais equipes mas, a estação total em si apresenta elevado custo.

O banco de dados gerado por sensores remotos e de atuação contínua permite avaliação em tempo real das estruturas além de permitir o manuseio de dados em épocas e períodos diferentes, de acordo com a vontade do usuário, não mais se limitando a observações supostamente “instantâneas” e com grandes intervalos de tempo entre elas.

Dado o baixo custo e alta precisão, a possibilidade de uso de diversos sensores em uma mesma estrutura permite a análise de partes específicas que a compõem, ao invés de entendê-la como corpo único rígido, além da verificação da sua vida útil em condições reais de carga e vibrações por ela experimentada.

Este trabalho apresenta os resultados das atividades desenvolvidas para projetar, construir, desenvolver e avaliar um inclinômetro que pode atingir alta resolução (ou pelo menos próximas às melhores disponíveis, da ordem de 2”), que é aplicável para movimentos de grande amplitude, que possui custo compatível com a realidade brasileira e que apresenta a possibilidade de coleta remota contínua de dados, além da utilização de materiais facilmente encontráveis no mercado.

3.2 MÉTODOS A SEREM EMPREGADOS

3.2.1 Para Construção do Protótipo

O projeto para construção do protótipo estará baseado na estimativa de aplicação do equipamento. Considerando as precisões envolvidas em processos geodésicos para controle de estruturas bem como as resoluções dos equipamentos empregados em tais operações, estima-se a precisão necessária para que o equipamento seja compatível com aquele tipo de prática.

Embora algumas normas (construção civil, por exemplo) admitam oscilações estruturais de 1:1700 mm (sem conclusão da alvenaria) os processos geodésicos exigem precisões melhores, na casa de 1 a $4\text{mm}\cdot\text{K}^{1/2}$ (é o caso de nivelamento geométrico com visadas iguais, onde K é a distância média nivelada em quilômetros). O IBGE recomenda valores menores que $3\text{mm}\cdot\text{K}^{1/2}$ por seção e menores que $4\text{mm}\cdot\text{K}^{1/2}$ por linha enquanto o IAG recomenda $1\text{mm}\cdot\text{K}^{1/2}$. Os métodos que envolvem comparação de coordenadas obtidas em épocas diferentes apresentam precisão inferior, visto que as melhores estações totais atualmente no mercado têm medidas de distância com precisão de $1\text{mm}+1\text{ppm}$. Além disto, a precisão possível nas medidas angulares também adiciona uma degeneração na determinação de coordenadas.

Tendo-se estes fatores em mente adotar-se-á como objetivo atingir a resolução de 1:100000, ou seja, pretende-se conseguir a emissão de um pulso para cada milímetro de variação angular vertical a 100 m de distância.

3.2.2 Para Avaliação do Equipamento

A verificação da precisão atingida com o equipamento será feita mediante a comparação de valores efetivamente observados pelo equipamento com valores conhecidos previamente introduzidos na inclinação. Para introdução dos valores utilizar-se-á o interferômetro existente no LAIG – Laboratório de Instrumentação Geodésica da Universidade Federal do Paraná. Este equipamento, utilizado para calibrar miras de invar para nivelamento geométrico de precisão, permite leitura de distâncias com precisão de 9 casas decimais do mm, o que ultrapassa o limite necessário 0,005 mm (valor variável de acordo com o modelo de inclinômetro e forma de utilização).

Após análises de princípios físicos passíveis de uso, materiais disponíveis, modelos diversos, forças atuantes, e resolução do sensor ótico a ser empregado concluiu-se pela construção de um inclinômetro cujo esquema geral de funcionamento é o apresentado abaixo.

4 ANÁLISES PRELIMINARES PARA PROJETO DO PROTÓTIPO

4.1 RELATIVAS A ALAVANCA PRINCIPAL

O protótipo em desenvolvimento (veja esquema de funcionamento na figura 38, pg. 95) tem como fiel o vetor gravidade, representado mecanicamente pela estrutura de um pêndulo. Este pêndulo será o responsável pela movimentação da alavanca secundária sobre a qual se fazem as medições de deslocamentos. Denominar-se-á este pêndulo de alavanca principal, uma vez que poderá ser utilizado como tal bastando deslocar a conexão entre ele e a alavanca secundária, com o intuito de ampliar a força por ele produzida.

A tabela 1 apresenta uma análise do comportamento das forças tangencial e horizontal produzidas pela interação da massa afixada na extremidade do pêndulo com a aceleração da gravidade. Admitir-se-á, apenas para efeito de estudo, que toda a massa do sistema pendular (lastro e haste do pêndulo) encontra-se em sua extremidade livre.

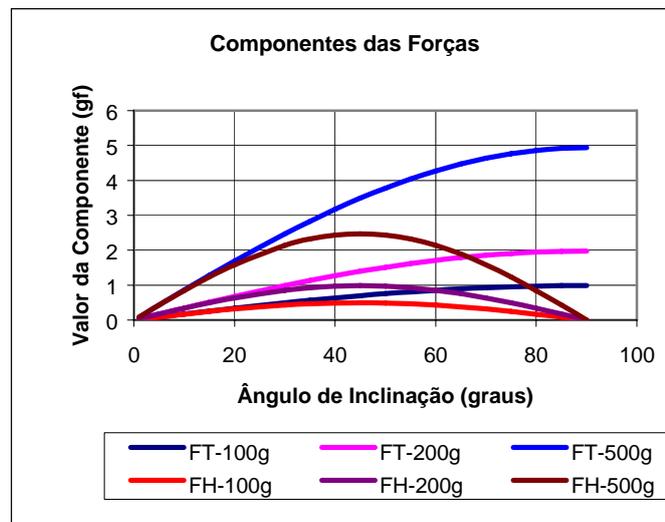
Observando o conteúdo da tabela 1, pode-se constatar que a força tangencial $F_t = m g \sin(\theta)$, onde m é a massa do lastro, g é a aceleração da gravidade e θ o ângulo de inclinação em relação à vertical, atinge seu valor máximo quando o ângulo de inclinação do pêndulo, em relação à sua posição de repouso, é de 90° . A força horizontal $F_h = m g \sin(\theta) \cos(\theta)$, no entanto, atinge seu valor máximo quando aquela inclinação é de 45° . A unidade das forças nesta tabela é gf, grama força. Para cada uma das componentes foram analisados lastros com massa de 100, 200 e 500 g.

TABELA 1 - ANÁLISE DE FORÇAS DA ALAVANCA PRINCIPAL (PÊNDULO)

Abertura		F _t - componente Tangencial			F _h - componente Horizontal		
Ângulo (graus)	Ângulo (rad)	Lastro			Lastro		
		100g	200g	500g	100g	200g	500g
1	0,017453	0,0172	0,0345	0,0861	0,0172	0,0344	0,0861
5	0,087266	0,0860	0,1720	0,4301	0,0857	0,1714	0,4285
10	0,174533	0,1714	0,3428	0,8570	0,1688	0,3376	0,8439
15	0,261799	0,2555	0,5109	1,2773	0,2467	0,4935	1,2337
20	0,349066	0,3376	0,6751	1,6879	0,3172	0,6344	1,5861
30	0,523599	0,4935	0,9870	2,4675	0,4274	0,8548	2,1369
35	0,610865	0,5661	1,1322	2,8306	0,4637	0,9275	2,3187
40	0,698132	0,6344	1,2689	3,1722	0,4860	0,9720	2,4300
45	0,785398	0,6979	1,3958	3,4896	0,4935	0,9870	2,4675
50	0,872665	0,7561	1,5122	3,7804	0,4860	0,9720	2,4300
55	0,959931	0,8085	1,6170	4,0425	0,4637	0,9275	2,3187
60	1,047198	0,8548	1,7095	4,2738	0,4274	0,8548	2,1369
65	1,134464	0,8945	1,7891	4,4726	0,3780	0,7561	1,8902
70	1,221730	0,9275	1,8550	4,6374	0,3172	0,6344	1,5861
75	1,308997	0,9534	1,9067	4,7668	0,2468	0,4935	1,2338
80	1,396263	0,9720	1,9440	4,8600	0,1688	0,3376	0,8439
85	1,483530	0,9832	1,9665	4,9162	0,0857	0,1714	0,4285
90	1,570796	0,9870	1,9740	4,9350	0,0000	0,0000	0,0000

A representação gráfica (gráfico 1) dos valores de tais componentes, para diversos valores do lastro, enfatiza o comportamento diferente de tais forças.

GRÁFICO 1 - COMPONENTES TANGENCIAL E HORIZONTAL DAS FORÇAS



Para ângulos pequenos a magnitude de tais forças é muito pequena, os que deixa num limiar crítico para a decisão das dimensões da alavanca secundária, devido ao seu peso e à necessidade de ampliação do movimento experimentado pela alavanca principal (para deslocamento de 1m em 100m de distância o deslocamento da alavanca secundária corresponde a 10 mm em 1m, que equivale a um ângulo $0,572\ 938\ 698^\circ$, ou seja, 34,377 minutos de arco). Considerando-se as normas da construção civil neste aspecto, um prédio de 100m de altura poderá ter até 59,82 mm de movimentação o que levaria a ângulos de $0,033\ 703\ 396^\circ$, ou seja 121,332", aproximadamente o limite de 2 minutos de arco. Observe na tabela 2 que as componentes tangencial e horizontal não ultrapassam 3mg para este valor de inclinação. Diante disso, surgem três soluções possíveis: aumentar o lastro, transformar o pêndulo em alavanca para aumentar a força, diminuir a massa da alavanca secundária.

TABELA 2 - ANÁLISE DE FORÇAS DA ALAVANCA PRINCIPAL PARA PEQUENOS ÂNGULOS (gf)

Abertura		Componente Tangencial			Componente Horizontal		
Ângulo (minutos)	Ângulo (rad)	Lastro			Lastro		
		100g	200g	500g	100g	200g	500g
1	0,000291	0,0003	0,0006	0,0014	0,0003	0,0006	0,0014
2	0,000582	0,0006	0,0011	0,0029	0,0006	0,0011	0,0029
3	0,000873	0,0009	0,0017	0,0043	0,0009	0,0017	0,0043
4	0,001164	0,0011	0,0023	0,0057	0,0011	0,0023	0,0057
5	0,001454	0,0014	0,0029	0,0072	0,0014	0,0029	0,0072
6	0,001745	0,0017	0,0034	0,0086	0,0017	0,0034	0,0086
7	0,002036	0,0020	0,0040	0,0100	0,0020	0,0040	0,0100
8	0,002327	0,0023	0,0046	0,0115	0,0023	0,0046	0,0115
9	0,002618	0,0026	0,0052	0,0129	0,0026	0,0052	0,0129
10	0,002909	0,0029	0,0057	0,0144	0,0029	0,0057	0,0144
11	0,003200	0,0032	0,0063	0,0158	0,0032	0,0063	0,0158
12	0,003491	0,0034	0,0069	0,0172	0,0034	0,0069	0,0172
13	0,003782	0,0037	0,0075	0,0187	0,0037	0,0075	0,0187
14	0,004072	0,0040	0,0080	0,0201	0,0040	0,0080	0,0201
15	0,004363	0,0043	0,0086	0,0215	0,0043	0,0086	0,0215
16	0,004654	0,0046	0,0092	0,0230	0,0046	0,0092	0,0230
17	0,004945	0,0049	0,0098	0,0244	0,0049	0,0098	0,0244
18	0,005236	0,0052	0,0103	0,0258	0,0052	0,0103	0,0258
19	0,005527	0,0055	0,0109	0,0273	0,0055	0,0109	0,0273
20	0,005818	0,0057	0,0115	0,0287	0,0057	0,0115	0,0287

4.2 RELATIVAS A ALAVANCA SECUNDÁRIA

A determinação do comprimento da alavanca secundária está diretamente ligada a dois fatores: a resolução do sensor ótico disponível e a ampliação necessária para satisfazer a pretensão quanto à resolução do equipamento em construção (e/ou sua aplicação). Evidentemente não se pode esquecer que tais dimensões refletem em massa que, por sua vez, exerce influência sobre a força por ela exercida sobre a alavanca principal.

A detecção de movimentos estruturais recai na transformação do movimento relativo da alavanca principal em um outro movimento proporcional a este, que seja detectável pelo sensor ótico. Para efeito de estudo, considere-se um sensor cuja resolução seja da ordem de 800 pulsos por polegada, ou seja, emitirá um pulso para cada 0,03175mm percorridos pelo estimulador. Para um equipamento com dimensões de 1m de comprimento, capaz de medir a variação de 1mm em 100m, deve-se transformar 0,01mm num movimento equivalente a 0,03175mm, ou seja, tem-se que ampliar o movimento natural experimentado pela extremidade do pêndulo (0,01mm) para o movimento detectável (0,03175mm) utilizando a alavanca secundária com ganho de 3,175 vezes.

A tabela 3 apresenta um estudo simulando algumas situações (cada linha uma situação). A primeira coluna apresenta três comprimentos de alavanca principal. A segunda coluna apresenta o movimento total da extremidade da alavanca principal enquanto a terceira apresenta o deslocamento do ponto médio desta alavanca, considerando um movimento do equipamento equivalente a 1mm em 100m. A quarta coluna apresenta os ângulos correspondentes de inclinação da alavanca secundária. A quinta coluna contém o comprimento necessário do braço maior da alavanca secundária admitindo-se o braço menor com 10mm. A última coluna apresenta o ganho necessário desta alavanca em cada uma das situações.

TABELA 3 - ANÁLISE DO COMPRIMENTO DO BRAÇO
MAIOR DA ALAVANCA SECUNDÁRIA

Resolução pretendida: 1mm/100m.

Conexão entre alavancas: no meio da alavanca principal.

Comprimento do braço menor da alavanca secundária: 10mm.

Resolução nominal do sensor ótico: 0,03175 mm/pulso.

CAP (cm)	MTAP (mm)	MCAS (mm)	AS (rad)	CAS (mm)	L - Ampliação
100	0,01000	0,00500	0,00050	63,50	6,35
50	0,00500	0,00250	0,00025	127,00	12,70
25	0,00250	0,00125	0,00012	254,00	25,40

CAP- Comprimento da Alavanca Principal; MTAP- Movimento Total da Alavanca Principal; MCAS- Movimento Correspondente no Braço Menor da Alavanca Secundária; AS- Ângulo Correspondente ao Movimento na Alavanca Secundária; CAS -Comprimento do braço maior da alavanca secundária; L- Ampliação entre braços da Alavanca Secundária

4.3 RELATIVAS ÀS FORÇAS ENTRE ALAVANCAS

Como comentado anteriormente, as forças atuantes no sistema de alavancas têm papel importantíssimo na reação do equipamento às variações de inclinação. Por tratar-se de variações de inclinação da ordem de $0,000\ 572\ 958^\circ$ (1mm/100m), ou seja $2,062\ 64''$, as componentes da força produzida pela alavanca principal são muito tênues. Da tabela 2, para um ângulo aproximadamente 30 vezes maior que isto, $1'$, ter-se-á um valor de apenas 0,0014 gf. Embora a alavanca secundária tenha dimensões muito menores, de 6,35 cm a 25,4 cm e peso de apenas 5 g, a força por ela produzida é relativamente grande devido ao seu grande ângulo $0,028647^\circ$ de movimentação (0,005mm/10mm) quando comparado ao da alavanca principal ($0,000572958^\circ$), isto é, aproximadamente 50 vezes maior. Além deste fato, por se tratar de uma alavanca, o ganho exerce um fenômeno multiplicativo oscilando entre 6,35 e 25,4 vezes. A tabela 4 apresenta o estudo sobre as forças atuantes, onde a conexão entre alavancas situa-se na metade do comprimento da alavanca principal.

Para este estudo tomaram-se por premissas alguns valores: ganho da alavanca secundária igual a 6,35; conexão entre alavancas no meio da alavanca principal (dobrando assim a força gerada pelo seu lastro); massa do braço maior da alavanca secundária de 5g. Comprimento do braço menor igual a 10 mm. As fórmulas utilizadas foram: para componente tangencial $F_t = m.g.\text{sen}(\theta)$ e para componente horizontal $F_h = m.g.\text{sen}(\theta).\text{cos}(\theta)$, onde m é a massa, g a aceleração da gravidade e θ o ângulo de inclinação (HALLIDAY, D. 2003).

Desta maneira, variando-se algum dos dados (salientados pelo tamanho da fonte e diferente forma de grafia) obtém-se resultados correspondentes à simulação de interesse. Na primeira coluna foram introduzidos valores de inclinação da edificação em mm, com intervalos de 5mm até atingir 100 mm e intervalo de 100mm entre 100 e 1000mm. Devido ao pequeno ângulo de inclinação, as forças tangencial e horizontal envolvidas são praticamente iguais, para qualquer uma das alavancas. A comparação de tais forças entre alavancas demonstra que as produzidas pela alavanca principal são aproximadamente três vezes as produzidas pela alavanca secundária, assegurando a subordinação desta àquela. Se não se houvesse utilizado a estratégia de conectá-las ao meio da alavanca principal a diferença cairia para apenas 50%. Considerando a existência possível de efeitos como o atrito é conveniente aplicar-se uma força maior para movimentação da alavanca secundária. Para isto algumas possibilidades aparecem: aumento do lastro, aumento do comprimento da alavanca principal, deslocamento do ponto de conexão entre alavancas, redução da massa da alavanca secundária, entre outros.

TABELA 4 - ANÁLISE DE FORÇAS ATUANTES ENTRE ALAVANCAS (kg)

Inclinação da Edificação (mm)	Ampliação---->	6,35	Força Produzida pela Alavanca Principal de 1m de comprimento (gf)		Força produzida pela Alavanca Secundária (gf)	
	Conexão das alavancas (metade=2, terço=3,...)	2	F _t	F _h	F _t	F _h
	Inclinação da Extremidade do Pêndulo Principal (mm)	Ângulo entre Pêndulo e estrutura do equipamento (rad)	Massa do lastro (kg)		Massa da haste (kg)	
			0,2	0,005		
1	0,01	0,0000100	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000
5	0,05	0,0000500	0,0004	0,0004	0,0001	0,0001
10	0,1	0,0001000	0,0008	0,0008	0,0002	0,0002
15	0,15	0,0001500	0,0012	0,0012	0,0004	0,0004
20	0,2	0,0002000	0,0016	0,0016	0,0005	0,0005
25	0,25	0,0002500	0,0020	0,0020	0,0006	0,0006
30	0,3	0,0003000	0,0024	0,0024	0,0007	0,0007
35	0,35	0,0003500	0,0028	0,0028	0,0009	0,0009
40	0,4	0,0004000	0,0032	0,0032	0,0010	0,0010
45	0,45	0,0004500	0,0036	0,0036	0,0011	0,0011
50	0,5	0,0005000	0,0039	0,0039	0,0012	0,0012
55	0,55	0,0005500	0,0043	0,0043	0,0014	0,0014
60	0,6	0,0006000	0,0047	0,0047	0,0015	0,0015
65	0,65	0,0006500	0,0051	0,0051	0,0016	0,0016
70	0,7	0,0007000	0,0055	0,0055	0,0017	0,0017
75	0,75	0,0007500	0,0059	0,0059	0,0019	0,0019
80	0,8	0,0008000	0,0063	0,0063	0,0020	0,0020
85	0,85	0,0008500	0,0067	0,0067	0,0021	0,0021
90	0,9	0,0009000	0,0071	0,0071	0,0022	0,0022
95	0,95	0,0009500	0,0075	0,0075	0,0023	0,0023
100	1	0,0010000	0,0079	0,0079	0,0025	0,0025
200	2	0,0020000	0,0158	0,0158	0,0049	0,0049
300	3	0,0030000	0,0237	0,0237	0,0074	0,0074
400	4	0,0040000	0,0316	0,0316	0,0099	0,0099
500	5	0,0050000	0,0395	0,0395	0,0123	0,0123
600	6	0,0059999	0,0474	0,0474	0,0148	0,0148
700	7	0,0069999	0,0553	0,0553	0,0172	0,0172
800	8	0,0079998	0,0632	0,0632	0,0197	0,0197
900	9	0,0089998	0,0711	0,0711	0,0222	0,0221
1000	10	0,0099997	0,0790	0,0790	0,0246	0,0245

A tabela 5 apresenta uma simulação semelhante à primeira porém com valores iniciais diferentes: lastro 3200g, ganho de 12,70 vezes e conexão entre alavancas no meio da alavanca principal. A massa da alavanca secundária permaneceu a mesma, 5g. A coluna 1 inclui alturas de edificação em múltiplos de 1,7m, visando a semelhança com tolerâncias admitidas pela Engenharia Civil. Observa-se que, devido ao aumento

do ganho da alavanca secundária (de 6,35 para 12,70) a relação entre as forças das alavancas diminuiu para aproximadamente 2.

TABELA 5 – FORÇAS GERADAS PELAS ALAVANCAS PRINCIPAL E SECUNDÁRIA

Altura da Edificação (m)	Inclin. da Edificação. (1mm/100m)	Inclin. da Estrut. do Equipamento (mm)	Ângulo de Inclinação do Equipamento (graus)	Força gerada no meio da Alavanca Principal de comprimento 1000 mm		Ângulo de Inclinação da Alavanca Secundária (graus)	Força gerada pela Alavanca Secundária (gf)	
				Lastro (g)	3200		Massa (g):	5
				F _t (gf)	F _h (gf)		Ampliação (x):	12,70
				F _t (gf)	F _h (gf)		F _t (gf)	F _h (gf)
8,50	5	0,05	0,00286	3,158	3,158	0,143	1,567	1,567
17,00	10	0,1	0,00573	6,317	6,317	0,286	3,134	3,134
25,50	15	0,15	0,00859	9,475	9,475	0,430	4,700	4,700
34,00	20	0,2	0,01146	12,634	12,634	0,573	6,267	6,267
42,50	25	0,25	0,01432	15,792	15,792	0,716	7,834	7,833
51,00	30	0,3	0,01719	18,950	18,950	0,859	9,400	9,399
59,50	35	0,35	0,02005	22,109	22,109	1,003	10,966	10,965
68,00	40	0,4	0,02292	25,267	25,267	1,146	12,532	12,530
76,50	45	0,45	0,02578	28,426	28,426	1,289	14,098	14,095
85,00	50	0,5	0,02865	31,584	31,584	1,432	15,664	15,659
93,50	55	0,55	0,03151	34,742	34,742	1,575	17,229	17,222
102,00	60	0,6	0,03438	37,901	37,901	1,718	18,794	18,785
110,50	65	0,65	0,03724	41,059	41,059	1,861	20,358	20,348
119,00	70	0,7	0,04011	44,218	44,218	2,005	21,923	21,909
127,50	75	0,75	0,04297	47,376	47,376	2,148	23,486	23,470
136,00	80	0,8	0,04584	50,534	50,534	2,291	25,050	25,030
144,50	85	0,85	0,04870	53,693	53,693	2,434	26,613	26,589
153,00	90	0,9	0,05157	56,851	56,851	2,577	28,175	28,147
161,50	95	0,95	0,05443	60,010	60,010	2,720	29,737	29,703
170,00	100	1	0,05730	63,168	63,168	2,862	31,298	31,259
178,50	105	1,05	0,06016	66,326	66,326	3,005	32,859	32,814
187,00	110	1,1	0,06303	69,485	69,485	3,148	34,419	34,367
195,50	115	1,15	0,06589	72,643	72,643	3,291	35,978	35,919
204,00	120	1,2	0,06875	75,802	75,801	3,434	37,537	37,470
212,50	125	1,25	0,07162	78,960	78,960	3,576	39,095	39,019
221,00	130	1,3	0,07448	82,118	82,118	3,719	40,653	40,567
229,50	135	1,35	0,07735	85,277	85,277	3,862	42,209	42,113

Além da análise das forças atuantes uma forma para escolha do equipamento pode ser através da tabela 6. Em função dos dispositivos à mão e de dados aproximados da estrutura pode-se estimar qual a resolução que se terá com o emprego do equipamento disponível.

Enfatizados por escrita diferente, pode-se observar a situação em que se dispõem de uma alavanca principal de 1000 mm de comprimento (primeira coluna), alavanca secundária com ganho de 12,7 vezes (segunda coluna) e edificação com 100 m de altura (última coluna da terceira linha). A resolução atingível para estas condições é de 0,25 mm (última coluna da sexta linha), ou seja, com um sensor ótico de 800 pulsos por polegada obter-se-á um pulso para cada 0,25 mm de variação da inclinação a 100 metros de altura.

TABELA 6 - ANÁLISE DA MENOR VARIAÇÃO MENSURÁVEL (mm) EM FUNÇÃO DO EQUIPAMENTO E DA ALTURA DA EDIFICAÇÃO (m)

Equipamentos		Altura da Edificação (m)									
CAP	PS	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	1:3,175	0,100	0,200	0,300	0,400	0,500	0,600	0,700	0,800	0,900	1,000
1000mm	1:6,350	0,050	0,100	0,150	0,200	0,250	0,300	0,350	0,400	0,450	0,500
	1:12,700	0,025	0,050	0,075	0,100	0,125	0,150	0,175	0,200	0,225	0,250
	1:6,350	0,100	0,200	0,300	0,400	0,500	0,600	0,700	0,800	0,900	1,000
500mm	1:12,700	0,050	0,100	0,150	0,200	0,250	0,300	0,350	0,400	0,450	0,500
	1:25,400	0,025	0,050	0,075	0,100	0,125	0,150	0,175	0,200	0,225	0,250
	1:12,700	0,100	0,200	0,300	0,400	0,500	0,600	0,700	0,800	0,900	1,000
250mm	1:25,400	0,050	0,100	0,150	0,200	0,250	0,300	0,350	0,400	0,450	0,500
	1:50,800	0,025	0,050	0,075	0,100	0,125	0,150	0,175	0,200	0,225	0,250

CAP- Comprimento da Alavanca Principal; PS- Ampliação da Alavanca Secundária;
Admitindo-se resolução do sensor ótico de 0,03175 mm/pulso e conexão entre alavancas na extremidade da alavanca principal;

O quadro 2 apresenta mais uma forma de escolher o equipamento a ser empregado em função de algumas características a serem observadas. Como dados de entrada, deve-se fornecer a altura (m) estimada da estrutura, amplitude (m) estimada da variação de inclinação, pulsos desejados por milímetro de variação e resolução do sensor ótico disponível do equipamento. No exemplo o valor 0,2 (na célula “número

de pulsos desejados”) significa que é desejado um pulso a cada 5mm de variação. Se este valor fosse 0,1 ter-se-ia um pulso a cada 10mm de variação. A resolução do sensor ótico será motivo de discussão em outro tópico.

A utilização do quadro 2 permite a simulação de diversas situações. Para sua utilização segue-se procedimentos enumerados segundo suas partes. Inicialmente fornece-se os dados da situação na parte 1. Em segundo lugar verifica-se, na parte 2, a linha que se refere ao ponto da alavanca principal onde será colocado o conector entre alavancas. No exemplo optou-se por 0,5 (metade do comprimento total, enfatizado com grafia diferente – tipo maior), isto é, a 50cm do ponto de apoio desta alavanca. Nesta linha encontram-se pontos em grafia normal e em grafia em itálico. Os pontos em (itálico) significam pontos passíveis de uso cujas colunas apresentam em seu cabeçalho as ampliações possíveis de serem aplicadas. Neste exemplo deve-se utilizar ampliações (ganhos na alavanca secundária) que variam de 3 a 17. Na parte 3 do quadro, verifica-se a linha que tem o mesmo valor de ponto de conexão da parte 2, isto é, 0,50. Todas as colunas cujos valores nesta linha têm valores menores que 10 podem ser empregadas. Ou seja, neste exemplo, ganhos de 1 a 17. O atendimento simultâneo às partes 2 e 3 fornece as opções disponíveis, isto é, ampliações entre 3 e 17. Se, num outro exemplo, a escolha fosse a linha 0,9 na parte dois do quadro, e opção pela ampliação 15, embora haja um valor em itálico ali, este equipamento não seria utilizável pois na parte 3 o conteúdo da linha 0,9, na coluna da ampliação 15, é 13,5, isto é, maior que a amplitude máxima de leitura. Para esta situação só deverão ser empregadas ampliações entre 2 e 11 vezes.

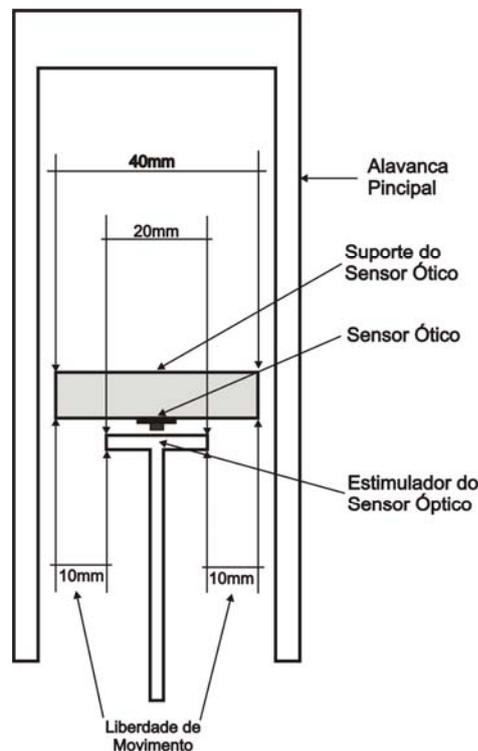
A parte 2 do quadro 2 contém o deslocamento por pulso do estimulador após a ampliação (considerando a inclinação estimada e o número de pulsos desejados por mm). Se este valor for maior que a resolução do sensor será percebido pelo sensor. A parte 3 contém o deslocamento do estimulador para a variação total estimada. Este valor deve ser menor que a liberdade de movimento disponível -10mm.

QUADRO 2 - ANÁLISE DE SITUAÇÃO PARA MONTAGEM DO EQUIPAMENTO																			
1	Situação	ALTURA ESTIMADA DA ESTRUTURA (m):	100				Seleção da Ampliação 1-Coloque, <u>na parte 1</u> , os dados estimados. 2-Verifique, <u>na parte 2</u> , qual a posição da alavanca primária você pretende colocar o conector entre alavancas (coluna CE, p.ex. 0,5 m do início). 3- Verifique a ampliação necessária no topo da coluna cuja interseção se dá com a linha escolhida no item anterior (p.ex. 3) em um dos números em <i>itálico</i> (p.ex. 0,1) nela contidos. 4-Verifique, <u>na parte 3</u> , se a intersecção da coluna escolhida com a linha de mesmo valor da posição do conector, contém um valor menor que 10mm (neste exemplo, 1,5). Se houver, esta configuração poderá ser usada. Obs: neste exemplo o usuário deseja <u>um</u> pulso a cada 5 mm de inclinação (1/0,2=5).												
		AMPLITUDE ESTIMADA DO MOVIMENTO (mm):	100																
		PULSOS DESEJADOS / mm	0,2	Resolução															
		RESOLUÇÃO DO SENSOR ÓTICO (PPP-pulsos por polegada):	400	0,0635	mm/pulso														
AMPLIAÇÕES POSSÍVEIS																			
Escolha da Alavanca Secundária	CE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
3	Deslocamento Máximo Alavanca Secundária (deve ser menor que 10,00mm)	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
		0,2	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4
		0,3	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1	2,4	2,7	3,0	3,3	3,6	3,9	4,2	4,5	4,8	5,1
		0,4	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2	3,6	4,0	4,4	4,8	5,2	5,6	6,0	6,4	6,8
		0,5	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5
		0,6	0,6	1,2	1,8	2,4	3,0	3,6	4,2	4,8	5,4	6,0	6,6	7,2	7,8	8,4	9,0	9,6	10,2
		0,7	0,7	1,4	2,1	2,8	3,5	4,2	4,9	5,6	6,3	7,0	7,7	8,4	9,1	9,8	10,5	11,2	11,9
		0,8	0,8	1,6	2,4	3,2	4,0	4,8	5,6	6,4	7,2	8,0	8,8	9,6	10,4	11,2	12,0	12,8	13,6
		0,9	0,9	1,8	2,7	3,6	4,5	5,4	6,3	7,2	8,1	9,0	9,9	10,8	11,7	12,6	13,5	14,4	15,3
		1,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0
2	Verificar posição do Conector entre alavancas na Alavanca Principal (0,5 significa metade da alavanca principal de 1,0m)	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
		0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
		0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3
		0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3
		0,5	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4
		0,6	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5
		0,7	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6
		0,8	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7
		0,9	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8
		1,0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9

A parte dois do quadro 2 mostra o valor do deslocamento experimentado pelo excitador do sensor ótico para as condições de trabalho apresentadas na parte 1. Se este deslocamento for menor que 0,0635mm não haverá produção do pulso a cada 5 mm de inclinação da edificação como desejado. Utilizando-se a linha 0,1, por exemplo, somente ampliações iguais ou superiores a 13 seriam capazes de produzir movimento do excitador maior que 0,0635mm.

A parte 3 contém o deslocamento máximo experimentado pelo excitador quando a inclinação atinge a amplitude máxima prevista fornecida (100mm, no exemplo). Como o equipamento tem (por construção) um limite de movimentação de 10mm em torno do ponto médio este não poderá ser excedido. Pode-se aumentar a amplitude do movimento mensurável tornando a estrutura da alavanca principal mais larga (figura 32).

FIGURA 32 - LIMITE DE MOVIMENTOS DO ESTIMULADOR DO SENSOR ÓTICO



5 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

A construção do protótipo pode ser executada baseando-se em valores teóricos de suas dimensões, obtidos a partir de algumas premissas. As diferenças existentes entre tais valores e os reais, decorrentes da construção, acarretarão diferenças entre as variações reais de inclinação e as observadas. Para compatibilização de ambos os espaços é necessária a calibração do equipamento, assunto este abordado mais tarde (item 7.2). O elemento chave de todo o protótipo é o sensor ótico. Até o momento admite-se, para efeito de estudo, um sensor que possui resolução equivalente a 800 pulsos por polegada (0,03175mm/pulso). A determinação precisa de sua resolução será especificamente tratada em outro item (8.1).

Alguns elementos básicos devem ser considerados antes de passar à construção do equipamento. Entre eles pode-se citar: forças atuantes, determinação preliminar das dimensões; análise de efeitos secundários (temperatura, geometria, inclinação da superfície refletora).

5.1 DETERMINAÇÃO DO LASTRO DA ALAVANCA PRINCIPAL

A tabela 8 apresenta a análise de forças (em gf) atuantes no sistema considerando três diferentes ganhos na alavanca secundária. Pode-se observar que quando da utilização de ganho 25,4 o lastro de 3000g é insuficiente (o valor mínimo seria 3175g) pois a força da alavanca secundária é maior que o da principal. Nestas circunstâncias a alavanca principal seria escravizada pela secundária, tornando necessário o aumento do lastro. Optou-se por utilizar um lastro com 4000g de massa, deixando uma margem de segurança em termos de força atuante, mesmo quando se utiliza o maior ganho na alavanca secundária.

TABELA 8 - ANÁLISE DE FORÇAS ATUANTES

Força gerada pela Alavanca Principal no local de conexão (gf)		Força gerada pela Alavanca Secundária no ponto de conexão (gf)		Força gerada pela Alavanca Secundária no ponto de conexão (gf)		Força gerada pela Alavanca Secundária no ponto de conexão (gf)	
Lastro (g)	3000	Massa alav. sec. (g):	5	Massa alav. sec.(g):	5	Massa alav. sec. (g):	5
		Ampliação (x):	6,35	Ampliação (x):	12,7	Ampliação (x):	25,4
Força Tangencial (gf)	Força Horizontal (gf)	Força Tangencial (gf)	Força Horizontal (gf)	Força Tangencial (gf)	Força Horizontal (gf)	Força Tangencial (gf)	Força Horizontal (gf)
2,961	2,961	0,783	0,783	1,567	1,567	3,134	3,134
5,922	5,922	1,567	1,567	3,134	3,134	6,267	6,267
8,883	8,883	2,350	2,350	4,700	4,700	9,401	9,401
11,844	11,844	3,134	3,133	6,267	6,267	12,534	12,534
14,805	14,805	3,917	3,917	7,834	7,833	15,667	15,666
17,766	17,766	4,700	4,700	9,400	9,399	18,800	18,798
20,727	20,727	5,483	5,482	10,966	10,965	21,933	21,929
23,688	23,688	6,266	6,265	12,532	12,530	25,065	25,060
26,649	26,649	7,049	7,047	14,098	14,095	28,196	28,189
29,610	29,610	7,832	7,829	15,664	15,659	31,327	31,318
32,571	32,571	8,614	8,611	17,229	17,222	34,458	34,445
35,532	35,532	9,397	9,393	18,794	18,785	37,588	37,571
38,493	38,493	10,179	10,174	20,358	20,348	40,717	40,695
41,454	41,454	10,961	10,955	21,923	21,909	43,845	43,818
44,415	44,415	11,743	11,735	23,486	23,470	46,973	46,940
47,376	47,376	12,525	12,515	25,050	25,030	50,100	50,060
50,337	50,337	13,306	13,294	26,613	26,589	53,225	53,177
53,298	53,298	14,088	14,073	28,175	28,147	56,350	56,293
56,259	56,259	14,868	14,852	29,737	29,703	59,474	59,407
59,220	59,220	15,649	15,630	31,298	31,259	62,596	62,518
62,181	62,181	16,429	16,407	32,859	32,814	65,718	65,627
65,142	65,142	17,209	17,184	34,419	34,367	68,838	68,734
68,103	68,103	17,989	17,960	35,978	35,919	71,957	71,838
71,064	71,064	18,769	18,735	37,537	37,470	75,074	74,940
74,025	74,025	19,548	19,510	39,095	39,019	78,191	78,038
76,986	76,986	20,326	20,284	40,653	40,567	81,305	81,134
79,947	79,947	21,105	21,057	42,209	42,113	84,418	84,227

5.2 DIMENSÕES DO PROTÓTIPO

A construção de um equipamento aplica-lhe limitações de uso. Por este motivo há que se determinar qual o emprego previsto bem como o material disponível. Um dos elementos determinantes do equipamento a ser construído é o sensor ótico. Como comentado, o trabalho do sistema mecânico do equipamento consiste em ampliar o movimento observado. Esta ampliação deve ser tal que o sensor emita um pulso a cada intervalo de variação admitido como resolução. Na tabela 9 tem-se as opções de construção de diferentes equipamentos tendo como base um sensor ótico de 800 (valor teórico) pulsos por polegada (ppp), ou seja 0,03175 mm/pulso.

A utilização da tabela 9 baseia-se no objetivo desejado. Por exemplo, desejando-se construir um equipamento com resolução de 1mm/100m (verificar área compreendida entre linhas 3 a 6 e colunas 3 e 4 da tabela) tem-se duas opções de dimensionamento (conjunto sublinhado e conjunto não sublinhado), fornecidas pelas colunas e linhas com intersecção na precisão desejada. A primeira (terceira coluna-terceira linha, em itálico, tipos maiores, sem sublinhado), por exemplo, seria um equipamento com alavanca principal com comprimento de 1000 mm (penúltima linha da terceira coluna), conexão entre alavancas a 500 mm (segunda linha da terceira coluna) do ponto de apoio, ampliação de 6,35 vezes (segunda linha da segunda coluna) e lastro mínimo de 1600g (segunda linha da primeira coluna).

TABELA 9 - COMPONENTES DO PROTÓTIPO

Lastro Necessário (g)	Ampliação Mínima	Conexão entre Alavancas	
		<i>500 mm</i>	<u>250 mm</u>
<i>1600</i>	<i>6,35</i>	<i>1mm / 100m</i>	2mm / 100m
<u>3200</u>	<u>12,70</u>	0,5 mm / 100m	<u>1mm / 100m</u>
6500	25,70	0,25mm / 100m	0,5 mm / 100m
13000	51,60	0,125 mm / 100mm	0,25mm / 100m
		<i>1000 mm</i>	<u>500 mm</u>
Sensor Ótico:	800ppp	Comprimento do Pêndulo	

A outra opção (quarta coluna, quarta linha, em itálico, tipos maiores, com sublinhado) seria utilizando alavanca principal com 500mm de comprimento (penúltima linha da quarta coluna), conector a 250mm do ponto de apoio (segunda linha da quarta coluna), ampliação de 12,7 vezes (segunda linha da segunda coluna) e lastro mínimo de 3200g (terceira linha da primeira coluna).

Pode-se também, em função da disponibilidade de material descobrir quais os equipamentos possíveis. Se houver um lastro de 3200 g e alavanca secundária com ampliação de 12,7 vezes pode-se construir dois equipamentos: o primeiro com resolução de 0,5mm/100m, comprimento da alavanca principal de 1000mm e conector à 500mm do ponto do seu ponto de apoio. A segunda opção pode ser um equipamento com 500mm de alavanca principal e conexão a 250mm de seu ponto de apoio sendo que a resolução será 1mm/100mm.

O uso conjunto da tabela 5, quadro 2 e tabela 9 fornecem os subsídios para construção do equipamento.

5.3 ANÁLISE DE EFEITOS SECUNDÁRIOS

5.3.1 Efeitos da Temperatura

A temperatura ambiente onde está instalado o equipamento pode interferir nos resultados obtidos através da dilatação de seus componentes. Analisar-se-á este assunto considerando os coeficientes de dilatação dos materiais mais comumente utilizados:

Alumínio	$22 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Latão	$19 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Cobre	$17 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Ferro	$12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

São seis os elementos mecânicos suscetíveis a tais influências: a estrutura do equipamento propriamente dita, a alavanca principal, a alavanca secundária, os suportes das alavancas secundária e principal bem como os fixadores do equipamento à estrutura.

O modelo que está sendo utilizado (figura 33) para análise dos efeitos secundários não é o utilizado para construir o protótipo. O motivo para isto é que (22° de um conjunto de 23 experimentados) ele sofre maior interferência, ou seja, seria a situação mais desfavorável. O aperfeiçoamento para minorizar tais efeitos, embora estes ainda ficassem aquém da resolução desejada e não interferissem significativamente, foi obtido por uma mudança de arquitetura do protótipo.

5.3.1.1 Efeito sobre a estrutura do equipamento

O suporte tem aproximadamente 1,00 m de comprimento e é constituído por uma barra metálica cujo coeficiente de dilatação linear α oscila (para efeito de análise de hipóteses) entre $22 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ (alumínio - caso mais desfavorável) e $12 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ (ferro). O valor da variação do comprimento do suporte pode ser obtido a partir da fórmula da dilatação linear

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta t$$

onde

α é o coeficiente de dilatação linear,

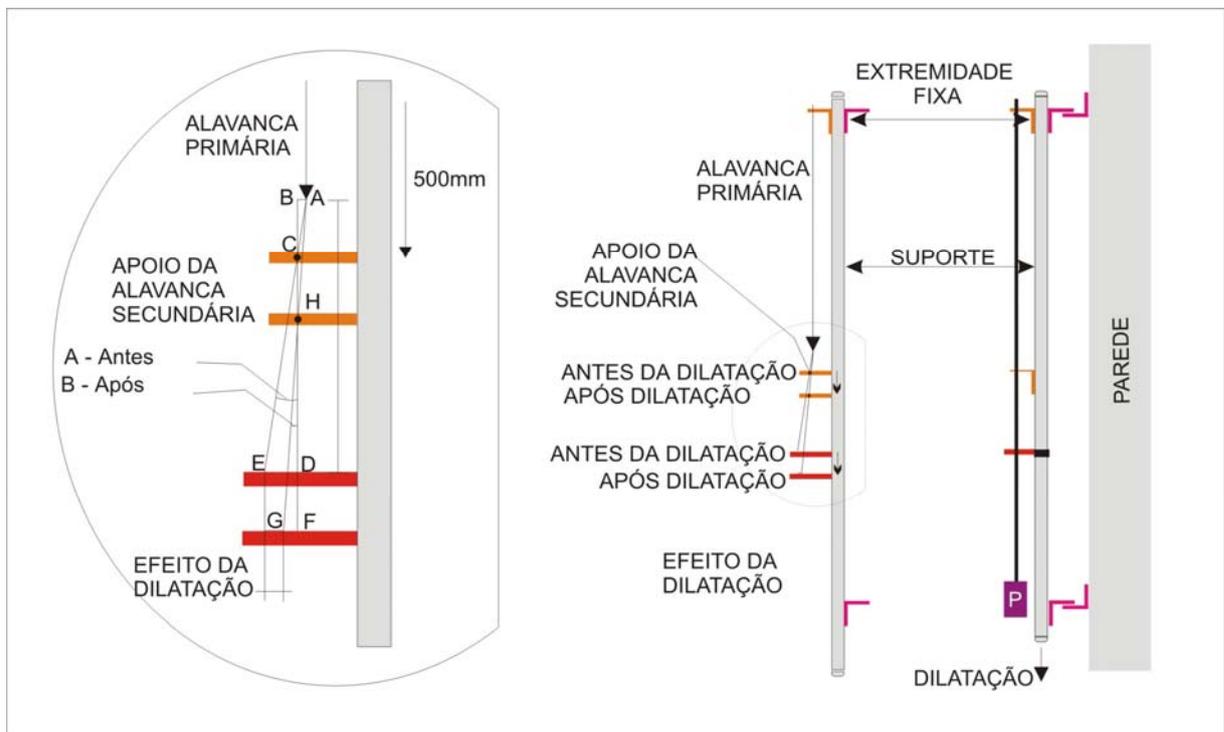
L_0 é o comprimento inicial do suporte e

Δt é a variação de temperatura experimentada durante o processo.

Adotar-se-á Δt igual a 25 °C, tendo em conta as características da nossa região bem como da estabilidade dos ambientes de sensoriamento comumente utilizados.

Observando a figura 33 pode-se ver como o efeito da dilatação do suporte interfere na medida da inclinação. Para facilidade de análise, admitir-se á que todos os demais componentes do equipamento permanecerão inalterados, embora se saiba que o fenômeno esteja presente em todo o sistema. Durante o processo a distância entre o ponto de apoio do pêndulo e o ponto de apoio da alavanca secundária aumenta. Para um mesmo deslocamento da alavanca primária antes e depois da dilatação há alteração do ângulo da alavanca secundária e conseqüentemente alteração da posição de leitura no sensor ótico. Como pode ser visto na figura 33 a dilatação diminui o valor da leitura do vetor total de deslocamento e, conseqüentemente, de seus componentes segundo os eixos X e Y, enquanto a contração do material gera o seu aumento.

FIGURA 33 - EFEITO DA TEMPERATURA SOBRE O SUPORTE DO EQUIPAMENTO



Quando o equipamento está na vertical com as alavancas principal e secundária e seus pontos de apoio absolutamente alinhados o efeito é nulo pois os deslocamentos se dão longitudinalmente. Quando não há o alinhamento, que é o caso comum durante as leituras, o efeito se faz presente.

Da figura 33 tem-se:

a- do triângulo ABC

$$\operatorname{tg} ACB = \frac{AB}{BC}$$

onde AB é o deslocamento da alavanca principal devido à variação de inclinação e BC é o comprimento do braço menor da alavanca secundária;

b- do triângulo CDE

$$\operatorname{tg} ECD = \frac{ED}{CD}$$

onde ED é o deslocamento do braço maior da alavanca secundária e CD a distância entre o apoio da alavanca secundária e o sensor ótico.

Como os ângulos são opostos pelo vértice pode-se escrever:

$$\operatorname{tg} ACB = \operatorname{tg} ECD \quad \text{ou} \quad \frac{AB}{BC} = \frac{ED}{CD} \Rightarrow$$

$$ED = \left(\frac{CD}{BC}\right)AB$$

A relação entre os segmentos CD e CB é pré-determinada em função da ampliação desejada para a alavanca secundária e tem valor constante.

Aplicando o mesmo raciocínio para os triângulos AHB e GHF (após a dilatação) chega-se a:

$$\text{tg AHB} = \text{tg GHF} \quad \text{ou}$$

$$\frac{AB}{HB} = \frac{FG}{FH} \Rightarrow FG = \left(\frac{FH}{HB}\right)AB$$

a distância HB corresponde à distância BC acrescida da dilatação da parte do suporte compreendida entre o ponto de apoio do pêndulo até o local do suporte da alavanca secundária, ou seja, de $\Delta L = \alpha L_0 \Delta t = \alpha 500 \text{ mm } \Delta t$, então

$$FG = \left[\frac{AB}{(BC + \alpha \times \Delta t \times 500 \text{ mm})} \right] FH$$

As relações BC/CD e AB/HF permanecem com o mesmo valor porque considera-se os demais componentes do sistema como indeformáveis. Mesmo sem este procedimento a relação permaneceria constante uma vez que a dilatação é proporcional não só à variação de temperatura como também aos comprimentos envolvidos. O que ocorre, no entanto, é que o ponto de aplicação da força, exercida pela alavanca primária sobre a secundária, muda de lugar criando um efeito equivalente a um aumento do braço menor da alavanca secundária provocando movimentação menor desta.

O efeito da dilatação é obtido a partir da diferença entre as equações dos movimentos experimentados pela extremidade maior da alavanca secundária

$$ED - FG = \left(\frac{DC}{CB}\right)AB - \left[\frac{AB}{(BC + \alpha \times \Delta t \times 500mm)}\right]FH$$

Atribuindo-se valores aos termos da fórmula chega-se aos resultados da tabela 10.

TABELA 10 - EFEITO DA TEMPERATURA SOBRE O SUPORTE

Material	AB (mm)	BC (mm)	CD (mm)	α ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	Δt ($^{\circ}\text{C}$)	FH (mm)	Diferença ED-FG (mm)	Varição equivalente em 100m (mm)
Alumínio	0,005	10	127	0,000022	25	127	0,001700	0,33990
Cobre	0,005	10	127	0,000019	25	127	0,0014731	0,29462
Latão	0,005	10	127	0,000017	25	127	0,0013213	0,26426
Ferro	0,005	10	127	0,000012	25	127	0,0009384	0,18769

O valor 0,005mm atribuído a AB vem de se considerar a variação de inclinação da estrutura de 1mm em 100m de distância, que corresponde a 0,005mm para 0,5m. Os valores constantes para BC e FH provêm da consideração de que a alavanca secundária não sofre deformação para efeito de análise da dilatação do suporte. A última coluna apresenta a variação em inclinação a 100m de altura correspondente à diferença ED-FG constante na coluna 8.

5.3.1.2 Sobre a alavanca principal

A figura 34 apresenta, de forma ampliada, o que ocorre quando há dilatação da alavanca principal. Observa-se que com o aumento do seu comprimento o deslocamento sofrido pela extremidade que era de D1, antes da dilatação, passa a ser D2. Este deslocamento diferencial imprime ao braço menor da alavanca secundária uma mudança de posição e, por consequência, um deslocamento do braço maior da alavanca secundária diante do sensor ótico alterando o valor da leitura.

Admitindo-se os mesmos coeficientes de dilatação para a análise dos efeitos de temperatura anteriormente empregados, pode-se calcular o deslocamento horizontal sofrido pela sua extremidade e, conseqüentemente, o valor da alteração na leitura para uma mesma inclinação.

FIGURA 34- EFEITO DA TEMPERATURA SOBRE A ALAVANCA PRINCIPAL



A tabela 11 apresenta os resultados obtidos. A coluna três contém a diferença entre o movimento de 1mm da alavanca principal antes da dilatação e o obtido após a dilatação para a mesma inclinação da estrutura.

Observa-se, na quarta coluna da tabela, que o maior valor da influência equivale a 0,00005mm. Esta variação não é perceptível pelo sensor ótico uma vez que a resolução teórica é de 800 pulsos por polegada (aproximadamente 0,03175 mm)

TABELA 11 - EFEITO DA TEMPERATURA SOBRE A ALAVANCA PRINCIPAL

Material	Varição no comprimento da alavanca principal (mm)	Varição do movimento da extremidade da alavanca principal (mm)	Efeito sobre as medidas para ganho de 12,7 vezes (mm)	Varição equivalente em 100 m (mm)
Alumínio	0,2750	0,00055	0,0070	0,11000
Latão	0,2375	0,00048	0,0060	0,09500
Cobre	0,2125	0,00042	0,0054	0,08500
Ferro	0,1500	0,00030	0,0038	0,06000

5.3.1.3 Sobre a alavanca secundária

Para o caso da alavanca secundária (figura 35) a dilatação se dará nos dois braços. Do ponto de vista do fator de ampliação específico a relação permanecerá a mesma, admitindo-se homogênea a composição do material. Considerando o valor do ângulo de inclinação da alavanca secundária nota-se que este não se altera com o aumento do comprimento do braço menor, uma vez que o deslocamento da alavanca primária manteve-se o mesmo. Para o valor deste de 0,005 mm e braço menor da alavanca secundária de 10mm tem-se que a $\text{tg } A = 0,0050 \text{ mm}/10,0000 \text{ mm} = 0,0005$. Após a dilatação o comprimento do braço menor aumenta alterando o valor do ângulo e, conseqüentemente, o posicionamento da extremidade do braço maior da alavanca secundária.

A tabela 12, em sua nona coluna, apresenta o efeito sobre a leitura do equipamento decorrente da dilatação do braço menor da alavanca secundária, admitindo-se ganho de 12,7 vezes. Observa-se que seu efeito não ultrapassa 0,01mm em 100 metros de altura.

FIGURA 35 – EFEITO DA TEMPERATURA SOBRE O BRAÇO MENOR DA ALAVANCA SECUNDÁRIA

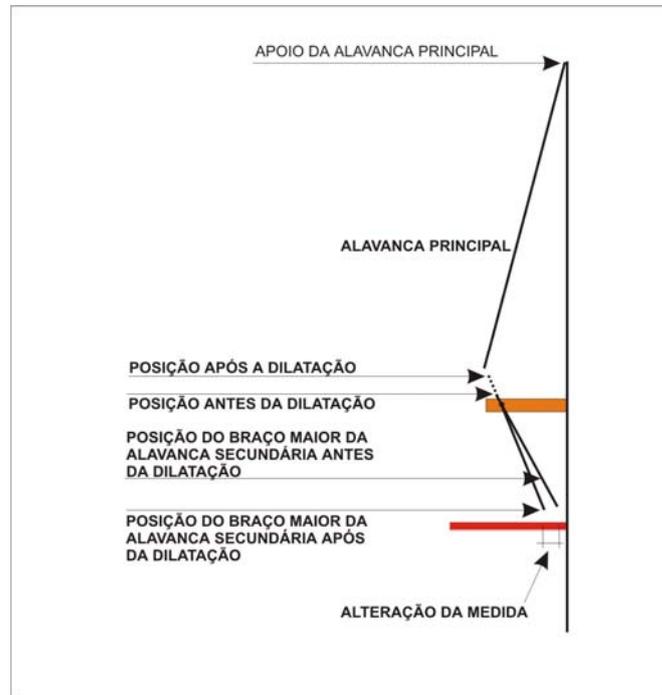


TABELA 12 – EFEITOS DA TEMPERATURA SOBRE O BRAÇO MENOR DA ALAVANCA SECUNDÁRIA

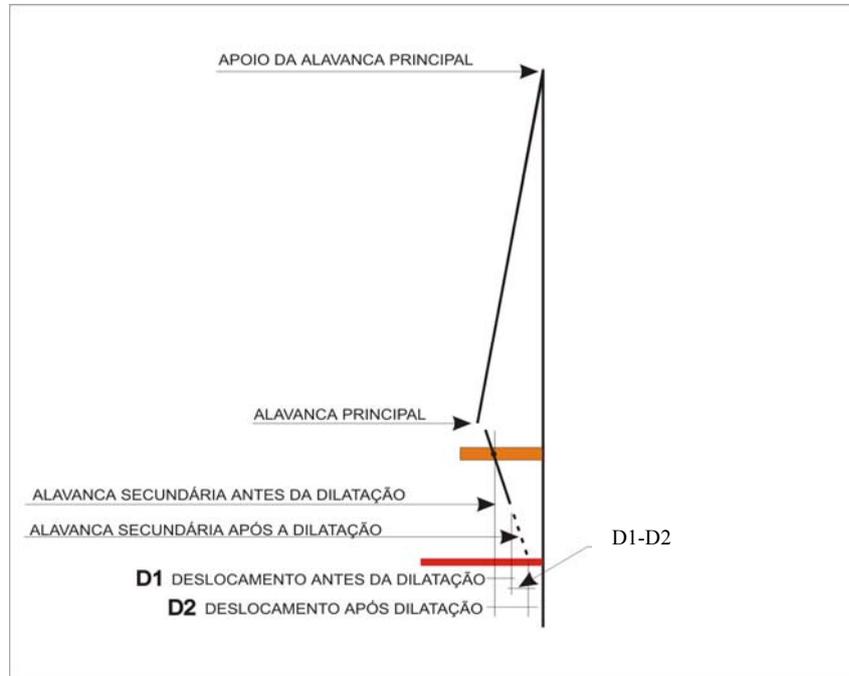
Dilatação (mm)	Comprimento antes da dilatação (mm)	Comprimento após dilatação (mm)	Ângulo antes da dilatação (rad)	Ângulo após dilatação (rad)	Deslocamento antes da dilatação (mm)	Deslocamento após dilatação (mm)	Diferença de leitura (mm)	Varição equivalente em 100m (mm)
0,0055	10	10,0055	0,0005	0,0005	0,00635	0,006347	0,00000349	0,008866
0,00475	10	10,0048	0,0005	0,0005	0,00635	0,006347	0,00000301	0,007658
0,00425	10	10,0043	0,0005	0,0005	0,00635	0,006347	0,00000270	0,006852
0,003	10	10,003	0,0005	0,0005	0,00635	0,006348	0,00000190	0,004837

Considerando-se agora o braço maior (figura 36), nas duas circunstâncias (antes D1 e depois D2 da dilatação) observa-se que os deslocamentos por ele sofrido são, respectivamente:

$$D1 = 127 \text{ mm} \times \text{tg } A = 127 \text{ mm} \times 0,000500 = 0,063500000 \text{ mm}$$

$$D2 = 127,06985 \text{ mm} \times \text{tg } A = 127,06985 \text{ mm} \times 0,000500 = 0,063534925 \text{ mm}$$

FIGURA 36 - EFEITO DA TEMPERATURA SOBRE O BRAÇO MAIOR DA ALAVANCA SECUNDÁRIA



o que nos dá a diferença de 0,000034925 mm ou, em pulsos, de 0,01194 pulsos. Como há aumento do percurso da extremidade do braço maior da alavanca secundária o efeito é positivo, isto é, um aumento da leitura em relação ao estado anterior à dilatação.

Estabelecendo o mesmo raciocínio para os demais materiais temos:

TABELA 13 – EFEITO DA TEMPERATURA SOBRE O BRAÇO MAIOR DA ALAVANCA SECUNDÁRIA

Material	Antes da Dilatação (mm)		Após Dilatação (mm)		Deslocamento do braço maior (mm)		Diferença (mm)	Variação equivalente em 100m (mm)
	Braço Menor	Braço Maior	Braço Menor	Braço Maior	Antes da Dilatação	Após Dilatação		
Alumínio	10	12,7	10,00550	127,069850	0,0635000	0,0635349	0,0000349	0,088646
Latão	10	12,7	10,00475	127,060330	0,0635000	0,0635302	0,0000301	0,076454
Cobre	10	12,7	10,04250	127,053975	0,0635000	0,0635270	0,0000270	0,068580
Ferro	10	12,7	10,03000	127,038100	0,0635000	0,0635191	0,0000191	0,048514

Observando-se a penúltima coluna percebe-se que o efeito, em pulsos, é imperceptível pelo sensor ótico (para ser perceptível a variação deveria ser superior a 0,03175mm). Convertendo-se este efeito para a distância equivalente a 100 m tem-se a variação entre 0,088646 mm a 0,048514 mm, abaixo portanto da resolução pretendida. O sinal positivo das últimas duas colunas é para enfatizar que a dilatação provoca aumento na leitura em função da dilatação do braço maior da alavanca secundária. Observa-se também que, como a variação do movimento está ligada ao ângulo de inclinação da alavanca secundária, mais precisamente à sua tangente, quanto maior a inclinação da estrutura maior também o será a da alavanca secundária e, conseqüentemente, o valor da influência. Admitindo-se uma inclinação da estrutura de 1000mm o efeito desta dilatação atingiria o valor limite (alumínio) de 0,492mm em 100m.

5.3.1.4 Sobre os fixadores à estrutura

Existem dois fixadores do equipamento à estrutura. Cada um deles é constituído por duas partes, em formato de L, uma fixa ao instrumento e outra fixada à estrutura (figura 37). Uma conexão entre ambas é feita por parafuso e porca. A distância compreendida entre o equipamento e a estrutura tem aproximadamente 9 cm.

Para efeito de cálculo admite-se a distância suporte-parede de 10 cm, situação desfavorável em relação à real, e que apenas um dos suportes sofra o efeito da temperatura. Desta maneira estar-se-ia introduzindo uma inclinação adicional ao equipamento. Pode-se observar na tabela 14, quarta coluna, o efeito da dilatação considerando quatro tipos diferentes de material.

TABELA 14 - EFEITO DA TEMPERATURA SOBRE OS FIXADORES

Material	α ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	Comprimento (mm)	Δt ($^{\circ}\text{C}$)	Varição de Comprimento	Varição equivalente a 2% em 100 m (mm)
Alumínio	0,000022	100	25	0,05500	0,05500
Cobre	0,000019	100	25	0,04750	0,04750
Latão	0,000017	100	25	0,04250	0,04250
Ferro	0,000012	100	25	0,03000	0,03000

Como pode ser notado o efeito da dilatação varia entre 0,05500 e 0,030000 mm. Na situação estudada (somente um suporte sofrer variação) estes valores correspondem à variação equivalente de apenas 2,75mm para a 1,5mm à distância de 100 m. Como ambos os fixadores sofrerão o mesmo efeito esta influência é praticamente nula. Na tabela 14, no entanto, a última coluna apresenta valores correspondentes a 2% do valor total de variação que se terá se apenas um fixador sofresse variação. Utilizou-se este artifício, totalmente desfavorável, admitindo-se que os suportes usados pudessem ter erro de fabricação de 2%, isto é, erro de 2mm em sua construção. Pode-se observar que, mesmo assim, o efeito conjunto final não ultrapassará 1mm em 100m.

5.3.1.5 O efeito conjunto da temperatura

Adicionando-se todos os efeitos da dilatação chega-se aos resultados apresentados na tabela 15.

TABELA 15 - EFEITO CONJUNTO DA TEMPERATURA (Equivalente em 100m) mm					
SUPORTE	ALAVANCA PRINCIPAL	BRAÇO MENOR	BRAÇO MAIOR	FIXADORES (2%)	EFEITO TOTAL
0,33990	0,11000	0,00887	0,08865	0,05500	0,60241
0,29463	0,09500	0,00766	0,07645	0,04750	0,52124
0,26426	0,08500	0,00685	0,06858	0,04250	0,46719
0,18768	0,06000	0,00484	0,04851	0,03000	0,33104

Ela é bastante esclarecedora no que se refere aos efeitos da temperatura. A última coluna, que apresenta a resultante dos efeitos conjuntos para a distância de 100m, demonstra que o efeito da variação de $\Delta t = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ na temperatura não atinge 1 mm / 100m, ou seja, é inferior à resolução pretendida para o equipamento.

5.3.2 Efeitos Geométricos

Uma das preocupações na construção do equipamento é a posição relativa do sensor óptico à superfície refletora, o que conduz à seguinte pergunta: será que se houver inclinação da superfície refletora em relação ao sensor as leituras se alterariam?

5.3.2.1 Inclinação da superfície refletora

Para respondê-la foi alterada a posição do sensor afixado à barra de paralaxe (item 5.5 – Determinação da resolução do sensor óptico) de forma a experimentar diversas rotações tanto em torno do eixo X do sensor (aproximadamente disposto transversalmente à direção de movimentação da barra) quanto do seu eixo Y (aproximadamente disposto longitudinalmente à direção de movimentação da barra). Nestas diferentes posições efetuaram-se medidas como no caso da avaliação da resolução e observou-se que não há influência no número de pulsos emitidos. Isto significa dizer que se o sensor, por construção do equipamento, estiver inclinado em relação à superfície refletora não haverá alteração das observações.

A inclinação da superfície refletora em relação ao sensor não altera sua capacidade resolutiva, mas especial cuidado deve ser tomado com relação à distância compreendida entre os dois. Existe um limite de aproximação e distanciamento entre os quais a superfície deve estar. Se, no processo de construção ou montagem, isto não

for observado o sensor degenera a leitura e introduz valores que não expressam a realidade. Uma característica desta situação é observada já na instalação do equipamento. Este começa a efetuar leituras continuamente dando a impressão da presença de vibrações ou de uma sensibilidade altíssima inexistente. Traçando-se o gráfico destes dados, observamos variações sempre num mesmo sentido em pequeno espaço de tempo além do surgimento de degraus.

5.3.2.2 Curvatura da superfície refletora

A curvatura da superfície refletora pode ocasionar leituras erradas pelo sensor.

Este assunto será abordado no tópico 5.5.

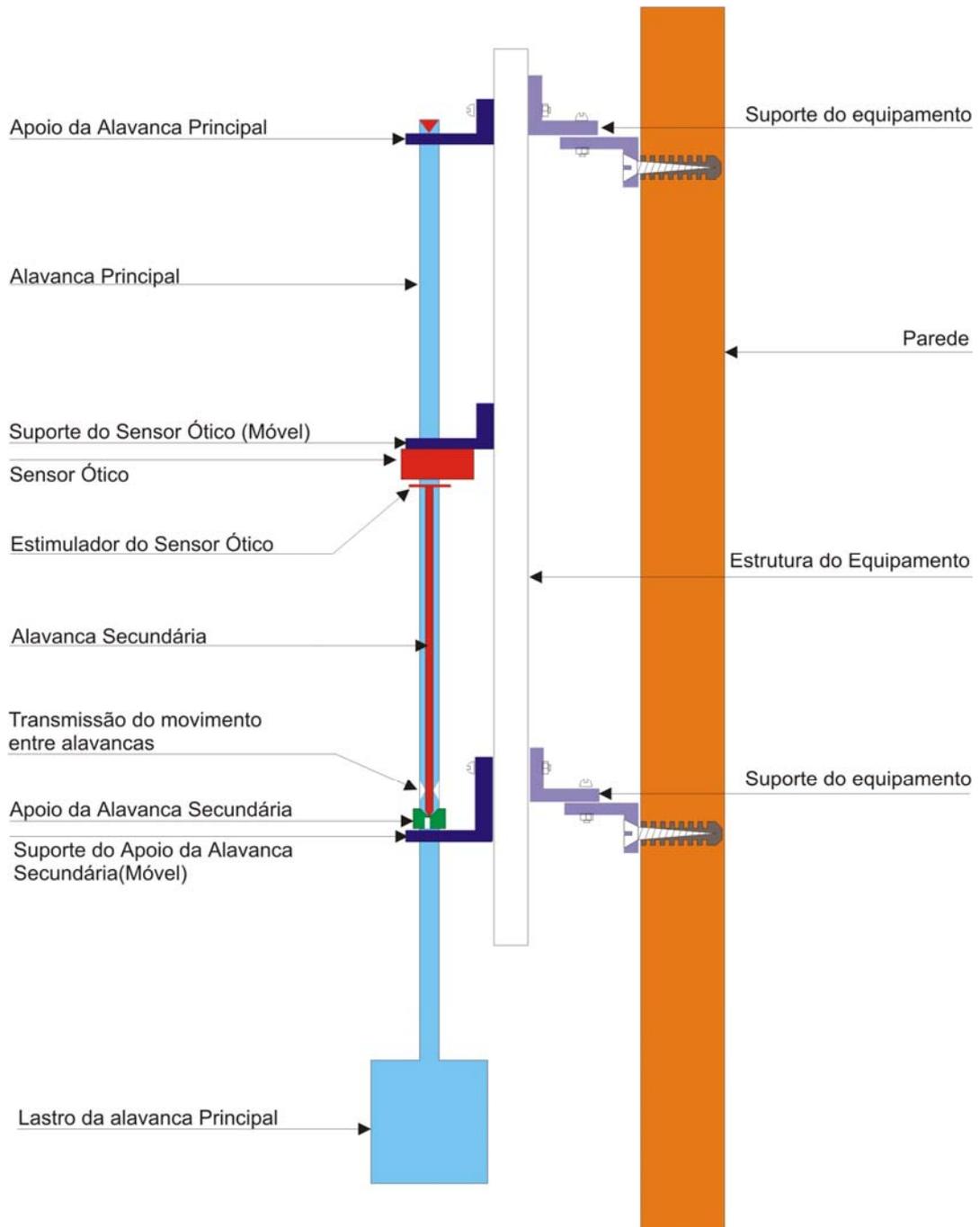
5.4 ARQUITETURA DO PROTÓTIPO

Após a análise dos efeitos da temperatura e geométricos surgiu a seguinte questão: seria possível construir o equipamento de forma que, mesmo sujeito à interferência da temperatura, suas leituras fossem isentas de tal influência? A resposta é sim. Como pode ser observado na figura 37, que apresenta o modelo do protótipo M23, algumas providências foram tomadas. Inicialmente utilizou-se o mesmo tipo de material para a estrutura do equipamento e para o pêndulo principal. Desta maneira os efeitos experimentados por um também o serão pelo outro segundo um mesmo coeficiente de dilatação. A distância entre o início do pêndulo principal até o local em que situa-se a conexão entre alavancas é igual à distância compreendida entre os pontos de fixação dos suportes do pêndulo principal e do suporte da alavanca secundária. Com este procedimento o ponto de aplicação da força transmitida sobre a alavanca secundária permanece o mesmo. Isto evita alteração do movimento do braço maior da alavanca secundária em função da mudança do ponto de aplicação da força. Outro cuidado é a utilização de suportes de mesmo material. Como ambos deslocam-se na mesma proporção todo o sistema movimenta-se paralelamente à estrutura do equipamento evitando a injeção de deslocamentos horizontais diferenciais entre o suporte da alavanca secundária e ponto de aplicação da força.

Devido à necessidade de menor massa da alavanca secundária, o braço maior foi construído em alumínio. Embora seu coeficiente de dilatação possa ser quase o dobro do outro material utilizado, o efeito limita-se apenas a uma aproximação do ativador ao sensor ótico (este valor é da ordem de 0,02695 mm). Em termos de deslocamento paralelo do ativador ao sensor, este equivale a 0,0002444 mm, correspondente a 0,00349 mm em 100 m (não significativo segundo os objetivos para o equipamento).

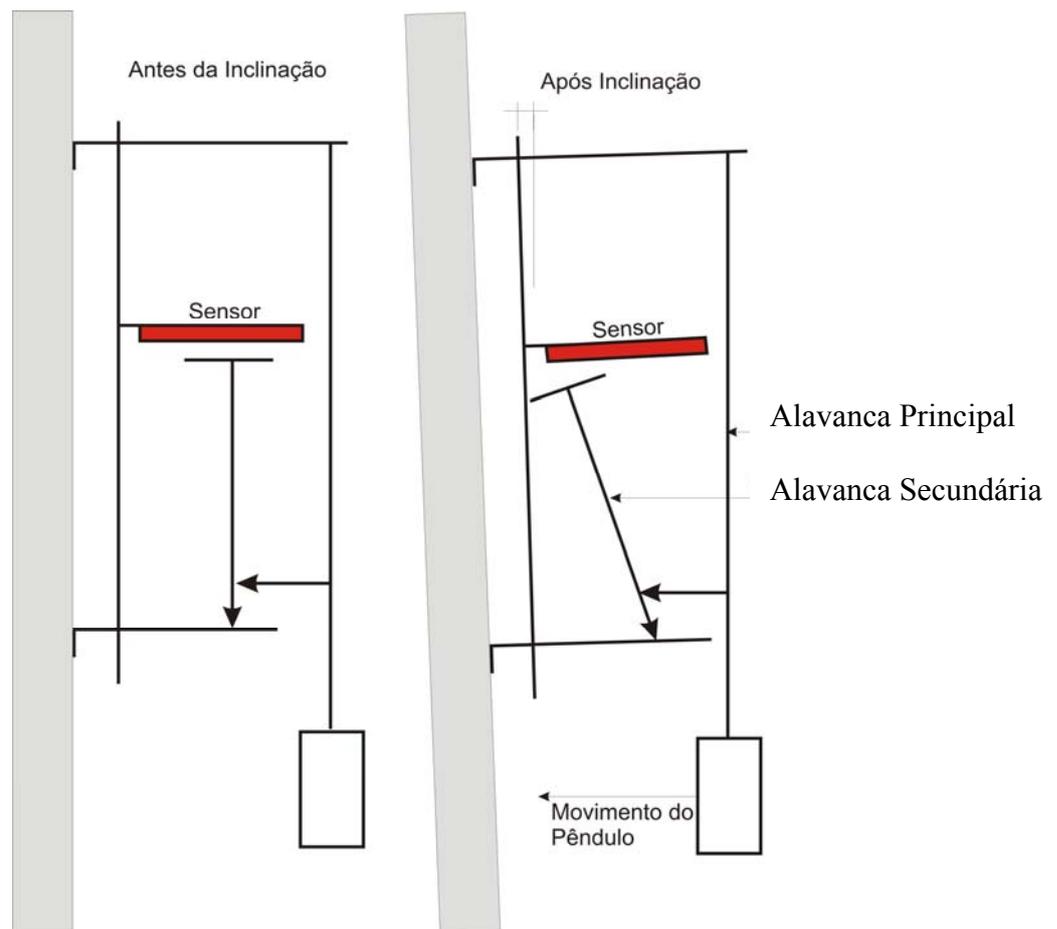
FIGURA 37 – ESQUEMA GERAL DO MODELO M23

Inclinômetro Foto Mecânico - M23 Esquema Geral



A figura 38 apresenta um desenho esquemático do funcionamento do inclinômetro. Nela são apresentados dois momentos do equipamento: antes e após a inclinação. Da comparação das duas situações observa-se a movimentação da alavanca principal em direção ao suporte. Neste percurso observa-se que ela transmite o seu movimento à alavanca secundária que, por sua vez, está conectada ao estimulador do sensor ótico. Este deslocamento é medido pelo sensor ótico contando o número de pulsos emitidos por ele. O número observado de pulsos pode ser convertido para distância deslocada utilizando os parâmetros de calibração.

FIGURA 38 – ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO MODELO M23



5.5 DETERMINAÇÃO DA RESOLUÇÃO DO SENSOR ÓTICO

Para a determinação preliminar da resolução empregou-se inicialmente um equipamento denominado barra de paralaxe (figura39). Este equipamento nada mais é do que um dispositivo cuja finalidade é a medida de distâncias. A particularidade é sua capacidade de medir com precisão de 50 centésimos do milímetro.

FIGURA 39 - FOTO DA BARRA DE PARALAXE

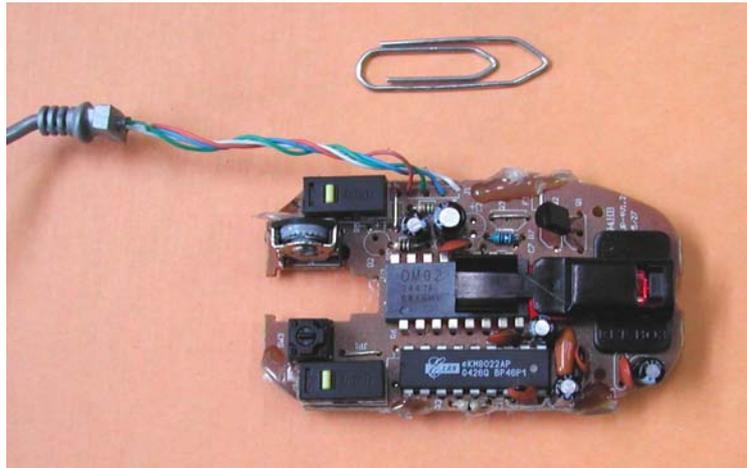


Um dispositivo destes teve uma de suas extremidades fixada numa superfície, enquanto a outra teve seus movimentos limitados por réguas presas a ela, de maneira a guiar o deslocamento segundo um único eixo. O sensor ótico (figura 40) foi afixado à barra de paralaxe de maneira que o movimento experimentado pela sua extremidade móvel seria igualmente transmitido ao sensor. Abaixo do sensor foi instalada uma superfície de papel de forma que ele detectasse sua presença, produzindo assim pulsos à medida que se movimentasse em relação à superfície.

Utilizando-se do parafuso de movimentação da barra de paralaxe foram efetuadas repetidas operações percorrendo um percurso de 30 mm. Durante estas operações o software de coleta de dados permaneceu ativado permitindo a obtenção do número de pulsos emitidos pelo sensor para o deslocamento.

Durante o processo utilizou-se uma lupa para melhorar a visualização das marcas numéricas de referência do parafuso da barra, facilitando a correta coincidência de traços.

FIGURA 40 - SENSOR ÓTICO QUE FOI AFIXADO À BARRA (MOUSE)



Com o intuito de evitar o efeito das folgas do sistema mecânico da barra, foram efetuadas as leituras sempre num mesmo sentido de rotação do parafuso. Os intervalos de leitura foram de 5mm, entre 0 e 30 mm da distância total, para verificar se poderia haver algum efeito cumulativo de pulsos ao longo do percurso total (o que não ocorreu).

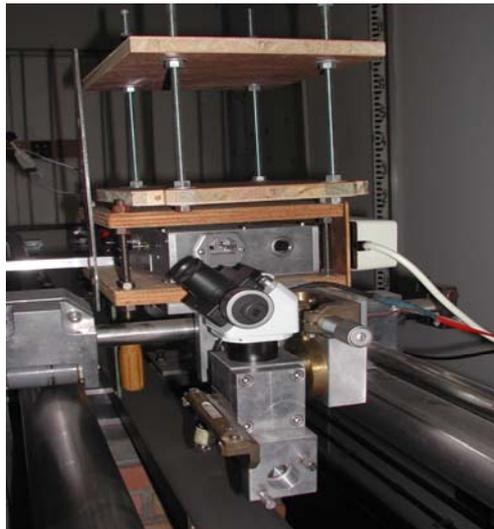
Considerando os resultados destes procedimentos chega-se ao valor médio de 670,7 pulsos emitidos para a distância de 30 mm, o que corresponde à resolução de 0,04473 mm/pulso para o sensor testado.

Outra verificação efetuada foi utilizando-se do interferômetro a laser instalado no LAIG - Laboratório de Instrumentação Geodésica do Departamento de Geomática da Universidade Federal do Paraná (figuras 41 e 42). Este interferômetro tem resolução da ordem 10^{-9} mm.

FIGURA 41 – INTERFERÔMETRO DO LAIG



FIGURA 42 – CARRO DO INTERFERÔMETRO



O procedimento adotado foi semelhante ao experimento anterior. Fixou-se o sensor ao braço do carro transportador do refletor do interferômetro (item 7.1, figura 47) de forma a percorrer paralelamente uma superfície estimuladora do sensor óptico. Com o software de coleta de dados ativado, obteve-se o número de pulsos emitidos pelo sensor equivalente ao trajeto percorrido. Foram feitas 21 leituras para o percurso de 20mm e os resultados obtidos são apresentados na tabela 16.

TABELA 16 – DIFERENÇAS DE LEITURAS

Análise de Diferenças de Leituras para 20 mm de deslocamento da Alavanca Principal			
X	Y	Distância (pulsos)	Resolução (mm/pulso)
30	448	449,00334	0,04454
32	447	448,14395	0,04463
31	448	449,07126	0,04454
31	448	449,07126	0,04454
32	447	448,14395	0,04463
30	445	446,01009	0,04484
31	446	447,07606	0,04474
32	446	447,14651	0,04473
29	448	448,93763	0,04455
32	448	449,14140	0,04453
30	449	450,00111	0,04444
31	447	448,07365	0,04464
29	448	448,93763	0,04455
31	448	449,07126	0,04454
30	449	450,00111	0,04444
31	445	446,07847	0,04484
33	447	448,21647	0,04462
32	449	450,13887	0,04443
31	445	446,07847	0,04484
29	448	448,93763	0,04455
31	449	450,06888	0,04444
30,85714	447,38095	448,44519	0,04460
1,10841	1,32198	1,30598	0,00013

O gráfico 2 apresenta as leituras obtidas do interferômetro. O intervalo de observação é de 20mm (espaço percorrido pelo sensor sobre a área de leitura) e o período de observação em cada posição é de aproximadamente 10 segundos. Os picos e vales correspondem à posição 0,0 mm e 20,0 mm onde o sensor ficou estacionado durante o processo de leitura.

O gráfico 3 apresenta os mesmos dados após a aplicação de um filtro que converte a diferença entre as leituras nas duas posições. A tabela 16 contém o resumo numérico das diferenças das leituras nos picos e vales do gráfico 2.

Como houve deslocamento do pêndulo principal segundo uma direção não perpendicular a um dos eixos as diferenças em X e Y representam componentes do vetor deslocamento. A distância real percorrida é obtida a partir destas componentes. A quarta coluna corresponde à resolução observada do sensor. As últimas duas linhas da tabela contêm respectivamente a média e desvio padrão para a amostragem apresentada.

GRÁFICO 2 - LEITURAS INTERFEROMÉTRICAS

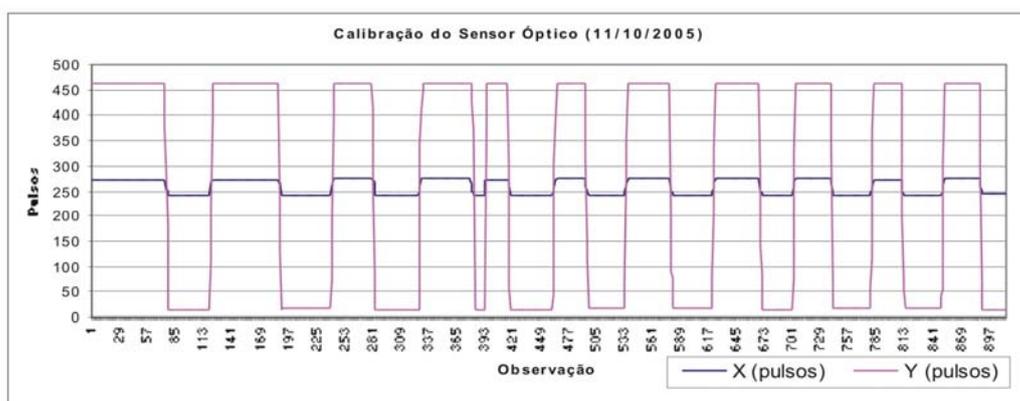
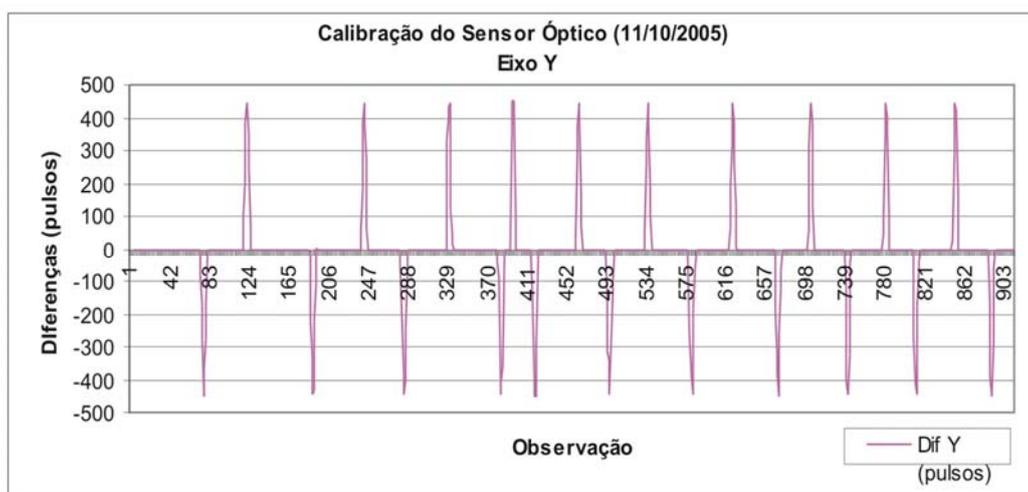


GRÁFICO 3 – LEITURAS INTERFEROMÉTRICAS APÓS FILTRAGEM



A resolução efetiva do sensor (0,04460 mm/pulso) é diferente da resolução nominal (0,03175 mm/pulso). Esta resolução é que deve ser aplicada para o cálculo dos comprimentos dos braços da alavanca secundária em função da sensibilidade

pretendida para o equipamento. As resoluções obtidas com a barra de paralaxe (0,04473 mm/pulso) e utilizando o interferômetro (0,04460 mm/pulso) apresentaram valores semelhantes. A diferença entre as duas determinações ocasionaria uma variação de avaliação de 0,024mm/100m por pulso emitido. O sensor cuja resolução nominal é de 800 pulsos por polegadas tem, na realidade, 568,96 pulsos/polegada. Observe que com esta resolução os cálculos estimativos para construção do protótipo devem ser alterados no que se refere ao ganho da alavanca secundária, motivo pelo qual a avaliação da resolução real do sensor óptico deve ser efetuada antes da determinação da relação entre os braços da alavanca secundária (quadro 2, página 74).

6 CALIBRAÇÃO DO PROTÓTIPO

A construção do protótipo baseou-se em dimensões teóricas, adequadas à resolução pretendida, e na resolução nominal do sensor ótico. Como observado no anteriormente, o sensor apresenta sensibilidade menor que a nominal. Tendo em conta que o objetivo é construir um equipamento a custo baixo, o uso de técnicas sofisticadas para correto dimensionamento dos componentes ao longo do processo construtivo seria incompatível com aquele objetivo. Por este motivo optou-se por construí-lo o mais próximo do projeto teórico porém deixando os efeitos das diferenças projeto-protótipo para serem incorporadas nos parâmetros obtidos no processo de calibração.

6.1 OBJETIVOS DA CALIBRAÇÃO

Determinar o ângulo da matriz de rotação (que transforma o valor observado em valores segundo a normal e à tangente à estrutura em estudo), o FAE- Fator de Ampliação Específico do equipamento, sua resolução, e a constante K do equipamento.

6.2 PROCEDIMENTOS TEÓRICOS PARA CALIBRAÇÃO

6.2.1 Ângulo de Rotação e FAE

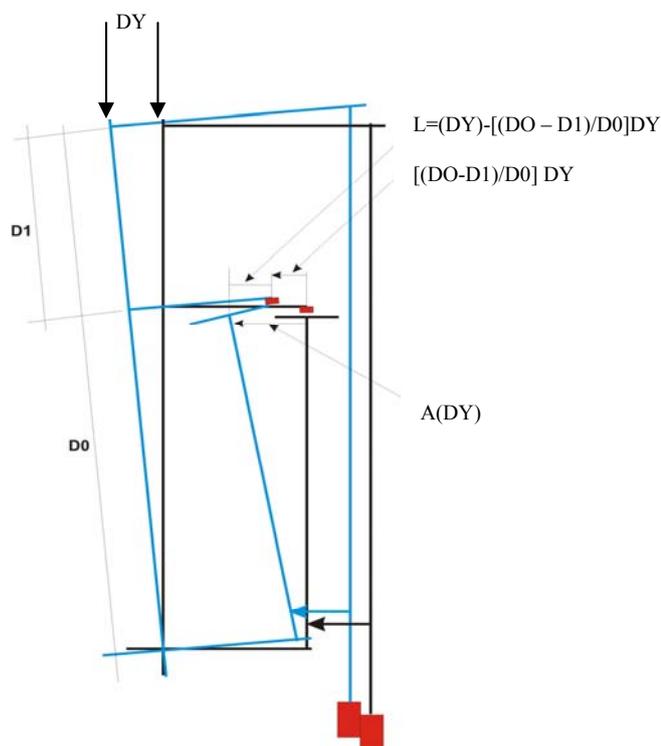
Durante o processo de construção e instalação do equipamento, a orientação dos eixos X e Y do sensor ótico, aproximadamente segundo a normal e a paralela à estrutura, é desconhecida. Durante aquele processo procura-se dispor os componentes de tal forma que os eixos do sensor ótico fiquem orientados em relação à estrutura do equipamento mas, a orientação perfeita, encareceria sua produção além de exigir

equipamentos complementares sofisticados. Para solucionar tal problema optou-se pela aplicação de matrizes de rotação para converter os dados brutos em equivalentes segundo as direções desejadas. Neste sentido, durante a calibração que se dá no próprio local de instalação do equipamento, tanto os cossenos diretores como o fator de ampliação específico (FAE) do equipamento são determinados. Este fator corresponde ao ganho real em ampliação do equipamento, uma vez que depende do valor real das dimensões da alavanca secundária e da posição precisa onde o conector entre alavancas se situa. Para sua obtenção, uma vez instalado, introduz-se uma inclinação previamente conhecida no equipamento. A diferença das leituras obtidas antes e depois da variação introduzida é utilizada para as duas determinações comentadas.

6.2.2 Constante K

A figura 43 apresenta o esquema de funcionamento do inclinômetro.

FIGURA 43 – FUNCIONAMENTO DO INCLINÔMETRO



Nesta figura estão desenhadas as duas situações do equipamento - antes e após a inclinação da estrutura. Para efeito de estudo admite-se que toda a inclinação se dê segundo a componente Y do deslocamento, perpendicular à parede. D0 é a distância entre os apoios da alavanca principal e da alavanca secundária. D1 é a distância entre o apoio da alavanca principal e o suporte do sensor. Observe que o sensor óptico sofre um deslocamento proporcional à distância (D0-D1) compreendida entre sua posição e o local onde está o apoio da alavanca secundária. A medida que o sensor se afasta do apoio da alavanca secundária (aumenta a distância D0-D1) sua movimentação cresce de 0,0 mm até atingir o máximo DY (variação total de inclinação do equipamento) se estivesse colocado no apoio da alavanca principal. Uma vez construído o equipamento, a relação (D0-D1)/D0 é constante e característica daquele equipamento. Denominaremos esta constante de K. Toda leitura efetuada pelo equipamento conterà uma componente relativa a este efeito.

O inclinômetro foi desenvolvido com o objetivo de permitir obter a diferença de leituras entre momentos diferentes. Tendo-se isto em mente pode-se escrever:

$$K = [(D0 - D1) / D0]$$

Uma leitura genérica será:

$$L_i = A DY_i - K DY_i$$

onde L_i é a leitura efetuada no instante i , A é o ganho específico da alavanca secundária do equipamento, DY_i é a inclinação sofrida pelo equipamento no instante i .

Observa-se que quanto maior o deslocamento maior o efeito causado pelo termo que contém K.

A determinação do valor de K pode ser feita em dois passos: inicialmente introduz-se uma inclinação predeterminada diretamente na conexão entre alavancas, sem haver inclinação da estrutura do equipamento, obtendo-se uma leitura do tipo

$$L_1 = A DY_1$$

sujeita exclusivamente à ampliação A da alavanca secundária; no segundo passo introduzimos a mesma inclinação na estrutura do equipamento obtendo uma leitura influenciada pelo efeito de k do tipo

$$L_2 = A DY_1 - K DY_1$$

A diferença entre as leituras será

$$L_2 - L_1 = (A DY_1 - K DY_1) - A DY_1$$

$$L_2 - L_1 = -K (DY_1)$$

Como os valores de L_2 , L_1 e DY_1 são conhecidos calcula-se o K

$$K = -(L_2 - L_1) / (DY_1)$$

Uma vez conhecido o valor de K pode-se corrigir as leituras seguintes para a determinação dos demais parâmetros de calibração.

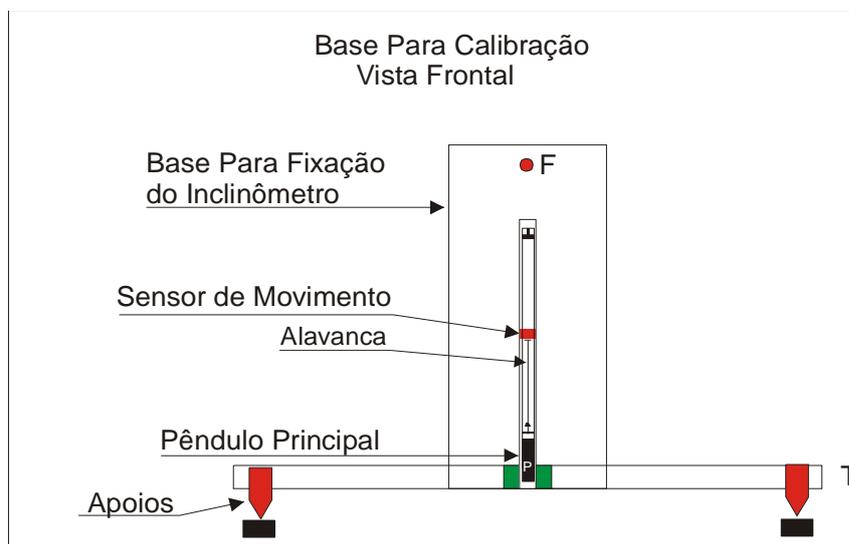
6.3 BASE PARA CALIBRAÇÃO

A figura 44 apresenta o esquema de um instrumento de calibração que também poderá ser usado como suporte para o equipamento em serviço. Trata-se de uma base apoiada em 2 pontos, sendo que um terceiro ponto F (situado na parte superior do dispositivo) dispõe de um equipamento de medida de distância (paquímetro por exemplo ou uma lâmina de calibração com espessura previamente determinada).

O protótipo do equipamento é, então, afixado ao dispositivo. Atuando-se sobre o paquímetro localizado em F , pode-se introduzir variações de inclinações pré-estabelecidas, o que fornece o valor esperado para o deslocamento em X e Y do braço maior da alavanca de ampliação do movimento. A leitura fornecida pelo equipamento

fornece o valor observado. A utilização de ambos permite a obtenção de uma matriz de transformação valor observado – valor esperado e do fator de ampliação específico.

FIGURA 44 - MODELO DE BASE PARA CALIBRAÇÃO



6.4 DETERMINAÇÃO DA MATRIZ DE ROTAÇÃO E FATOR DE AMPLIAÇÃO ESPECÍFICO (FAE)

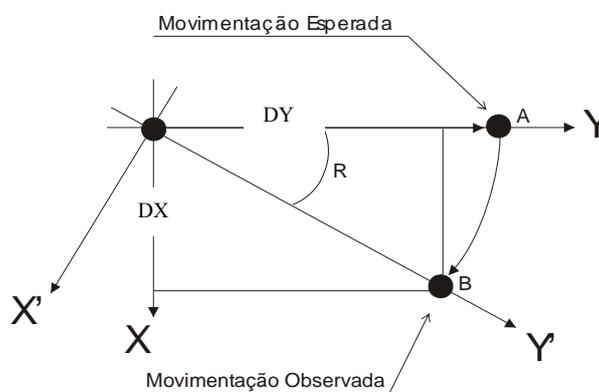
Admitindo-se que: eixos F e T do dispositivo de calibração (estrutura metálica na forma de uma letra T invertida) são perfeitamente perpendiculares; os apoios perfeitamente nivelados; fixação correta do protótipo à base de fixação e o eixo Y do sensor perfeitamente perpendicular ao suporte do protótipo. Nestas condições a introdução de inclinações, no ponto F do eixo vertical, causaria movimentos somente ao longo do eixo Y do sistema de coordenadas do sensor de movimento (figura 45). Na hipótese de mau nivelamento dos apoios o deslocamento ainda se daria paralelamente ao eixo Y, o que dispensa a necessidade de alta precisão para este ajuste. O aparecimento de uma componente X indicará um desvio da orientação do sensor em relação à situação ideal. Pode-se, contudo, determinar o valor do ângulo de rotação

através da relação trigonometria entre as componentes X e Y. Veja a situação apresentada na figura 45.

O ponto A representa a posição esperada do pêndulo após a introdução da inclinação. O ponto B é a posição efetivamente ocupada. Os elementos DX e DY permitem calcular o ângulo R que corresponde à rotação proveniente do não alinhamento do sistema de coordenadas com o suporte.

Para transformar o valor observado no esperado pode-se recorrer a operação de rotação de sistemas de coordenadas. Na figura 45 observa-se o sistema XY. Este sistema representa os valores que as coordenadas observadas de B deveriam ter se Y não estivesse rotacionado de R.

FIGURA 45 - MOVIMENTAÇÕES ESPERADA E OBSERVADA



Para relacionar os dois sistemas utiliza-se as equações:

$$\begin{aligned} X' &= X \cos (R) + Y \operatorname{sen} (R) \\ Y' &= -X \operatorname{sen} (R) + Y \cos (R) \end{aligned}$$

onde (X ; Y) são valores observados, (X' ; Y') os valores esperados e R ângulo de rotação.

A determinação do fator de ampliação específico pode ser feita a partir da relação entre valor introduzido e valor observado. O valor observado é fornecido em pulsos, tanto na direção X quanto na direção Y. Como se trata de valores relativos à posição inicial a distância observada pode ser calculada através de

$$D = (DX^2 + DY^2)^{1/2}$$

onde DX e DY são as variações em pulsos, com resultado em pulsos. A relação entre este número de pulsos convertido para mm utilizando a resolução ótica determinada e o valor introduzido em mm dá o fator de ampliação específico do equipamento, independentemente do ponto onde haja conexão entre alavancas. Este fator é resultante da composição do ganho da alavanca secundária e da posição em que as alavancas se conectam.

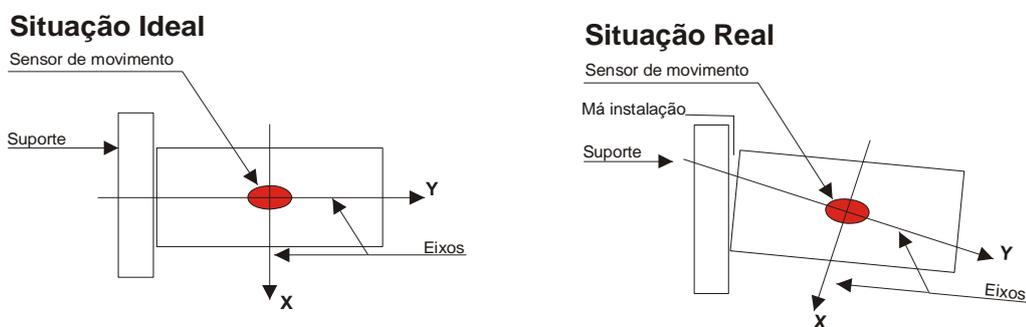
Caso não tivesse sido obtido no momento da determinação da constante K do equipamento, para a determinação do ganho da alavanca secundária seria necessário o conhecimento preciso da conexão entre alavancas. Se a conexão entre elas, por exemplo, se der exatamente na metade da alavanca principal, o valor da inclinação introduzida a ser utilizado para determinação do ganho deve ser metade do valor total. Por exemplo, se for introduzida uma inclinação de 2mm na estrutura do instrumento a extremidade livre da alavanca principal toda se moverá da mesma quantia. O ponto médio, onde o conector entre alavancas está instalado, no entanto, mover-se-á apenas metade (1mm). Esta quantia é que deve ser relacionada com o número de pulsos observados para calcular o ganho, que é a relação entre os braços da alavanca secundária. O FAE é quem permitirá transformar as leituras subseqüentes em mm, sejam na direção X ou Y.

6.5 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PARA CALIBRAÇÃO

O sensor de movimento utilizado é um “mouse” óptico de sensibilidade nominal equivalente a 800 pulsos por polegada. Estes sensores são capazes de medir pulsos em duas direções X e Y. Não há, no entanto, como se saber, previamente, onde estes eixos se localizam no sensor (figura 46). Para uso como acessório no computador este detalhe não merece atenção alguma porém, neste caso, assume importância fundamental pois é justamente a movimentação em relação a eles é que interessa. A situação ideal é que estivessem corretamente orientados em relação ao suporte, isto é, o eixo Y perpendicular a ele enquanto o eixo X em posição paralela. Nesta situação ter-se-ia o eixo Y normal à parede e o eixo X paralelo a esta.

Além da possibilidade de orientação inadequada do sistema de coordenadas no próprio sensor ainda existe a de que o sensor esteja mal instalado na estrutura do equipamento em si. Neste caso, o ângulo de rotação obtido do procedimento de calibração terá uma componente adicional proveniente deste problema (embutida nos cossenos diretores determinados).

FIGURA 46 - SITUAÇÕES IDEAL E REAL DO SISTEMA DE COORDENADAS DO SENSOR ÓPTICO



A tabela 17 apresenta o processo de calibração do inclinômetro utilizando dados de um experimento (injeção de 2mm na inclinação do equipamento) desenvolvido no LAIG-Laboratório de Instrumentação Geodésica da Universidade Federal do Paraná. Ela mostra como se obtém os parâmetros para transformação dos dados observados para dados reduzidos, isto é, componentes perpendicular e paralela à estrutura. O resultado de seu emprego é a obtenção do ângulo de rotação e do fator de ampliação específico daquele instrumento.

TABELA 17 - DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO DO INCLINÔMETRO FOTO MECÂNICO

OBSERVAÇÕES	OBS.	INCLINAÇÃO INJETADA NO EQUIPAMENTO (mm)	DADOS BRUTOS (pulsos) (Média de 30 observações)		VARIAÇÃO (pulsos)		Ângulo de rotação por teste (rad)	Ângulo médio de rotação vezes (-1) (rad)	Dados Rotados (pulsos)		Variações (pulsos rotados)		FAE por observação (rad)	FAE - Fator de Ampliação Específico	Inclinação a 100m segundo eixos X e Y na altura de 1m (mm)		VERIFICAÇÃO
			X	Y	DX	DY			X	Y	X	Y			X	Y	
DADOS PARA CALIBRAÇÃO INICIAL (0,5mm)	A	2,00	272	463	-30	-449	0,066716		240,42	480,16	0,10	-	10,044668		0,05	-200,67	2,01
	B	0,00	242	14				-0,066940	240,52	30,16				10,011261			
	A	2,00	272	462	-30	-446	0,067163		240,49	479,16	-	-	9,977853		-0,05	-199,33	1,99
	B	0,00	242	16					240,39	32,15	0,10	447,01					
DADOS PARA CALIBRAÇÃO FINAL (0,5mm)	A	2,00	272	463	-30	-449	0,066716		240,42	480,16	0,10	-	10,044668		0,05	-200,67	2,01
	B	0,00	242	14				-0,066940	240,52	30,16				10,011261			
	A	2,00	272	462	-30	-446	0,067163		240,49	479,16	-	-	9,977853		-0,05	-199,33	1,99
	B	0,00	242	16					240,39	32,15	0,10	447,01					
RESOLUÇÃO DO SENSOR ÓTICO:		0,0446429	Conexão entre alavancas (m)		1			-	0,0669397				FAE médio:	10,011261			2,00

A tabela 18 apresenta a aplicação dos parâmetros obtidos na tabela 17 a dados observados. Como consequência, calcula-se as componentes da inclinação a 100m de distância correspondente aos dados observados pelo inclinômetro bem como a variação entre um dado e seu anterior. Os resultados apresentados nas tabelas anteriores referem-se apenas a parte dos dados coletados por ocasião de um experimento desenvolvido no LAIG. As duas primeiras linhas da tabela 18 contêm dados utilizados para calibração. Isto foi feito para verificar se a metodologia de cálculo estava corretamente programada.

Observa-se que houve uma diferença entre os valores introduzidos e os obtidos após a conversão dos dados brutos utilizando os parâmetros obtidos na calibração. Estas diferenças foram de apenas 0,33mm a 100m. Nos itens 7.1.1, 7.1.2 e 7.1.3 são discutidas as causas possíveis para tal diferença.

TABELA 18 - APLICAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO AOS DADOS OBSERVADOS

OBS.	DADOS BRUTOS Posições da alavanca secundária. (pulsos)		Variação de inclinação da alavanca secundária do equipamento relativas à primeira observação (pulsos)		Ângulo médio de rotação (rad)	Dados Brutos Rotados (pulsos)		Variações de inclinação da alavanca secundária relativas ao Início (pulsos) segundo eixos rotacionados X e Y		Fator de escala médio do equipamento	Inclinação do Equipamento (mm)		Correspondência para altitude de 100m (mm)		Variação em relação à observação anterior (mm) na altura da conexão (mm)		Variação em 100m correspondente à variação relativa à observação anterior (mm)	
	X	Y	DX	DY		X	Y	X	Y		X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1	272	463				240,42	480,16				0,00	0,00	0,00	0,00				
2	242	14	-30	-449	-0,066940	240,52	30,16	0,1	-450,0	10,011261	0,00	-2,01	0,04	-200,67	0,00	-2,01	0,04	-200,67
3	272	380	0	-83	-0,066940	245,97	397,34	5,6	-82,8	10,011261	0,03	-0,37	2,48	-36,93	0,02	1,64	2,43	163,74
4	252	290	-20	-173	-0,066940	232,04	306,21	-8,4	-174,0	10,011261	-0,04	-0,78	-3,74	-77,57	-0,06	-0,41	-6,21	-40,64
5	251	180	-21	-283	-0,066940	238,40	196,39	-2,0	-283,8	10,011261	-0,01	-1,27	-0,90	-126,54	0,03	-0,49	2,84	-48,97
6	242	14	-30	-449	-0,066940	240,52	30,16	0,1	-450,0	10,011261	0,001	-2,01	0,04	-200,67	0,01	-0,74	0,95	-74,13
7	268	112	-4	-351	-0,066940	259,91	129,68	19,5	-350,5	10,011261	0,09	-1,56	8,69	-156,29	0,09	0,44	8,64	44,38
8	270	217	-2	-246	-0,066940	254,88	234,57	14,5	-245,6	10,011261	0,07	-1,09	6,45	-109,51	-0,02	0,47	-2,24	46,78
9	271	398	-1	-65	-0,066940	243,77	415,24	3,4	-64,9	10,011261	0,02	-0,29	1,49	-28,95	-0,05	0,81	-4,95	80,56

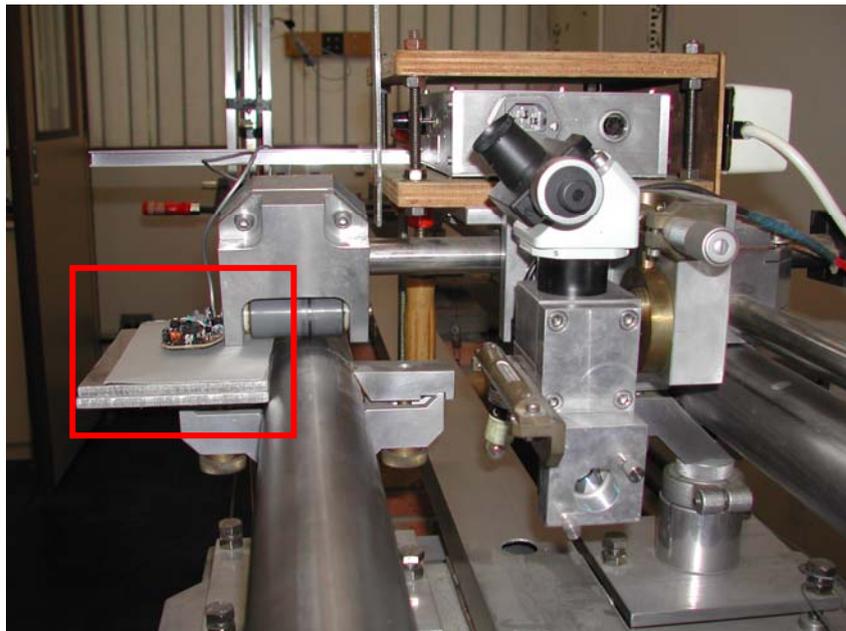
7 - EXPERIMENTOS REALIZADOS

7.1 TESTE DO SENSOR ÓTICO

A primeira etapa para o processo de desenvolvimento (dimensionamento) do inclinômetro é a determinação da resolução do sensor óptico.

Basicamente o processo constituiu-se em prender o sensor óptico ao carro do interferômetro (figura 47) disponível no LAIG e fixar uma superfície refletora de forma que as leituras possam ser realizadas pelo sensor, enquanto o software de coleta de dados permane ativado. O carro foi deslocado e o percurso foi medido utilizando o interferômetro. Foram consideradas 6 casas decimais do milímetro para marcação do deslocamento, embora a segunda casa decimal corresponda a 1mm em 100m de altura e a quarta casa decimal corresponda a 1/100 de milímetro àquela distância.

FIGURA 47 - CARRO DO INTERFERÔMETRO COM SENSOR ÓTICO AFIXADO



7.1.1 Leituras Aleatórias

A tabela 19 apresenta (amostra) resultados de observações em um dos experimentos desenvolvidos. As coordenadas X e Y são referenciadas ao sistema de coordenadas do sensor ótico. Neste caso em particular utilizou-se deslocamentos variados (segunda coluna da tabela) e, para cada um deles, foi calculada a resolução correspondente ao número de pulsos obtido por polegada. A terceira e quarta colunas contêm os valores de X e Y no início do intervalo e no final. Os elementos intermediários foram suprimidos nesta tabela pois apenas os limites interessam. As colunas 5 e 6 têm as variações DX e DY das coordenadas, em pulsos, correspondentes às distâncias contidas na coluna 2 (um exemplo do arquivo original de observação, produzido pelo software de coleta de dados, é apresentado após a tabela 19). Analisando-se a última coluna pode-se observar uma grande variação nos valores de resoluções e, ainda, um grande desvio padrão (73,3 pulsos).

Observação	Deslocamentos Aleatórios (pulsos)						Resolução
	(mm)	X	Y	DX	DY	D	
1	11,54	349	323				
		328	499	21	-176	177,248	375
2	12,22	402	178				
		446	51	-44	127	134,406	284
3	6,91	409	332				
		365	400	44	-68	80,994	298
4	8,52	212	343				
		235	293	-23	50	55,036	164
5	10,80	407	317				
		355	436	52	-119	129,865	299
6	9,02	396	245				
		417	171	-21	74	76,922	217
						Média	273,2
						Φ	73,3

DISTÂNCIA
D M A H M S DIA.XXXX x y
11,54 MM
12 04 06 11 49 00 0,000026215 349 323
12 04 06 11 50 06 0,000790833 328 499
12,22
12 04 06 11 51 49 0,000007766 402 178
12 04 06 11 52 28 0,000459525 446 51
6,91
12 04 06 11 53 55 0,000001447 409 332
12 04 06 11 54 27 0,000372720 365 400
8,52
12 04 06 11 58 28 0,000008681 212 343
12 04 06 11 59 13 0,000530417 235 293
10,80
12 04 06 12 00 36 0,000001447 407 317
DISTÂNCIA
12 04 06 12 01 05 0,000337998 355 436
9,02
12 04 06 13 33 30 0,000006690 396 245
12 04 06 13 33 58 0,000330764 417 171

Em função da grande disparidade de leituras observada, diversos experimentos foram desenvolvidos. A tabela 20 apresenta os resultados de um deles. Também nesta situação, intervalos de leitura de 1mm, o mesmo problema apresentou-se. Grande variação das resoluções obtidas e um desvio padrão exagerado para a finalidade a que se propõem o equipamento.

Diante desta situação algum fenômeno, não previsto, estaria acontecendo, pois pelo senso comum seria inadmissível a existência de um sensor ótico tão irregular. Após observação acurada do equipamento percebeu-se que a superfície refletora apresentava um encurvamento e, então, procurou-se corrigir aquela característica para verificar se poderia ser ela a causa das observações ruins. Executou-se um novo experimento, cujos resultados estão reunidos na tabela 21. O intervalo de leitura de 1mm foi novamente utilizado. Observou-se, coluna 8 da tabela, uma melhora

significativa nos resultados e, conseqüentemente uma redução marcante no desvio padrão.

TABELA 20 – RESOLUÇÃO DO SENSOR ÓTICO – SUPERFÍCIE IRREGULAR							
Observação	Deslocamentos iguais a 1mm						Resolução (ppp)
	(mm)	X (pulso)	Y (pulso)	ΔX (pulso)	ΔY (pulso)	D (pulso)	
1	1	380	308				
	1	379	318	1	-10	10,050	255,2
2	1	203	280				
	1	202	285	1	-5	5,099	130,4
3	1	390	295				
	1	394	311	-4	-16	16,492	419,3
4	1	358	303				
	1	324	330	34	-27	43,417	1103,1
5	1	658	335				
	1	660	337	-2	-2	2,828	72,7
6	1	387	266				
	1	350	314	37	-48	60,605	1539,3
7	1	418	326				
	1	420	214	-2	112	112,018	2845,5
8	1	476	359				
	1	472	379	4	-20	20,396	518,2
9	1	211	276				
	1	215	295	-4	-19	19,417	493,5
10	1	633	276				
	1	633	307	0	-31	31,000	787,3
11	1	330	333				
	1	322	353	8	-20	21,541	547,7
12	1	146	302				
	1	139	299	7	3	7,616	193,2
13	1	634	305				
	1	629	318	5	-13	13,928	353,8
						Média	712,0
						Φ	760,9

Outro experimento, agora com intervalos aleatórios e de 0,5mm de deslocamento (equivalentes a 50 mm a 100 m de distância), foi desenvolvido e os resultados apresentados na tabela 22. Comparando-se os dois experimentos pode-se notar a estabilidade das leituras, das resoluções observadas e do desvio padrão. Um novo experimento confirmou a regularidade da resolução para o sensor em uso bem

como a estabilidade do desvio padrão. Neste caso o sensor foi retirado do carro do interferômetro e transferido para o inclinômetro. O deslocamento (0,5mm) foi inserido diretamente na alavanca principal (tabela 23).

TABELA 21 – RESOLUÇÃO DO SENSOR ÓTICO							
Observação	Deslocamentos iguais a 1mm- Superfície Plana						
	(mm)	X	Y	ΔX (pulsos)	ΔY (pulsos)	D (pulsos)	Resolução (ppp)
1	1	142	307				
		140	322	2	-15	15,1327	384,3
2	1	67	330				
		64	345	3	-15	15,2971	388,5
3	1	84	333				
		81	348	3	-15	15,2971	388,5
4	1	92	373				
		90	388	2	-15	15,1327	384,3
5	1	144	317				
		141	332	3	-15	15,2971	388,5
6	1	96	313				
		94	328	2	-15	15,1327	384,4
7	1	800	305				
		797	290	3	15	15,2971	388,5
8	1	133	319				
		135	334	-2	-15	15,1327	384,4
9	1	91	363				
		88	378	3	-15	15,2971	388,5
						Média	386,69
						Φ	2,19

A tabela 23 apresenta uma comparação entre leituras efetuadas em duas situações diferentes: a primeira onde não se utiliza a alavanca secundária (sem ampliação) e a segunda onde ela foi empregada. Comparando-se as médias das leituras (em pulsos) para os deslocamentos de 0,5mm introduzidos diretamente na alavanca principal, observa-se o efeito da ampliação proporcionado pela alavanca principal. O ganho da alavanca secundária foi de 9,9823 vezes.

Nestas condições, resolução de aproximadamente 386 pulsos/polegada, ganho de 9,9823 vezes, o menor deslocamento da alavanca principal detectável pelo sensor

seria 0,00659mm que corresponde, admitindo conexão entre alavancas no meio da alavanca principal, 1,318mm a 100m de distância. Por outro lado, com este sensor, a ampliação necessária para atingir a resolução de 1mm/100m teria que ser de, no mínimo, 13,16 vezes.

Observação	Deslocamentos iguais a 0,5 mm- Superfície Plana						Resolução (ppp)
	(mm)	X	Y	ΔX (pulsos)	ΔY (pulsos)	D (pulsos)	
1	0,5	127	278	3	7	7,615773	387,1
		124	271				
2	0,5	746	262	3	7	7,615773	387,1
		743	255				
3	0,5	53	303	3	7	7,615773	387,1
		50	296				
4	0,5	143	297	3	7	7,615773	387,1
		140	290				
5	0,5	123	287	3	7	7,615773	387,1
		120	280				
6	0,5	586	326	3	7	7,615773	387,1
		583	319				
7	0,5	114	322	3	7	7,615773	387,1
		111	315				
8	0,5	529	307	3	7	7,615773	387,1
		526	300				
9	0,5	197	325	3	7	7,615773	387,1
		194	318				
10	0,5	646	309	3	7	7,615773	387,1
		643	302				
Média							386,91
Φ							0,0

Todas as observações envolveram sempre um número grande de pulsos, por exemplo, 1mm tem aproximadamente 15 ou 16 pulsos, 0,5 mm tem aproximadamente 7,6 pulsos e assim por diante. Surgiram as seguintes perguntas: será que todos os pulsos se dão exatamente com o mesmo intervalo de deslocamento ? Onde é o início

de um TABELA 23 – FAE – FATOR DE AMPLIAÇÃO ESPECÍFICO

Observação	Deslocamentos iguais a 0,5 mm – Superfície Plana							
	(mm)	X	Y	ΔX (pulsos)	ΔY (pulsos)	D (pulsos)	Resolução (ppp)	
SEM AMPLIAÇÃO	1	0,5	127	278				
			124	271	3	7	7,6158	386,9
	2	0,5	746	262				
			743	255	3	7	7,6158	386,9
	3	0,5	53	303				
			50	296	3	7	7,6158	386,9
	4	0,5	143	297				
			140	290	3	7	7,6158	386,9
	5	0,5	123	287				
			120	280	3	7	7,6158	386,9
6	0,5	586	326					
		583	319	3	7	7,6158	386,9	
7	0,5	114	322					
		111	315	3	7	7,6158	386,9	
8	0,5	529	307					
		526	300	3	7	7,6158	386,9	
9	0,5	197	325					
		194	318	3	7	7,6158	386,9	
10	0,5	646	309					
		643	302	3	7	7,6158	386,9	
MÉDIA						7,6158		
COM AMPLIAÇÃO	11	0,5	153	322				
			151	246	2	76	76,0263	386,2
	12	0,5	657	341				
			655	265	2	76	76,0263	386,2
	13	0,5	153	375				
			151	299	2	76	76,0263	386,2
	14	0,5	602	413				
			600	337	2	76	76,0263	386,2
	15	0,5	101	352				
			99	276	2	76	76,0263	386,2
16	0,5	692	435					
		692	359	0	76	76,0000	386,1	
17	0,5	167	368					
		165	292	2	76	76,0263	386,2	
MÉDIA						76,0226		
FAE						9,982255		

intervalo necessário para um pulso ? Seriam estas as causas do desvio padrão observado, mesmo após a correção da superfície refletora ?

Para responder à primeira pergunta procurou-se efetuar deslocamentos equivalentes à resolução observada de aproximadamente 386 pulsos/mm.

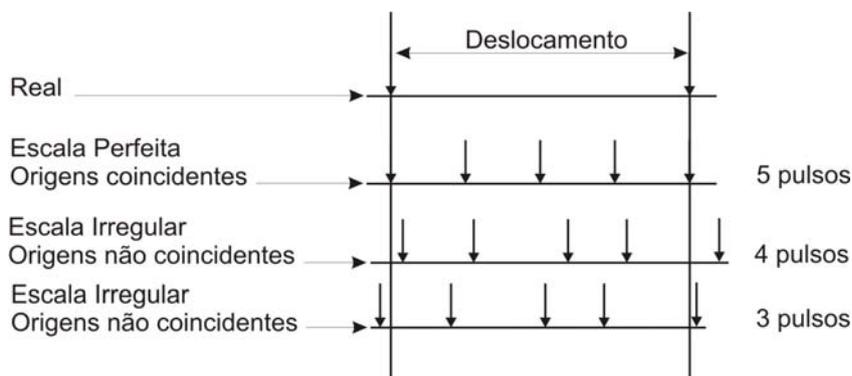
Já que se dispõem do interferômetro cuja resolução chega a ser 1000 vezes maior que a necessária, deslocamentos da ordem de 0,065803 mm podem ser obtidos sem maiores dificuldades. Já de início surgiu uma dificuldade: como coincidir o início de um intervalo da escala de contagem do sensor com o início da contagem de distância pelo interferômetro ? Isto é impossível visualmente, uma vez que a emissão do pulso apenas ocorre após o sensor ter captado o percurso completo e, além disto, quando o laser utilizado pelo sensor é ativado este já se encontra em algum lugar do intervalo seguinte. Como o intervalo é muito pequeno pode-se estar, até mesmo, chegando ao início do intervalo posterior.

7.1.2 Teste de regiões contíguas

Para averiguar a irregularidade executou-se um conjunto de observações sobre intervalos constantes, porém dispostos contiguamente. O que se observou é que os intervalos determinados pelo sensor não seguem um comportamento regular, isto é, alguns intervalos apresentam pequena variação de tamanho em relação a outros quando compara-se o número de pulsos emitidos (tabela 24).

Uma explicação possível para o fato pode ser observada no diagrama na figura 48. Admita-se que uma escala perfeita foi disposta de maneira que teve sua origem coincidente com a origem do deslocamento a ser medido e que um pulso foi emitido neste preciso instante.

FIGURA 48 – DIAGRAMA DA DISTRIBUIÇÃO DA ESCALA



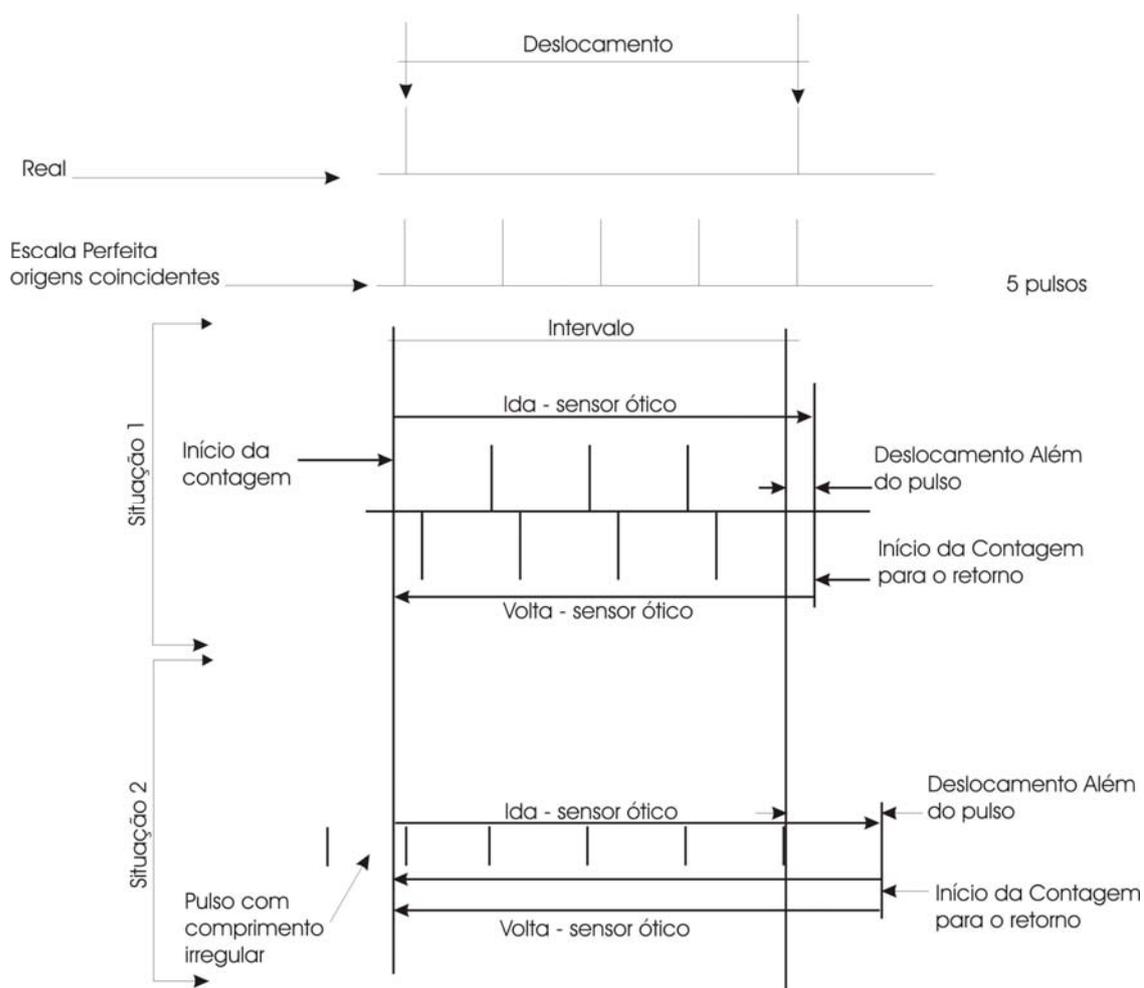
Durante o percurso todo o sensor emitiu 5 pulsos, sendo que o último exatamente no fim do deslocamento. Admita-se agora que uma escala irregular, como a existente no sensor, foi utilizada para medir o mesmo espaço. Note que, dependendo da sua posição e da conformação da distribuição dos intervalos pode-se ter diferentes leituras para o mesmo deslocamento.

TABELA 24 – TESTE DE LEITURAS CONTÍGUAS

Deslocamentos contíguos 0,5 mm						
Intervalo	X	Y	DX (pulsos)	DY (pulsos)	Desvios X (pulsos)	Desvios Y (pulsos)
1	125	438				
2	133	447	8	9	0	-1
3	141	455	8	8	-1	0
4	148	462	7	8	1	0
5	156	469	8	7	0	1
6	164	477	8	8	0	0
7	173	484	9	8	-2	0
8	181	491	8	7	0	1
9	188	500	7	9	1	-1
10	196	508	8	8	0	0
11	202	515	6	8	1	0
12	210	523	8	8	0	0
13	217	532	8	9	0	-2
14	226	539	9	7	-1	1
15	233	547	7	8	1	0
16	241	554	8	8	0	0
17	248	563	8	9	0	-1
18	256	570	8	7	0	1
19	265	578	9	8	-1	0
20	273	585	8	8	0	0
21	278	594	5	9	2	-1
22	286	600	8	6	0	2
23	293	608	8	8	0	0
24	302	615	9	8	-1	0
25	310	624	8	9	0	-1
26	317	632	8	8	0	0
27	325	639	8	8	0	0
28	332	647	7	8	1	0
29	340	653	8	6	0	1
30	349	661	9	8	-2	0
Médias:			8	8	0	0

Outro fato observado é que o sensor inicia a contagem do intervalo a partir do momento em que dá por encerrado um. Quando a medida se processa em uma única direção isto não tem muita importância pois o número de pulsos ficará alterado apenas pelo efeito mostrado anteriormente. Se, no entanto, houver mudança de direção um efeito acontece (figura 49).

FIGURA 49 – EFEITO DO INÍCIO DA CONTAGEM



Numa primeira análise percebe-se que o número de pulsos emitidos não se altera (situação 1 no diagrama) mas, lembrando-se do efeito da disposição de escala irregular em relação ao início do deslocamento, o efeito pode ser de alteração deste número de pulsos (situação 2, no diagrama onde serão emitidos 5 na volta ao ponto inicial).

Estes fatos têm repercussão na medida obtida pelo equipamento. Embora a resolução média possa atingir o valor de 1mm/100m (uso da alavanca secundária com ganho adequado) a precisão das leituras podem estar influenciadas de $\pm 1\text{mm}/100\text{m}$.

7.1.3 Teste de Retorno

Um teste desenvolvido no laboratório foi o “teste de retorno”. Este nome foi dado justamente para verificar se, após deslocar-se em diferentes sentidos segundo uma mesma direção e com diferentes amplitudes, a última leitura coincidiria com a primeira. Inicialmente o equipamento foi completamente instalado, isto é, com a alavanca secundária incluída. Foi fixado a uma estrutura rígida (mira utilizada em nivelamento geométrico) e esta conectada ao carro do interferômetro do LAIG. O Interferômetro foi zerado. A partir daí o sistema foi movimentado variando a distância medida pelo interferômetro entre -15mm e $+15\text{mm}$ (variação de inclinação equivalente à de 1,5m em 100m de distância). Como resultado observa-se (tabela 25) uma variação de até dois pulsos entre os valores inicial e final.

TABELA 25 – TESTE DE RETORNO AO PONTO INICIAL
 Movimentos Aleatórios entre -15mm e +15mm

Observação	X(pulso)	Y(pulso)	DX(pulso)	DY(pulso)
1	217	412		
	218	411	-1	1
2	315	456		
	316	457	-1	-1
3	427	128		
	426	127	1	1
4	612	451		
	613	450	-1	1
5	178	587		
	177	587	1	0
6	522	382		
	523	381	-1	1
7	144	252		
	145	252	-1	0
8	236	546		
	235	547	1	-1
9	654	378		
	655	377	-1	1
10	124	298		
	123	298	1	0
11	542	629		
	543	630	-1	-1
12	369	546		
	370	547	-1	-1
13	145	619		
	146	620	-1	-1
14	392	455		
	391	456	1	-1
15	592	345		
	591	346	1	-1
16	456	288		
	457	288	-1	0
17	319	444		
	318	445	1	-1
18	691	254		
	692	255	-1	-1
19	583	492		
	582	491	1	1
20	547	615		
	548	616	-1	-1
Média			-0,2	-0,2

7.2 CALIBRAÇÃO DO PROTÓTIPO

7.2.1 Determinação dos Parâmetros de Calibração

O processo de calibração tem o objetivo de determinar os parâmetros que definem o equipamento. São eles: o FAE e o ângulo de rotação.

Em conjunção com a resolução do sensor ótico o FAE é quem permite obter a resolução real do equipamento. Deve-se ter em mente que o instrumento foi construído a partir de valores teóricos e/ou nominais da resolução daquele sensor.

O ângulo de rotação tem por finalidade converter os valores observados segundo um sistema de coordenadas intrínseco do equipamento para um sistema perpendicular ao plano de fixação do equipamento à estrutura.

A resolução do sensor ótico, o fator de ampliação específico e o ângulo de rotação converterão as observações em pulsos para mm.

Como salientado antes, o processo de calibração do instrumento necessita de, pelo menos, duas leituras em posições diferentes do equipamento. Estas posições diferem de uma quantia previamente determinada de inclinação. No experimento desenvolvido o valor injetado foi de 0,5mm no meio da alavanca principal, empregando o interferômetro.

A tabela 26 apresenta o processo de calibração e um teste para verificar os cálculos. As colunas 4 e 5 contêm respectivamente as leituras em X e Y antes (linha A) e após (linha B) cada movimentação. Existem quatro conjuntos de linhas A e B neste exemplo. Isto significa que foram feitas quatro pares de leituras. A coluna 9 tem os ângulos de rotações obtidos para cada observação e na extremidade inferior o valor médio.

TABELA 26 – CALIBRAÇÃO DO INCLINÔMETRO FOTO MECÂNICO

OBSERVAÇÕES	OBS.	INCLINAÇÃO INJETADA NO EQUIPAMENTO (mm)	DADOS BRUTOS (pulsos) (Média de 30 observações)		VARIACÃO (pulsos)		Ângulo de rotação por teste	Ângulo médio de rotação vezes (-1)	Dados Rotados (pulsos)		Variações (pulsos rotados)		FAE por observação	FAE – Fator de Ampliação Específico	Inclinação a 100m segundo eixos X e Y na altura de 1m (mm)		VERIFICAÇÃO
			X	Y	DX	DY			X	Y	X	Y			X	Y	VALOR INJETADO (mm)
DADOS PARA CALIBRAÇÃO INICIAL (0,5mm)	A	0,5	153	322	-2,0	-76,0	0,026310	-0,026310	144,4763	325,913	0,00	-	9,982261	9,982261	0,00	-50,000	0,5000
	B	0	151	246					144,4763	249,887		76,03					
DADOS PARA CALIBRAÇÃO FINAL (0,5mm)	A	0,5	657	341	-2,0	-76,0	0,026310	-0,026310	647,802	358,165	0,00	-	9,982261	9,982261	0,00	-50,000	0,5000
	B	0	655	265					647,802	282,139		76,03					
DADOS PARA CALIBRAÇÃO FINAL (0,5mm)	A	0,5	153	375	-2,0	-76,0	0,026310	-0,026310	143,082	378,895	0,00	-	9,982261	9,982261	0,00	-50,000	0,5000
	B	0	151	299					143,082	302,869		76,03					
DADOS PARA CALIBRAÇÃO FINAL (0,5mm)	A	0,5	602	413	-2,0	-76,0	0,026310	-0,026310	590,927	428,694	0,00	-	9,982261	9,982261	0,00	-50,000	0,5000
	B	0	600	337					590,927	352,667		76,03					
RESOLUÇÃO DO SENSOR ÓTICO:	0,0656500		Conexão entre alavancas (m)		1		-0,026310		FAE médio:		9,982261		0,5000				

A quinta coluna da tabela 26 apresenta o valor do fator de escala médio do equipamento. Observe que neste caso este valor coincide com aquele obtido quando foram comparadas as leituras feitas antes e depois de introduzir a alavanca secundária (tabela 23).

7.2.2 Aplicação a Dados Observados

A tabela 27 destina-se a redução dos dados fornecidos pelo equipamento quando em operação. Nesta tabela são utilizados os parâmetros determinados na tabela 26. Para verificação de cálculos foram introduzidos como valores iniciais os mesmos valores que geraram a determinação dos parâmetros. Como resultado estes dados devem fornecer movimentação equivalente a 0,5mm, que foi o valor injetado.

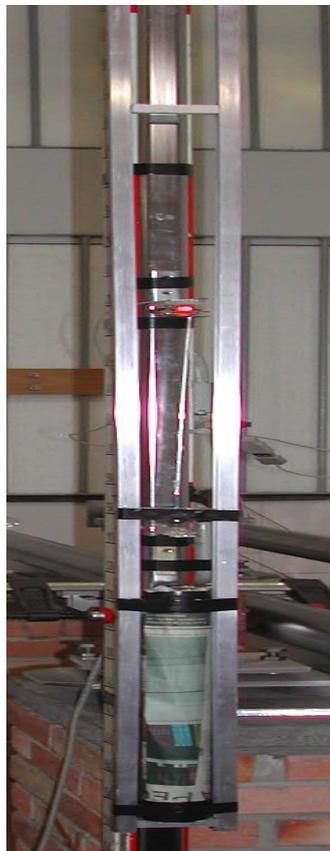
TABELA 27 – REDUÇÃO DE DADOS OBSERVADOS COM PARÂMETROS VINDOS DA CALIBRAÇÃO – 100m

OBS.	DADOS BRUTOS (pulsos) Posições da alavanca secundária.		Variação de inclinação da alavanca secundária do equipamento relativas à primeira observação (pulsos)		Ângulo médio de rotação (rad)	Dados Brutos Rotados (pulsos)		Variações de inclinação da alavanca secundária relativas ao Início (pulsos) segundo eixos rotacionados X e Y		Fator de escala médio do equipamento	Inclinação do Equipamento (mm)		Correspondência para altitude de: 100m		Variação em relação à observação anterior (mm) na altura da conexão		Variação em 100m correspondente à variação relativa à observação anterior (mm)	
	X	Y	DX	DY		X	Y	X	Y		X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1	153	322				144,48	325,91				0,0000	0,0000	0,00	0,00				
2	151	246	-2	-76	-0,026310	144,48	249,89	0,0000	-76,0263	9,982261	0,0000	-0,5000	0,00	-50,00	0,0000	-0,5000	0,000	-50,000
3	125	273	-28	-49	-0,026310	117,78	276,19	-26,7013	-49,7196	9,982261	-0,1756	-0,3270	-17,56	-32,70	-0,1756	0,1730	-17,561	17,301
4	126	270	-27	-52	-0,026310	118,85	273,22	-25,6227	-52,6923	9,982261	-0,1685	-0,3465	-16,85	-34,65	0,0071	-0,0196	0,709	-1,955
5	124	271	-29	-51	-0,026310	116,83	274,17	-27,6483	-51,7452	9,982261	-0,1818	-0,3403	-18,18	-34,03	-0,0133	0,0062	-1,332	0,623
6	127	276	-26	-46	-0,026310	119,70	279,25	-24,7809	-46,6681	9,982261	-0,1630	-0,3069	-16,30	-30,69	0,0189	0,0334	1,886	3,339
7	128	275	-25	-47	-0,026310	120,72	278,27	-23,7549	-47,6414	9,982261	-0,1562	-0,3133	-15,62	-31,33	0,0067	-0,0064	0,675	-0,640

7.2.3 Parâmetros Determinados

Como pode ser observado na tabela 26 o resultado da calibração forneceu para o FAE deste equipamento o valor de 9,982255 e para o ângulo de rotação o valor de -0,026310 radianos. Como salientamos antes, considerando a resolução de aproximadamente 386 pulsos/polegada, ganho de 9,9823 vezes da alavanca secundária, o menor deslocamento da alavanca principal detectável pelo sensor seria 0,00659 mm que corresponde, admitindo conexão entre alavancas no meio da alavanca principal, 1,318 mm a 100 m de distância. Por outro lado, com este sensor, a ampliação necessária para atingir a resolução de 1mm/100m teria que ser de, no mínimo, 13,16 vezes.

FIGURA 50 – PROTÓTIPO DO INCLINÔMETRO FOTO-MECÂNICO



7.2.4 Parâmetros Determinados Usando K

Comparando-se as tabelas 28 e 29 respectivamente com as tabelas 26 e 27 podemos avaliar a influência da constante K no cálculo dos parâmetros de calibração. As diferenças atingiram 0,000244 sobre o ângulo de rotação e 0,023mm e 0,00mm respectivamente nos valores das coordenadas X e Y a 100m de altura.

TABELA 28 - CALIBRAÇÃO DO INCLINÔMETRO USANDO K

OBSERVAÇÕES	OBS.	INCLINAÇÃO INJETADA NO EQUIPAMENTO NA CONEXÃO DA ALAV. PRINC.(mm)	DADOS BRUTOS (pulsos) (Média de 30 observações)		Constante K Efeito Proporcional ao Deslocamento (pulsos)	VARIACÃO (pulsos)		Ângulo de rotação por teste (rad)	Ângulo médio de rotação vezes (-1) (rad)	Dados Rotados (pulsos)		Variações (pulsos rotados)		Fator de escala observado do equipamento	Fator de escala médio do equipamento	Inclinação a 100m segundo eixos X e Y na altura de 50 cm (mm)		VERIFICAÇÃO
			X	Y		DX	DY			X	Y	X	Y			X	Y	
DADOS PARA CALIBRAÇÃO INICIAL (0,1mm)	A	0,5	153	322						144,04	326,11	0,10	-76,03	9,98226		0,067	-49,823	49,8228
	B	0	151	246	-0,098	3,710			-0,02766	144,14	250,08				9,98226			
	A	0,5	657	341						647,32	359,04	0,10	-76,03	9,98226		0,067	-49,823	49,8228
	B	0	655	265	0,098	3,710				647,42	283,01							
DADOS PARA CALIBRAÇÃO FINAL (0,1mm)	A	0,5	153	375						142,57	379,09	0,10	-76,03	9,98226		0,067	-49,823	49,8228
	B	0	151	299	-0,098	3,710			-0,02766	142,67	303,06				9,98226			
	A	0,5	602	413						590,35	429,49	0,10	-76,03	9,98226		0,067	-49,823	49,8228
	B	0	600	337	0,098	3,710				590,45	353,46							
RESOLUÇÃO DO SENSOR ÓTICO:	0,065650		Conexão entre alavancas (m)			1			-0,02766					9,98226	49,8228			
			POSIÇÃO DO SENSOR			0,5												

TABELA 29 - APLICAÇÃO A DADOS OBSERVADOS - USANDO K

OBS.	DADOS BRUTOS (pulsos) Posições da alavanca secundária.		Variação de inclinação da alavanca secundária do equipamento relativas à primeira observação (pulsos)		Ângulo médio de rotação (rad)	Dados Brutos Rotados (pulsos)		Variações de inclinação da alavanca secundária relativas ao Início (pulsos) segundo eixos rotacionados X e Y		Fator de escala médio do equipamento	Inclinação da Alavanca Principal Relativa ao Início (mm) segundo eixos rotacionados X e Y a 50 cm do apoio		Correspondência para altitude de: 100m		Variação em relação à observação anterior (mm) na altura da conexão		Variação em 100m correspondente à variação relativa à observação anterior (mm)	
	X	Y	DX	DY		X	Y	X	Y		X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1	153	322				144,04	326,11				0,0000	0,0000	0,00	0,00				
2	151	246	-2	-76	-0,028	144,14	250,08	0,10	-76,03	9,982261	0,0007	-0,5000	0,07	-50,00	0,00	-0,50	0,07	-50,00
3	125	273	-28	-49	-0,028	117,40	276,35	-26,63	-49,76	9,982261	-0,1752	-0,3272	-17,52	-32,72	-0,18	0,17	-17,58	17,28
4	125	273	-28	-49	-0,028	117,40	276,35	-26,63	-49,76	9,982261	-0,1752	-0,3272	-17,52	-32,72	0,00	0,00	0,00	0,00
5	124	271	-29	-51	-0,028	116,46	274,33	-27,58	-51,78	9,982261	-0,1814	-0,3406	-18,14	-34,06	-0,01	-0,01	-0,62	-1,33
6	127	276	-26	-46	-0,028	119,32	279,41	-24,72	-46,70	9,982261	-0,1626	-0,3071	-16,26	-30,71	0,02	0,03	1,88	3,34
7	128	275	-25	-47	-0,028	120,35	278,43	-23,69	-47,67	9,982261	-0,1558	-0,3135	-15,58	-31,35	0,01	-0,01	0,68	-0,64

8 CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E PERSPECTIVAS

8.1 - CONCLUSÕES

A conclusão do trabalho apresentou resultado positivo, ou seja, é possível construir um inclinômetro foto mecânico, utilizando sensor óptico de baixo custo, aplicável em monitoramento geodésico e/ou geotécnico de estruturas em obras de engenharia civil. Como poderá ser observado a seguir, a resolução e a precisão observados nos testes são compatíveis com os equipamentos atualmente utilizados para este fim ($0,0005^\circ$ que equivale à variação de 1mm/100m)

8.1.1 – Relativas à Resolução e Precisão

O equipamento pode atingir a resolução média pretendida de 1mm/100m, bastando para isto utilizar uma alavanca secundária compatível com o objetivo do observador. A expressão “resolução média” advém do fato de os intervalos de leitura do sensor óptico serem irregulares, embora a média de diversas leituras para um mesmo intervalo de deslocamento tenha sido zero (TABELA 24 – TESTE DE LEITURAS CONTÍGUAS).

A precisão atingida é melhor que 2mm/100m, devida principalmente à irregularidade dos intervalos de leitura do sensor óptico.

8.1.2 – Relativas aos Erros de Leitura

O efeito dos erros de leitura está relacionado à orientação do sistema de coordenadas do sensor óptico (proporcional ao tamanho da componente do deslocamento). Se, por exemplo, a orientação do sistema de coordenadas do sensor óptico possui um de seus eixos coincidente com a direção de maior variação do movimento da estrutura o efeito do erro de leitura de um pulso segundo este eixo será

de a 1mm/100m enquanto que na outra direção será nulo. Se a orientação for de 45 graus o efeito do erro será de 50% sobre cada componente.

Observa-se na tabela 30, onde o maior deslocamento se dá na direção Y, que os efeitos do erro de leitura são maiores segundo esta direção.

TABELA 30 – EFEITOS DOS ERROS DE LEITURA SOBRE PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO PARA O EQUIPAMENTO TESTADO

	Erro de Leitura Introduzido	Eixo Atingido	Sobre a Inclinação a 100 m (mm)	Sobre o Ângulo de Rotação (rad)	Sobre o FAE
	0	-----	0,353	0,000 000 0	0,000 000
Diferenças em relação ao valor inicial	+1 pulso	Y	1,022	0,019 819 9	0,328 140
	+1 pulso	X	0,382	0,003 288 2	0,000 648
	+2 pulsos	Y	1,671	0,000 177 7	0,065 627
	+2 pulsos	X	0,387	0,006 577 4	0,163 645

8.1.3 – Relativas ao FAE - Fator de Ampliação Específico

O equipamento utilizado para o desenvolvimento teórico do projeto e construção do inclinômetro fóto-mecânico apresentou o FAE-fator de ampliação específico igual a 9,98232 e ângulo de rotação igual a 0,026310rad.

8.1.4 – Relativas ao Efeito da Temperatura

O efeito conjunto da variação de temperatura de 25 °C pode atingir, em situação mais desfavorável, 0,60241 mm / 100m, ou seja, a 60% da resolução pretendida para o equipamento (tabela 15). O efeito da temperatura pode ser minorizado pelo correto projeto arquitetônico do instrumento.

8.1.5 – Relativas ao Ângulo de Rotação

O sinal do ângulo de rotação, a ser utilizado para redução dos dados observados pelo instrumento, depende da orientação do sensor fotônico em relação à estrutura do equipamento.

8.1.6 – Relativas à constante K

A introdução da correção devida à constante do aparelho apresentou como efeito uma variação de 0,000244 rad no ângulo de rotação determinado na calibração. Sobre o valor das variações de inclinação o efeito observado foi de 0,023mm a 100m de altura em X e 0,0mm em Y. O efeito do erro de leitura (observe quadro a seguir) é totalmente absorvido pelo FAE quando não utiliza-se o K, e por consequência não há efeito sobre o ângulo de rotação e cálculo da inclinação.

Efeito da RSO - Resolução do Sensor Ótico e Constante K								
Sem K						Com K		
mm/pulso	RSO	FAE	Dif FAE	Rotação	Inclin	Dif Incln. (mm/100m)	Rotação	Dif FAE
0,0661630630	383,9	10,0602670	0,078012	0,00000	0,00000	0,60450	0,000011	0,078007
0,0659911670	384,9	10,0341299	0,051869	0,00000	0,00000	0,34190	0,000007	0,051869
0,0658201610	385,9	10,0081280	0,025875	0,00000	0,00000	0,08130	0,000004	0,025867
0,0657009830	386,2	10,0003537	0,018933	0,00000	0,00000	0,00350	0,000003	0,018093
0,0656500390	386,9	9,9822606	0,000000	0,00000	0,00000	0,17720	0,000000	0,000000
0,0657690320	387,2	9,9745260	0,007729	0,00000	0,00000	0,25440	0,000001	0,007734
0,0654807940	387,9	9,9565260	0,025729	0,00000	0,00000	0,43380	0,000004	0,025734
0,0653124200	388,9	9,9309250	0,051330	0,00000	0,00000	0,68840	0,000007	0,051336
0,0635144909	389,9	9,9054540	0,076801	0,00000	0,00000	0,94100	0,000011	0,076806

8.1.7 – Relativas ao Equipamento

É possível a diminuição das dimensões do equipamento (comprimento de alavancas, lastro, etc) em função da resolução necessária.

O sistema magnético de conexão entre alavancas é eficiente para a configuração do equipamento, uma vez que elimina eventuais “folgas”.

8.1.8 – Relativas ao Coletor de Dados

A coleta contínua de dados requer a disponibilidade de unidades de manutenção de energia (“no breaks”) e/ou de programação adequada para reativação da unidade de coleta (computador) e seus softwares (coleta, armazenagem e transmissão de dados – internet, intranet, etc.).

Para coleta de dados remota podem ser utilizados computadores do tipo Pentium II, desde que o intervalo de captura de dados seja maior que 5 segundos. Se o intervalo for menor aquele tipo de máquina não consegue ler e gravar os dados continuamente e, após algum tempo, aparecem mensagens de erro de gravação. Isto ocorre pelo fato de que cada vez que há uma gravação, adicionando dados ("append"), o processamento "abre" o arquivo, grava e o fecha, o que demanda algum tempo que, após longo período de observação, pode causar o travamento do sistema.

8.1.9 Relativas ao Protótipo Testado:

Resolução atingida	1,32mm/100m.
Precisão atingida	melhor que 2mm.
Fator de Ampliação Específico	9,98232
Resolução 1mm/100m	alterar da alavanca secundária
Efeitos da temperatura	0,60241mm/100m
Efeitos do Erro de leitura de 1 pulso	menor que 0,032814 sobre o FAE

Efeito exclusivo da Constante K

- Menor que 0,023 mm/100m sobre inclinação
- Menor que 0,0013490rad sobre ângulo de rotação
- Menor que 0,000 000 4 sobre o FAE
- Menor que 0,35mm/100m sobre componentes

Efeito máximo conjunto RSO , K e temperatura (sem corr)

- Menor que 1,10mm/100m

- O inclinômetro é factível segundo a proposta bastando alterar o ganho da alavanca secundária (FAE para 13,7 no equipamento testado);
- O uso de materiais comuns não impede a possibilidade de atingir alta resolução e precisão;
- Os efeitos da temperatura, embora menores que a precisão desejada, podem ainda ser reduzidos com arquitetura adequada;
- O equipamento pode ser utilizado em controles geotécnicos;
- O equipamento pode ser utilizado em controles geodésicos;
- O efeito conjunto do erro em RSO de até 3 pulsos e efeito da constante K conjuntos não ultrapassam 1mm/100m.

8.2 RECOMENDAÇÕES

8.2.1 Desenvolvimento de Softwares

O software aqui desenvolvido tem por objetivo a criação e alimentação de um arquivo, em formato texto, contendo todas as observações efetuadas por um sensor utilizado em um projeto. Nele constam: nome do projeto, identificação do sensor (numeral), observação (informação adicional), dia, mês, ano hora, minuto e segundo da observação, coordenadas X e coordenadas Y observadas. Além disto pode-se, ainda, determinar o intervalo de captura de sinais.

O desenvolvimento de software mais elaborado para coleta e processamento automático de dados permitirá o uso de múltiplos sensores simultaneamente, e adição de nomes significativos a cada um deles. Além da montagem do arquivo propriamente dito, sua transmissão e/ou acesso remoto também poderão ser melhorados .

8.2.2 Visualização de Resultados

Outro aspecto interessante, e que trás nova luz à forma de observação, é a animação gráfica. Dada a possibilidade de coleta simultânea dos dados de todos os sensores pode-se observar, utilizando-se modelos digitais de superfícies, o comportamento integral de estruturas. Reunindo os dados para cada instante pode-se criar um “frame” de toda a estrutura relativo àquele instante. A apresentação seqüencial dos “frames” permite a visualização do comportamento da estrutura em regime de carga real em tempo quase real.

É indispensável o uso de sistemas de proteção contra a ação de ventos, chuviscos ou quaisquer outros processos mecânicos indesejáveis atuantes sobre as alavancas e estrutura do equipamento.

8.3 PERSPECTIVAS

Mais do que a produção de um inclinômetro, o trabalho demonstrou a possibilidade de emprego de sensores óticos de baixo custo como componentes para o desenvolvimento de ferramentas para monitoração geodésica. Os resultados aqui encontrados não esgotam o assunto. A precisão atingível é perfeitamente compatível com os modelos atualmente existentes para este tipo de atividade, o que aumenta o potencial de uso destes sensores além de possibilitar uma diminuição significativa em termos de custos.

O desenvolvimento de outros equipamentos para monitoramento e/ou levantamentos geodésicos e/ou geotécnicos é perfeitamente possível, alterando-se o dimensionamento das alavancas envolvidas, caso se utilize o inclinômetro aqui apresentado. Equipamentos destinados à mensuração de deslocamentos unidirecionais têm construção mais simples e podem oferecer grande ganho em ampliação de movimentos além de poderem utilizar produtos disponíveis praticamente em qualquer lugar.

Com a disponibilização de sensores com resolução de 1200 ppp (pulsos por polegada) já existentes no mercado ($1\text{ pulso}=0,021\text{mm}$) abre-se a possibilidade de maior sensibilidade e, com o advento de melhores processadores, ao aumento da capacidade de leituras (mais leituras por segundo de tempo) o que permitirá a observação de vibrações. A maior resolução favorece a compactidade dos equipamentos o que confere ainda maior portabilidade e/ou a dispensa do uso da alavanca secundária. Com o equipamento disponível no projeto a limitação foi de 10Hz, isto é, 10 leituras por segundo de observação, com variação de 1Hz. Isto se torna uma ferramenta muito útil no que tange à análise de fadiga de materiais, por exemplo.

Do ponto de vista geodésico, conforme a conceituação corrente, o desenvolvimento de modelos matemáticos adequados poderá apresentar caminhos para a determinação de movimentos absolutos de estruturas. Esta é uma linha de pesquisa a ser perseguida no futuro onde o uso de dois inclinômetros instalados respectivamente no ponto de controle da estrutura e ponto de referência permite a determinação do movimento relativo entre ambos (magnitude e orientação).

A aplicação destes sensores ao nivelamento geométrico de precisão para monitoramento geodésico é uma área de pesquisa interessante, na medida que a sua precisão independe da distância compreendida entre pontos nivelados ou da operação do equipamento e de efeitos como refração atmosférica e colimação.

A possibilidade de sincronização das observações permite efetuar a orientação de um conjunto de inclinômetros segundo uma única direção, através da determinação de cossenos diretores que convertem os dados observados para uma determinada direção. Pares de observações simultâneas permitem determinar os vetores segundo os quais os deslocamentos ocorrem na estrutura nos locais onde os equipamentos estão instalados.

Outro aspecto importante, e que está ligado à docência e à pesquisa, é a quebra de conceitos relativos a equipamentos em duas frentes: primeiramente fica claro que pode-se desenvolver ferramentas de trabalho sem a dependência de tecnologia externa; em segundo lugar a quebra de paradigmas no que tange a capacidade de criação de ferramentas como esta, mesmo em condições ideológicas e materiais desfavoráveis.

9 REFERÊNCIAS

- AGUIRRE, P. J. A. Análise de deslocamentos em uma mina a céu aberto. Curitiba, 2000. 118f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.
- AZEVEDO Jr., J.C., 1989, Medição de deformações, forças e tensões. KRATOS Dinamômetros Ltda. Embu,.
- BEKEIERMAN, S., BEKEIERMAN, L., FERREIRA, F., 2003, Transdutores de Posição e Deslocamento, Escola Politécnica, USP, São Paulo SP.
- BEHR, J. A. ; HUDNUT, W. ; KING, E. N. Monitoring Structural Deformation at Pacoima Dam, California, Using Continuous GPS. Artigo publicado pela U.S. Geological Survey (USGS), 1999. Acessado em: 10/02/2004
- BOCK, Y. ; JONGE, P. J. de ; HONCIK, D. ; BEVIS, M. ; BOCK, L. ; WILSON, S. Epoch-by-EPOCH™ Positioning Applied to Dam Deformation Monitoring at Diamond Valley Lake, Southern California. International Symposium Deformation Measurements, 10., 2001, Orange, California, USA. Acessado em: 10/02/2004
- BRASIL, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Resolução PR nº22 de 21 de julho de 1983. Boletim de Serviço, Rio de Janeiro, 01 ago. 1983.
- BRASIL, Ministério do Exército, Estado Maior do Exército, Manual Técnico – Serviço Geográfico. Nivelamento Geométrico. 1975.
- BRASIL. Ministério do Planejamento e Orçamento, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Diretoria de Geociências, Departamento de Geodésia. Especificações e normas gerais para levantamentos geodésicos, coletânea de normas vigentes. 1998.
- BROCANELLI, C., 1983, Transdutores elétricos. - ETI Lauro Gomes. São Bernardo do Campo.
- CAMARGO, WANDER MIRANDA. Instrumentação em Fundações de Barragens, Relatório de Tema III do X Seminário Nacional de Grandes Barragens. Curitiba. 1973.
- CASACA, J. ; HENRIQUES, M. J. Monitoring Displacements at Large Dams by Means of Precision Transverses. FIG Working Week, 2003, Paris, France. Acessado em: 10/02/2004
- CASACA, J. ; HENRIQUES, M. J. The Geodetic Surveying Methods in the Monitoring of Large Dams in Portugal. FIG International Congress, 12., 2002, Washington, DC, USA. Acessado em: 09/02/2004

CHAVES, J. C. Controle de Deformações em Barragens: Métodos de Monitoramento e Viabilidade de Utilização do GPS. São Paulo. 1994. 197f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

CHEN , Y. Q. ; CHRZANOWSKI , A. ; SECORD , J. M. A Strategy for the Analysis of the Stability of Reference Points in Deformation Surveys. Cism Journal ACSCC, Verão-1990. Acessado em: 09/02/2004

COSTA, E. T., 2001, Transducção e Medida de Deslocamento, Departamento de Engenharia Biomédica - FEEC, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

DAÍ , L. ; WANG , J. ; RIZOS , C. ; HAN , S. Applications of Pseudolites in Deformation Monitoring Systems. FIG International Congress, 12., 2002, Washington, DC, USA.

DUFFY, M. A. ; HILL, C. ; WHITAKER , C. ; CHRZANOWSKI, A. ; LUTES , J. ; BASTIN G. Interpretation of First Results From the Automated and Integrated Monitoring Scheme at Diamond Valley Lake in California. FIG International Congress, 12., 2002, Washington, DC, USA.

DUFFY, M. A. ; HILL, C. J. ; WHITAKER , C. ; CHRZANOWSKI, A. ; LUTES , J. ; BASTIN G. An Automated and Integrated Monitoring Program for Diamond Valley Lake California. International Symposium Deformation Measurements, 10., 2001, Orange, California, USA.

CHRZANOWSKI, Design and error analysis of surveying projects. Department of Surveying Engineering. University of New Brunswick. Canadá. 1977.

DEPARTMENT OF THE ARMY. Structural Deformation Surveying. US Army Corps of Engineers, 2002, Washington, DC. Acessado em: 09/02/2004

DEPARTMENT OF ARMY – U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. Manual 1110-1-1004 Deformation Monitoring and Control Surveying. Washington, DC, 1994.
GAGG, G. 1997. Auscultação Gravimétrica na Região da Barragem Bento Munhoz da Rocha. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR, Curitiba, Brasil.

FAGGION, P, NADAL, C. A. NADAL, VEIGA, L, (2004), Integração da Auscultação Geodésica com a Instrumentação de Controle e Segurança da Barragem de Salto Caxias, Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR, Curitiba, Brasil.

GEMAEL, C. 1983. Vertical Crustal Deformations Near Large Dams. 18th. General Assembly, International Union of Geodesy and Geophysics, Hamburg.

GEMAEL, C. 1993. Auscultação Geodésica na Região Hidrelétrica Segredo. 3º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro, vol.1, pp.634-636.

GEMAEL, C. 1995. Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas. Editora da UFPR, 319 p.

GEMAEL, C., FAGGION, P.L. 1995. Auscultação Geodésica na Região Hidrelétrica Segredo. 4º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro, vol.1, pp.139-141.

GEMAEL, C., FAGGION, P.L. 1996. Subsidiência na Região de Grandes Barragens. Revista Brasileira de Geofísica, vol.14, no.3, pp.281-285.

GEMAEL, C. ; SANTOS, M. C. ; BLAKE, B. ; FAGGION, P. ; KRUEGER, C. P. ; FERREIRA, L. D. D. ; SOARES, M. ; SZOSTAK-CHRZANOWSKI, A. Stage 1 of Subsidence Monitoring of the Area Surrounding Salto Caxias Power Dam, In Brazil. International Symposium Deformation Measurements, 10., 2001, Orange, California, USA.

[HTTP://REPAIR.FAQ.ECE.DREXEL.EDU/SAM/LASERDIO.HTM](http://REPAIR.FAQ.ECE.DREXEL.EDU/SAM/LASERDIO.HTM),
Acessado em: 28/10/2005

[HTTP://JOE.BUCKLEY.NET/PAPERS/FOCAULTC/ECTEK2.HTM](http://JOE.BUCKLEY.NET/PAPERS/FOCAULTC/ECTEK2.HTM)
Acessado em: 28/10/2005

[HTTP://CCRMA.STANFORD.EDU/CCRMA/COURSES/252/SENSORS/SENSORS.HTML](http://CCRMA.STANFORD.EDU/CCRMA/COURSES/252/SENSORS/SENSORS.HTML)
Disponível em: 28/10/2005

[HTTP://MEMS.SANDIA.GOV/SCRIPTS/IMAGES.ASP](http://MEMS.SANDIA.GOV/SCRIPTS/IMAGES.ASP)
Acessado em: 28/10/2005

IBIAPINA, D. S. Método de Cálculo das Coordenadas Espaciais de um ponto com superdeterminação de medidas. São Paulo, 1993. 72p. (Dissertação de Mestrado). Curso de Pós- Graduação em Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

INTERNATIONAL FIG SYMPOSIUM ON DEFORMATION MEASUREMENTS, 11., 2003, Santorini (Thera) Island, Greece. Anais Eletrônicos. Disponível em: <http://www.fig.net>. Acessado em: 15/02/2004.

KAHMEN, H.; FAIG, W. S. Surveying. Berlin; New York: Walter de Gruyter, 1988.

KANE, W. F., and Beck, T. J., 1996a, Rapid slope monitoring: Civil Engineering, American Society of Civil Engineers, New York, v. 66, pp. 56-58.

KANE, W. F., and Beck, T. J., 1996b, An alternative monitoring system for unstable slopes: Geotechnical News, v. 143, pp. 24-26.

KERSTEN, T; MAAS, H. Photogrammetric 3-D point determination for Dam monitoring. Optical 3-D measurements Techniques III, Eds. Gruen/Kahmen, Wichmann Verlag 1995.

Disponível em:<<

http://www.haw-hamburg.de/geomatik/fb/mit/kersten/acrobat/wien95_dam.pdf>>

Acesso em 10 de fev. 2004.

KRONENBERG , P. ; CASANOVA , N ; INAUDI , D. ; VURPILLOT , S. Dam Monitoring With Fiber Optics Deformation Sensors. SPIE Conference on Smart Structures and Materials, 1997, San Diego, USA.

LENNARTZ-JOHANSEN , H. ; ELLEGAARD , S. Analyzing Europe's Largest Suspension Bridge. FIG International Congress, 12., 2002, Washington, DC, USA. Disponível em :

MEASUREMENTS GROUP - Education division. - Student manual for Strain gage technology. Raleigh , USA, 1991.

MEDEIROS, Z. F. Considerações sobre a metodologia de levantamentos altimétricos de alta precisão e propostas para a sua implantação. Curitiba, 1999. 142f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

MENDONÇA, F. J. B. Monitoração de estruturas de concreto com fotogrametria a curta distância. Curitiba, 1984. 92f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós- Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL . Manual de Segurança e Inspeção de Barragens. Brasília, 2002. 148p.

MOREIRA, A. T. Métodos de cálculo de coordenadas tridimensionais para o controle de obras de Engenharia. São Carlos, 1998. 206 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escala de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

NADAL, C. A. Método da Interseção Óptica Tridimensional Aplicado à Engenharia de Precisão. Curitiba, 2000. (Tese de Doutorado). Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná.

PRETORIUS, C. J. et al. The extensive geodetic systems used for the monitoring of a 185 metre high arch dam in Southern Africa. In: 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements, Orange, California. 2001. Anais eletrônicos...

Disponível em: <http://www.fig.net/figtree/com6_orange/index.htm >

Acessado em: 29/10/2005

OLIVEIRA, P. A. A., 2002, Extensometria Elétrica, Departamento de Engenharia de Estruturas e fundações, Escola Politécnica da USP, São Paulo, SP

PARKER, H., 1983, Simplified mechanics and strenght of materials. Wiley-Interciencia Publications. USA.

PRETORIUS, C. J. ; SCHMIDT, W. F. ; VAM STADEN, C. S. ; EGGER, K. The Extensive Geodetic System Used For The Monitoring of a 185 Metre High Arch Dam in Southern Africa. International Symposium Deformation Measurements, 10.,2001, Orange, California, USA. Acessado em: 09/02/2004.

Disponível em:

<http://rincon.gps.caltech.edu/FIG10sym/pdf/Session%20VI_Paper%202.pdf>

RADOVANOVIC, R. S., TESKEY, W. F., 2001, Dynamic Monitoring of Deforming Structures: GPS versus Robotic Tacheometry Systems, Departament Of Geomatic Engineering, University of Calgary

ROBERTS, G. W., MENG X., DODSON A. H., 2001, The Use of Kinematic GPS and Triaxial Accelerometers to Monitor the Deflections of Large Bridges, The Institute of Engineering Surveying and Space Geodesy, The University of Nottingham, UK.

ROBERTS, G. ; MENG, X. ; DOTSON, A. H. ; COSSER, E. Geodetic Signal Diagnosis and It's Applications to Structural Deformation. Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineer, 2., 2002, Berlin, Alemanha.

Disponível em :

<http://www.nottingham.ac.uk/iessg/papers/isgpap0206.pdf>>.

Acesso em : 10 fev. 2004.

ROBERTS, G. ; MENG, X. ; DOTSON, A. H. Using Adaptive Filtering to Detect Multipath and Cycle Slips in GPS/Accelerometer bridge Deflection Monitoring Data. FIG International Congress, 12., 2002, Washington, DC, USA.

Disponível em :

<http://www.fig.net/figtree/events/fig_2002/fig_2002_abs/TS6-2/TS6_2_roberts_meng_dodson_abs.pdf>. Acesso em : 10 fev. 2004.

SINCO (Slope Indicator Company), 1994, Applications guide: Slope Indicator Company, Bothell, WA 2nd Edition.

STATHAS, D; ARABATZI, O; DOGOURIS, S; PINIOTIS, G; TSINI, D; New monitoring techniques on the determination of structure deformations. 11th

International FIG Symposium on Deformation Measurements , Greece, May 25-28, 2003. Disponível em: <http://www.fig.net/figtree/commission6/santorini/index.htm>
Acesso em 16 de fev. de 2004.

STENMARK J. GeoMos : An Advanced Tool for Monitoring Structure Movement. Structural Engineer Magazine, July, 2002.

Disponível em

:<http://www.leicageosystems.com/us/articles/2002/Geomas_Structural%20Engineer_August%202002.pdf>.

Acesso em: 09 fev. 2004.

SYDNEY'S Landmark : Built and Monitored with Leica Instruments. Reporter Magazine, The Magazine of Leica Geosystems.

Disponível em :

<http://www.leicageosystems.com/reporter/reporter_45/reporter45.pdf>.

Acesso em : 10 fev. 2004.

VEIGA, L. A. K. Automação Topográfica - Parte 2. Curitiba, 2003. 77p. Apostila (Curso de Especialização em Geotecnologias). Departamento de Geomática, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

VISHAY INTERTECHNOLOGY, Inc. 63 Lincoln Highway, Malvern, PA 19355-2143

WWW.GALDABINI.IT

WWW.SINGER-INSTRUMENTS.COM

WWW.BSAC.EECS.BERKELEY.EDU

WWW.4DTECHNOLOGY.COM

WWW.ELETRICA.UFPR.BR/EDU/IE00/TRANSD

9.1 OBRAS CONSULTADAS

AZEVEDO Jr., J.C. (1989). Medição de deformações, forças e tensões. KRATOS Dinamômetros Ltda. Embu, 1989.

AGI (Applied Geomechanics, Inc.), 1997, TBASEII user's manual: Applied Geomechanics, Inc. Santa Cruz, CA.

BEDROSSIAN, T. L. and Etzold, R., 1999, The 1998 storm-related events, a response: California Geology, v. 52, pp. 4-12.

BECK, T. J., and Kane, W.F., 1996, Current and potential uses of time domain reflectometry for geotechnical monitoring: Proceedings, 47th Highway Geology Symposium, Cody, WY., Wyoming Department of Transportation, p. 94-103.

CSI (Campbell Scientific, Inc.), 1991a, CR10X measurement and control module operator's manual: Revised 5/97, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT.

CSI (Campbell Scientific, Inc.), 1991b, Campbell Scientific TDR soil moisture measurement system manual: Revised 2/92, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT.

CSI (Campbell Scientific, Inc.), 1997. PC208W datalogger support software instruction *Kane and Beck - 13/20* manual: Revision: 5/97, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT.

CDMG (California Division of Mines and Geology), 1998, Landslide reports from various state offices between February 3, 1998 and April 30, 1998: California Division of Mines and Geology Web Page, <http://www.consrv.ca.gov/dmg/minerals/98landslide/24.htm>.

DUNNICLIFF, J., 1993, Geotechnical instrumentation for monitoring field performance: John Wiley & Sons, Inc., New York, 577 p.

FANELLI, M.A. and Giuseppetti, G. (1998). Considerations on Mathematical models of Non-Linear Dynamic Behaviour of Dams. Dam Safety'98, Berga ed., Balkema, Rotterdam, ISBN 90 54109742.

FIGUEIREDO A., L.D. (1990). Resistência dos Materiais. Volume 1. Universidade Santa Cecília.- Santos.

FROCHT, M. M. (1941). Photoelastic Analysis – vol I e II, Wiley. N. York.

HALLIDAY, D. (2003). Física. Livros Técnicos e científicos São Paulo.

HENDRY, A. W. (1969). Photoelastic Analysis, Pergamon. London.

HERZOG, M.A.M. (1999). Practical Dam Analysis. Thomas Telford Books, London. ISBN: 0 7277 2725 7.

HUANG, F.-C., O'Connor, K. M., Yurchak, D. M., and Dowding, C. H., 1993, NUMOD and NUTSA: software for interactive acquisition and analysis of time domain reflectometry measurements: U. S. Bureau of Mines Information Circular 9346, 42 p.

KANE, W.F. and Beck, T. J., 1994, Development of a time domain reflectometry system to monitor landslide activity: Proceedings, 45th Highway Geology Symposium, Portland, OR, pp. 163-173.

KANE, W. F., and Parkinson, W. A., 1998, Remote landslide monitoring including time domain reflectometry: Short Course Manual, KANE GeoTech, Inc., Stockton, CA.

KOBAYASHI, A.S. (1993). Handbook on experimental mechanics. Society for Experimental Mechanics Inc. Bethel, USA.

KUSKE, A., ROBERTSON, G. (1977). Photoelastic Analysis. Wiley, N. York. KANE, W. F., and Beck, T. J., 1996b, An alternative monitoring system for unstable slopes: Geotechnical News, v. 143, pp. 24-26.

LAUVERNET, M. (1994). Laboratoire Campbell, J.S. and Zienkiewicz, O.C. (1975). Gravity Dam Analysis – The Effect of Valley Width. Proceedings of the International Conference on Criteria and Assumptions in the Numerical Analysis of Dams, Swansea pp 1007-1031.

LEE, GEORGE H. (1950). An introduction to Experimental Stress Analysis, Wiley. N. York.

LU, S; Lu, H. & Kolarik, W.J. (2001). Multivariate Performance Reliability Prediction in Real-Time. Elsevier Science Ltda. Reliability Engineering & System Safety – Vol 72, Issue 1, pages 39-45.

Measurements Group - Education division. - Student manual for Strain gage technology. Raleigh, USA, 1991.

MIKKELSEN, P. E., 1996, Field instrumentation: in Turner, A. K., and Schuster, R. L. (eds.), Landslides. Investigation and Mitigation, Transportation Research Board, Special Report 247, National Academy Press, Washington, DC, pp. 278-316.

O'CONNOR, K. M., and Dowding, C. H., 1999, Geomeasurements by pulsing TDR cables and Kane and Beck - 14/20 probes, CRC Press, Boca Raton, FL, 402 p.

PARKER, H. (1983). Simplified mechanics and strength of materials. Wiley-Interciencia Publications. USA.

PORTELA, E.T.A. et al. (1997). An Application of Knowledge-Based Systems to the Safety Control of Dams. Conferência Internacional New Technologies in Structural Engineering, Lisboa.

PORTELA, E.T.A. et al. (1998). The Safety Control of Dams: Improving Management Through the Expert System Technology. Fourth World Congress on Computational Mechanics, Buenos Aires, Argentina.

RAMOS, J.M.; Silva, H.S. (1993). ControlE de Segurança e Observação de Barragem de Betão e Alvenaria em Portugal, Rel 228/93, LNEC, Lisboa.

STEMATIU, D., Sarghiuta, R., Bugnariu, T. & Abdulamit, A. (1998). Significance of Predicted Displacement Limits in Arch Dam Safety Assesment. Dam Safety'98, Berga ed., Balkema, Rotterdam, ISBN 90 54109742.

TIMOSHENKO, S.P. (1983). Resistência dos Materiais. - 2^a Edição. Editora Edgar Blücher Ltda. São Paulo.

TEKTRONIX, 1994, 1502B metallic time domain reflectometer operator manual: Textronix, Inc., 070-6266-01, Redmond, OR.

USGS (United States Geological Society), 1998, El Niño and recent landslides: United States Geological Survey Web Page, [ttp://geohazards.cr.usgs.gov/el_nino/el_ninols.html](http://geohazards.cr.usgs.gov/el_nino/el_ninols.html).

WADE, L. V., and Conroy, P. J., 1980, Rock mechanics study of a longwall panel: Mining Engineering, pp. 1728-1734.

WONG , K. ; KING-LEUNG , C ; CHAN , W. **Monitoring Hong Kong's Bridges** : Real Time Kinematic Spans the Gap. Leica Geosystems.

Disponível em :

http://www.leicageosystems.com/civil/application/gps_world_hk.pdf>.

Acesso em : 10 fev. 2004.

9.2 DOCUMENTOS CONSULTADOS

9.2.1 Aplicação Geral

www.acumar.com
www.celesco.com
www.clino.co.uk
www.columbiaresearchlab.com
www.geomechanics.com
www.leveldevelopments.com
www.microstrain.com
www.posital.com
www.riekerinc.com
www.sherborneschaevitz.com
www.singer-instruments.com
www.slopeindicator.com
www.soil.co.uk
www.spectronsensors.com
www.usdigital.com
www.variohm.com
www.vti.fi

9.2.2 LVDT

www.rdpelectrosense.com
www.sensotec.com/lvdt.asp
www.lvdt.nl
www.sensorland.com
www.macrosensors.com
www.lvdt.co.uk
www.singer-instruments.com
www.disensors.com
www.mikesflightdeck.com/lvdt_circuitry.htm
www.lab-systems.com/products/amplifier/a308.html - condicionador de sinal

9.2.3 Extensômetros Resistivos

www.geotrade.com/Products/Geotechnical/Extensometers/extensometers.html
www.geotrade.com/Products
www.columbiaresearchlab.com/
Vishay Intertechnology, Inc. 63 Lincoln Highway, Malvern, PA 19355-2143

9.2.4 Extensômetros de Corda Vibrante

www.geomechanics.com/

9.2.5 Interferômetros Óticos

www.e-i-r.com

www.zwick.com/accessories-tools.html

9.2.6 Transdutor de Corrente de Foucault

www.slopeindicator.com/instruments/ext-magnet.html

9.2.7 Vídeo Extensômetros

www.galdabini.it

9.2.8 Extensômetros de Fita

www.epsilontech.com/ - extensômetros axiais

www.slopeindicator.com

www.pmctransducers.com

9.2.9 Interferômetros e Laser

www.transducerdirectory.info/newsletters/

www.andamooka.org

www.sao.ru/hq/sts/docs/sensors/clark/sens.html

www.infomine.com/index/suppliers/Roctest_Ltd.html

www.metrologyresource.com/acuity.html

www.4dtechnology.com

www.quinstar.com

<http://repairfaq.ece.drexel.edu/sam/laserdio.htm#dioint>

<http://optic.sumix.com/products/interferometers/>

9.2.10 MEMS

<http://mems.sandia.gov/scripts/images.asp>

9.2.11 Interferômetros Óticos

www.e-i-r.com

www.zwick.com/accessories-tools.html

9.2.12 Transdutor de Corrente de Foucault

www.slopeindicator.com/instruments/ext-magnet.html

www.transducerdirectory.info/newsletters/

www.andamooka.org

10 APÊNDICE 1 - PLANTAS, DESENHOS E CROQUIS DO PROTÓTIPO

O conjunto de pranchas apresentado nas figuras 45 a 53 contém desenhos esquemáticos e técnicos para construção do equipamento completo, do tipo M23.

Foram criados 22 modelos antes deste. O motivo que levou a isto foi a necessidade de desenvolvimento de conexões que não apresentassem folga, uma vez que 0,01mm corresponde a 1mm a 100m de distância. A utilização de molas, como alternativa para a redução de tais folgas, introduziria forças atuantes extras que, como visto anteriormente, podem interferir na resultante necessária para a submissão da alavanca secundária à primária. A última prancha apresenta a seqüência de montagem do aparato. O protótipo construído baseou-se em valores nominais do sensor ótico.

FIGURA 51 – ESQUEMA GERAL DO INCLINÔMETRO

Inclinômetro Foto Mecânico - M23 Esquema Geral

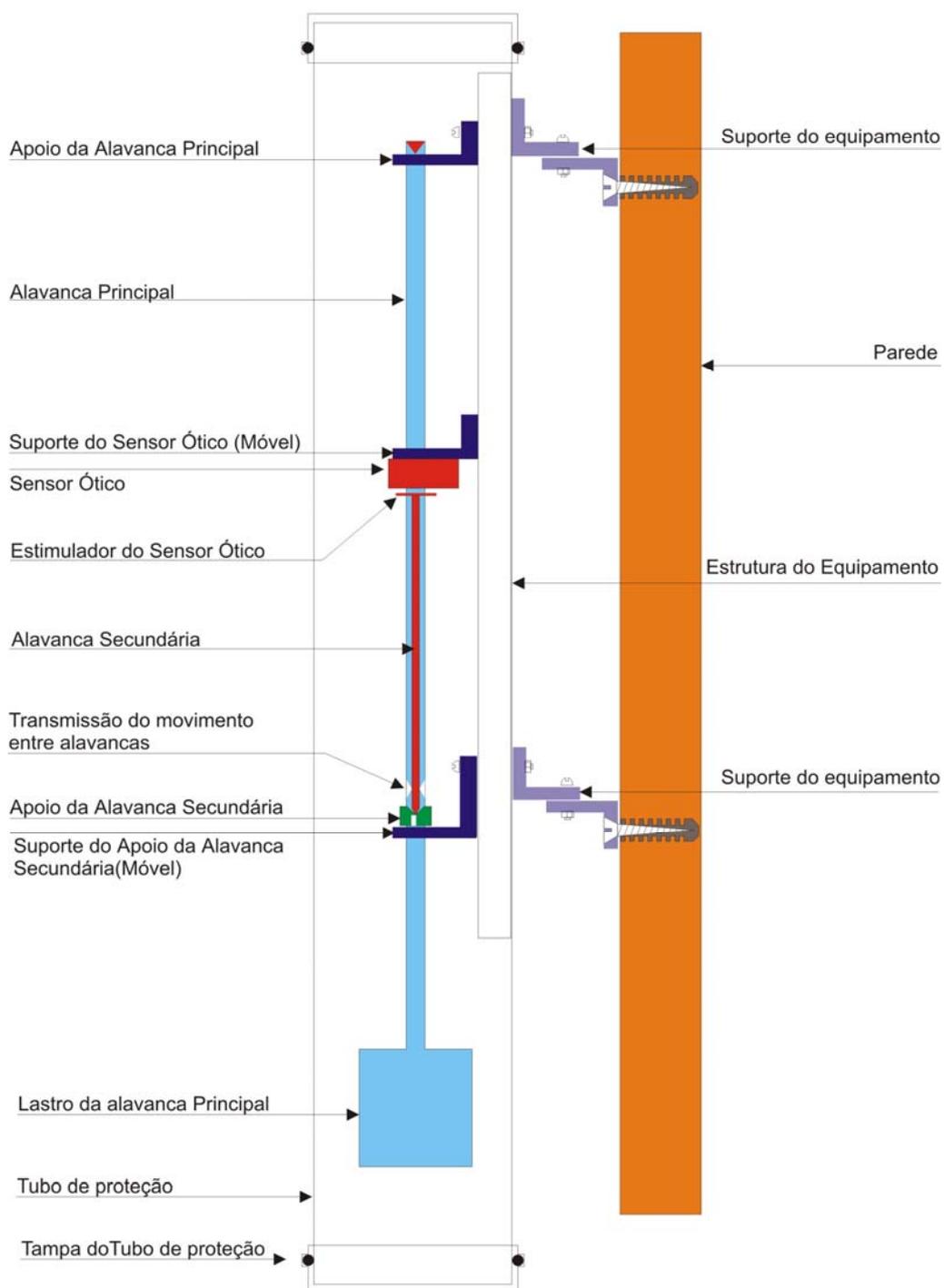


FIGURA 52- ESQUEMA GERAL COM DIMENSÕES

Inclinômetro Foto-Mecânico - M23

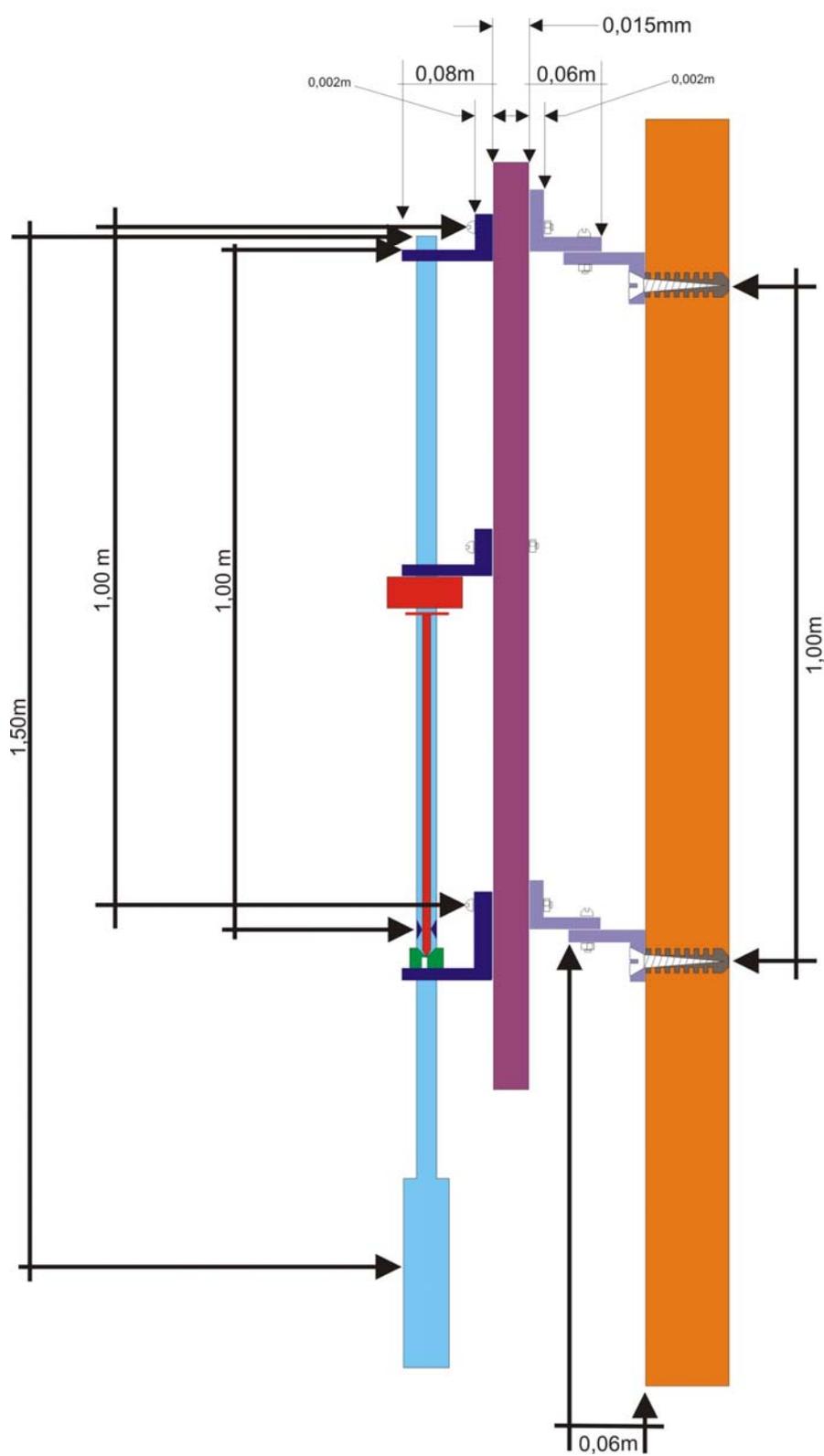


FIGURA 53 – ALAVANCA PRINCIPAL

Inclinômetro Foto Mecânico - M23
Estrutura do Equipamento

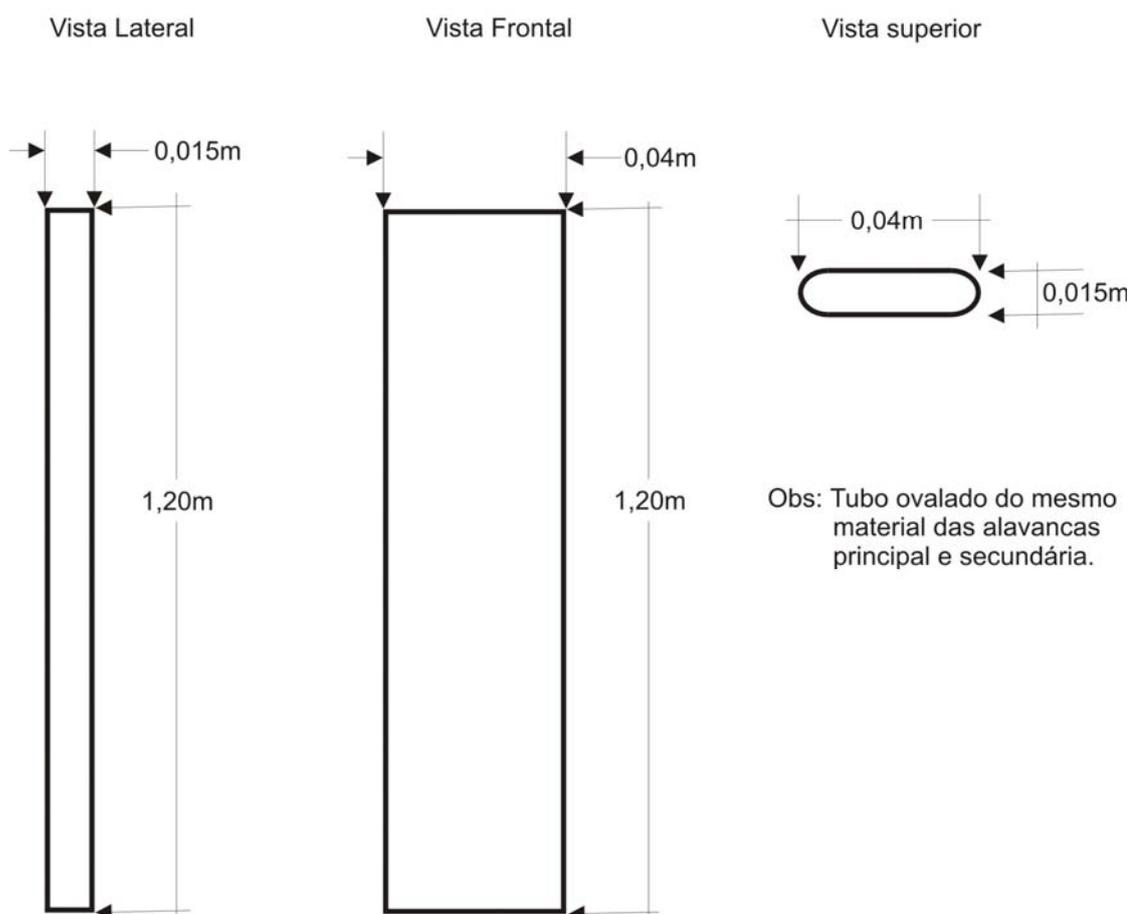


FIGURA 54 – PLANTA DA ESTRUTURA DO EQUIPAMENTO

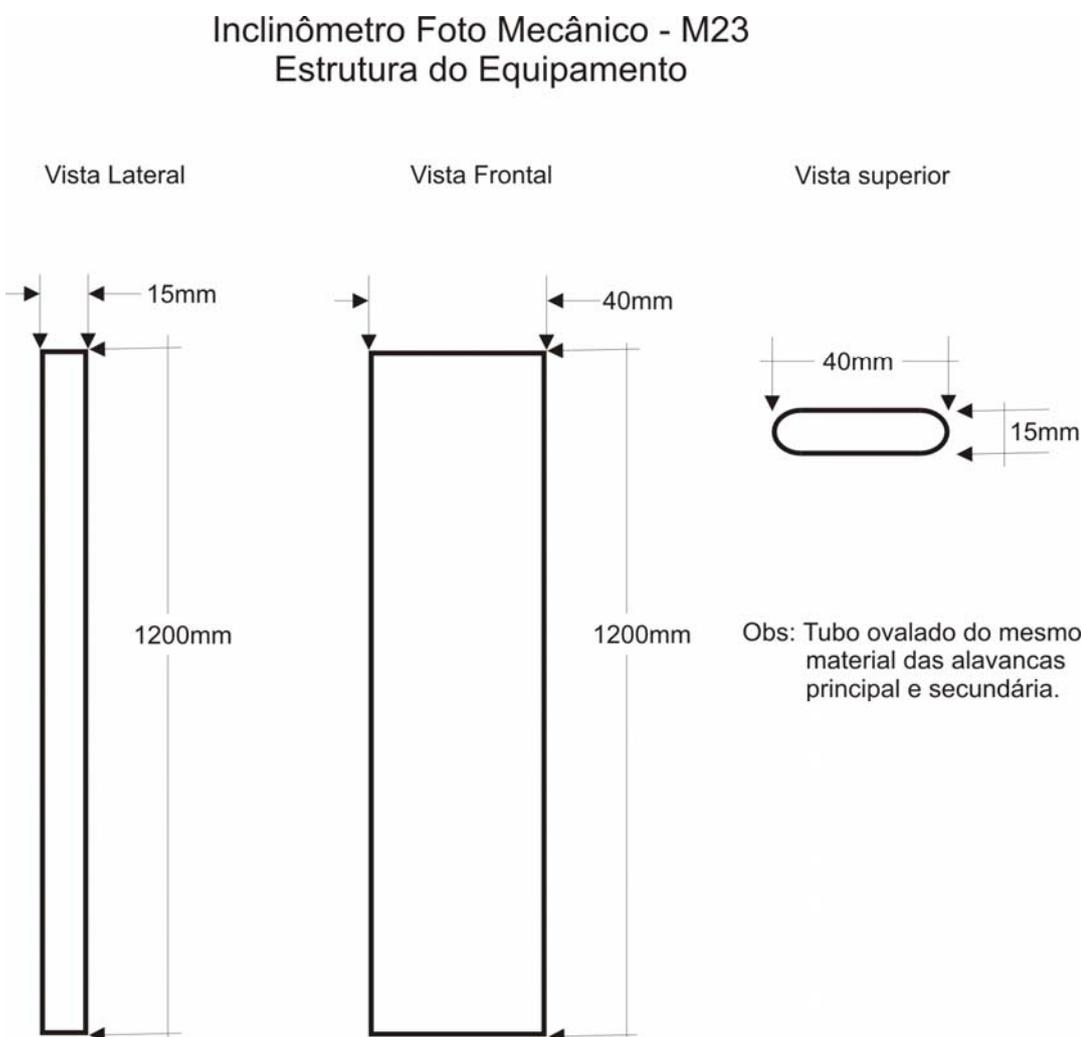


FIGURA 55 – SISTEMA DE CONEXÃO ENTRE ALAVANCAS

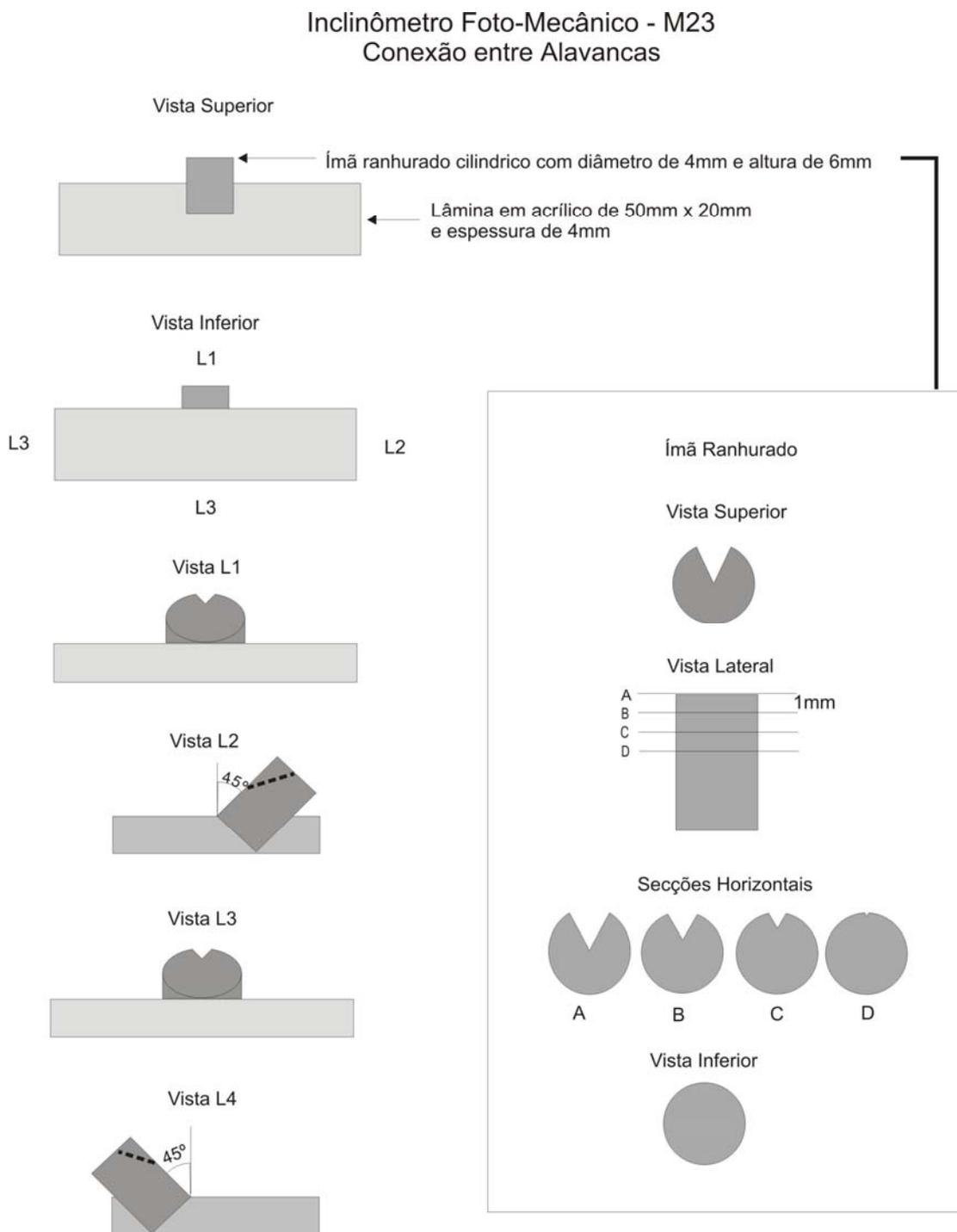
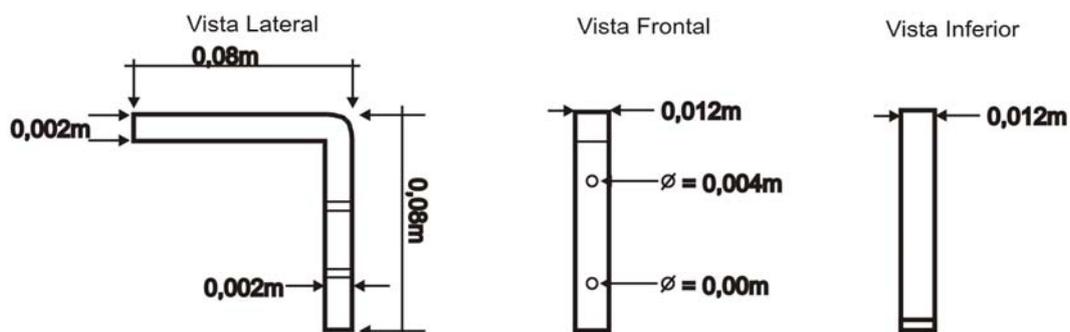


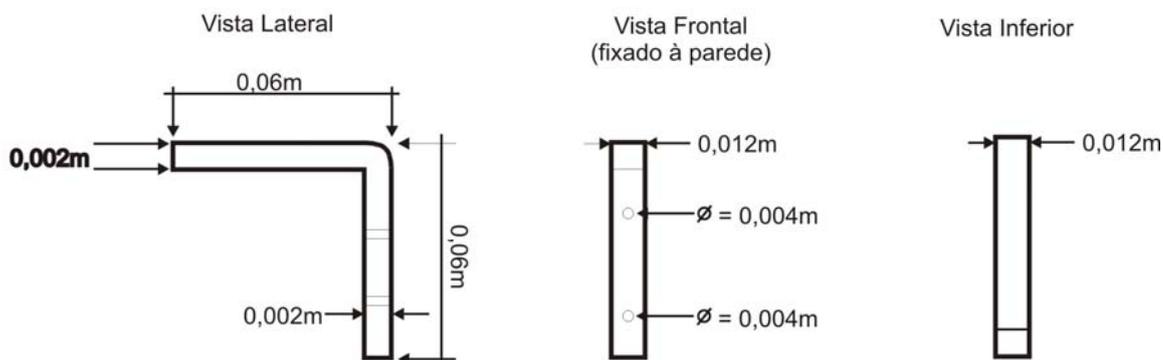
FIGURA 56 – SUPORTES E FIXADORES

Inclinômetro Foto-Mecânico - M23 Suportes e Fixadores

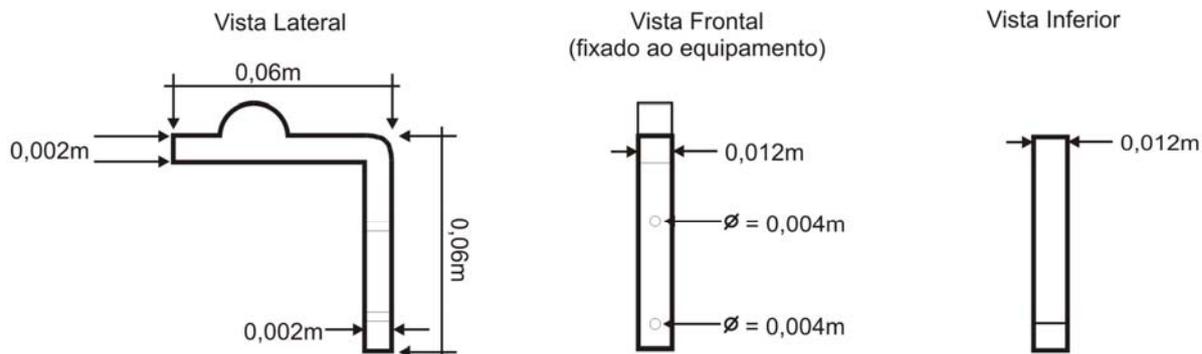
Suportes da Alavanca Principal, Secundária e Sensor ótico



Suportes da Estrutura Equipamento (Fixado à parede)



Suportes da Estrutura do Equipamento (Fixado ao equipamento)



Obs: Lâminas de ferro com 12mm de largura e comprimentos de 0,12m e 0,16m com 1,2mm de espessura dobrada ao meio do maior lado e furada.

FIGURA 57 – APOIO DA ALAVANCA SECUNDÁRIA

Inclinômetro Foto-Mecânico - M23
 Apoio da Alavanca Secundária

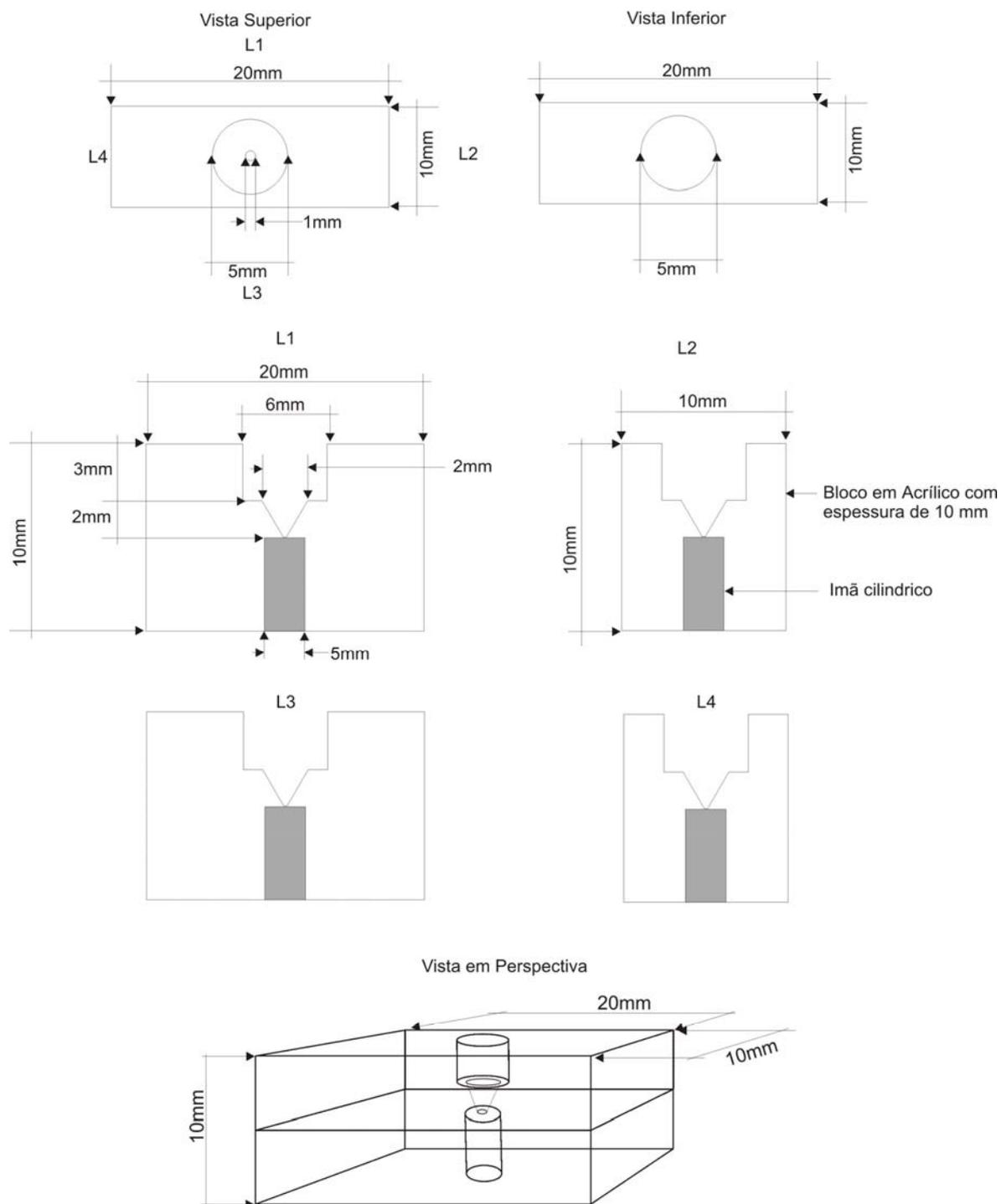
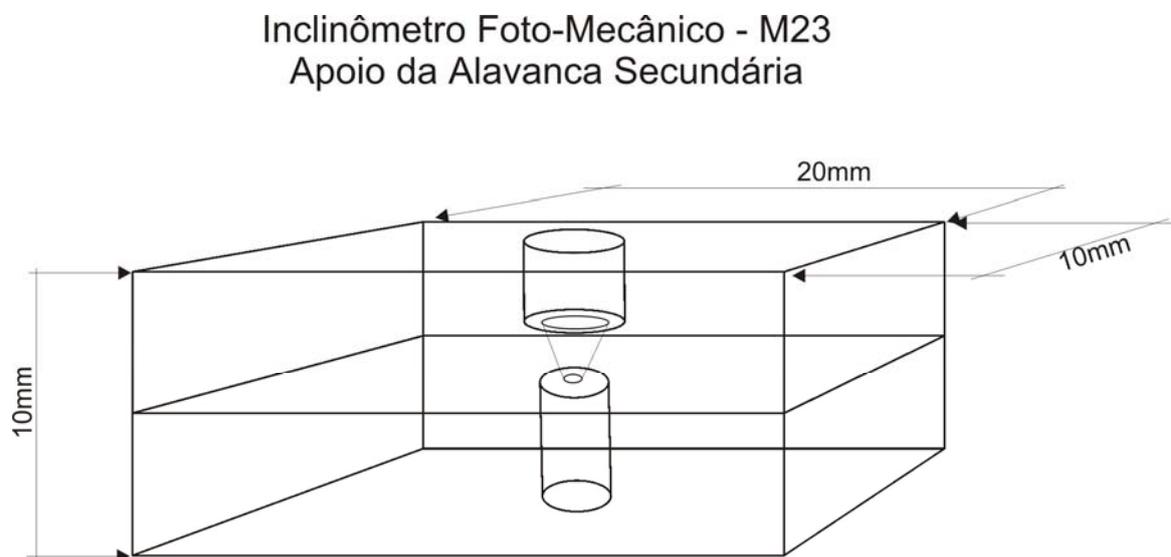


FIGURA 58 – DETALHES DO APOIO DA ALAVANCA SECUNDÁRIA



Alavanca Secundária

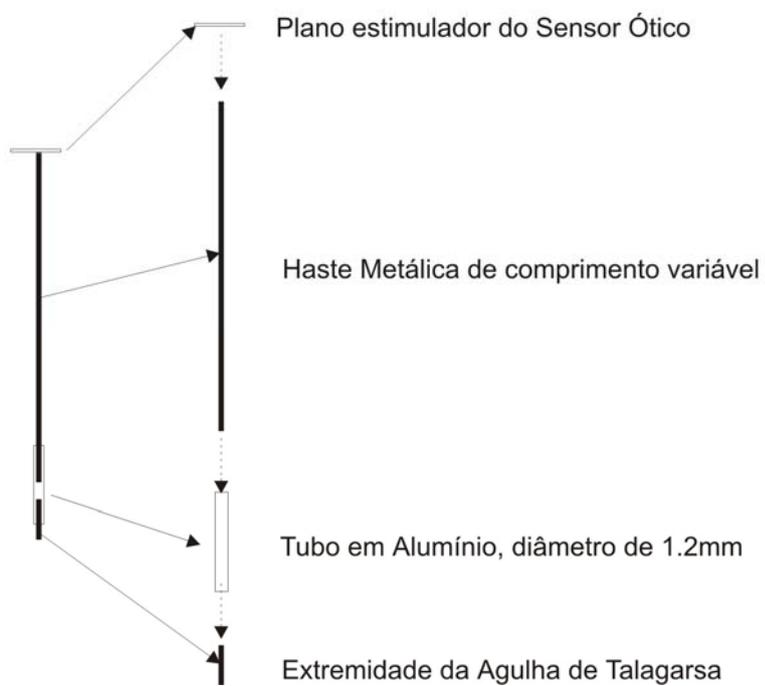


FIGURA 59 – SUPORTE DO SENSOR ÓTICO

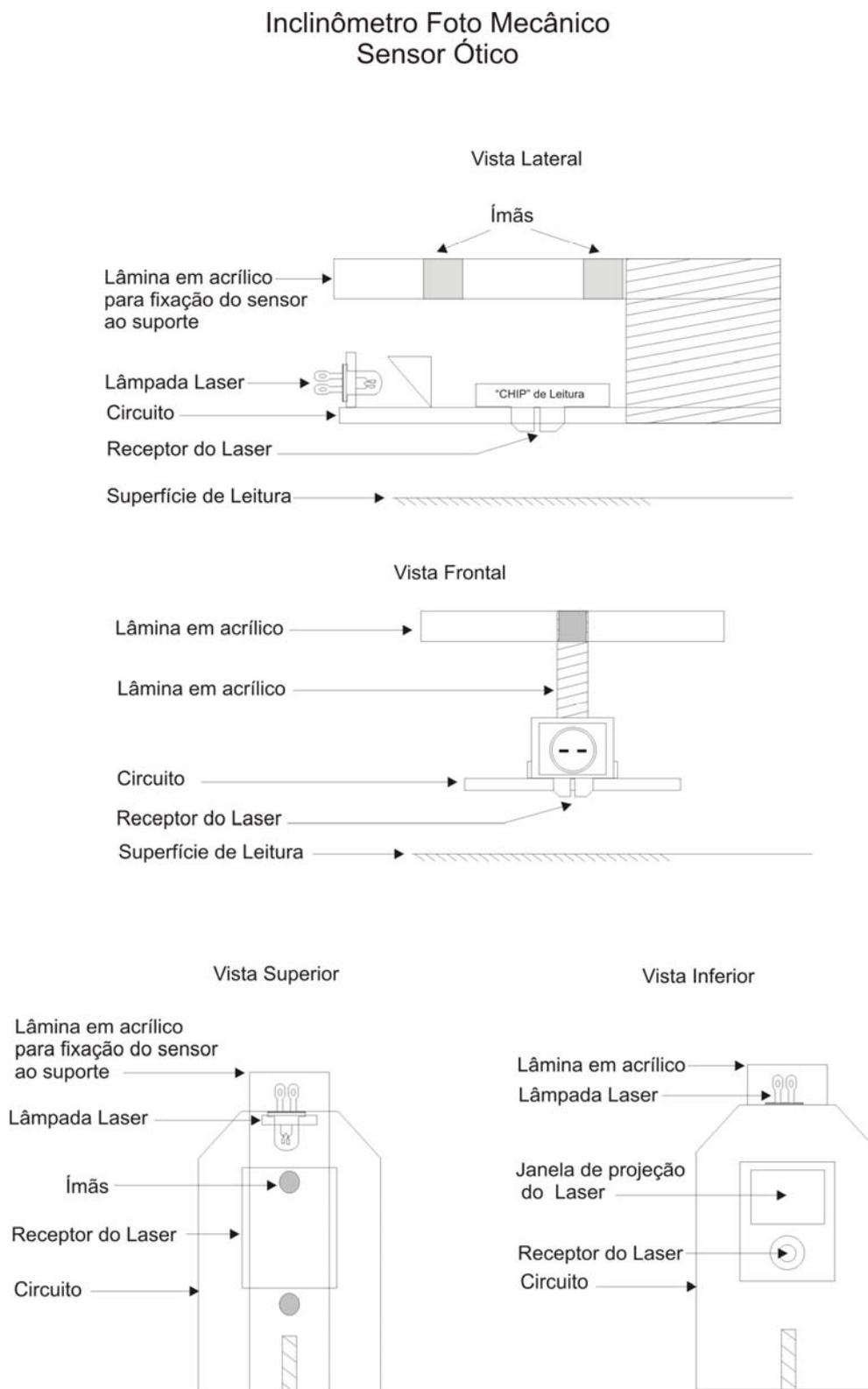
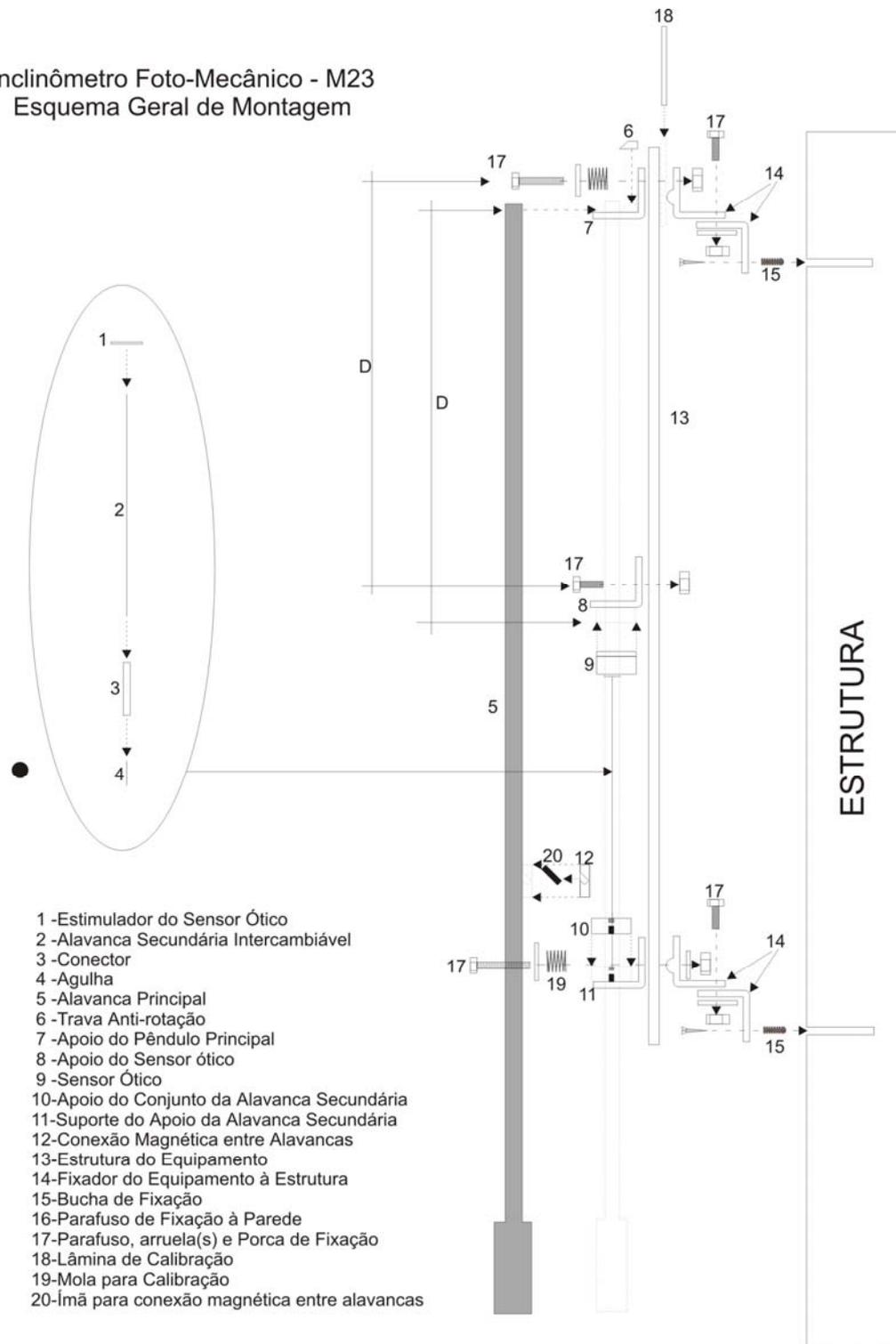


FIGURA 60 – ESQUEMA GERAL DE MONTAGEM

Inclinômetro Foto-Mecânico - M23
Esquema Geral de Montagem

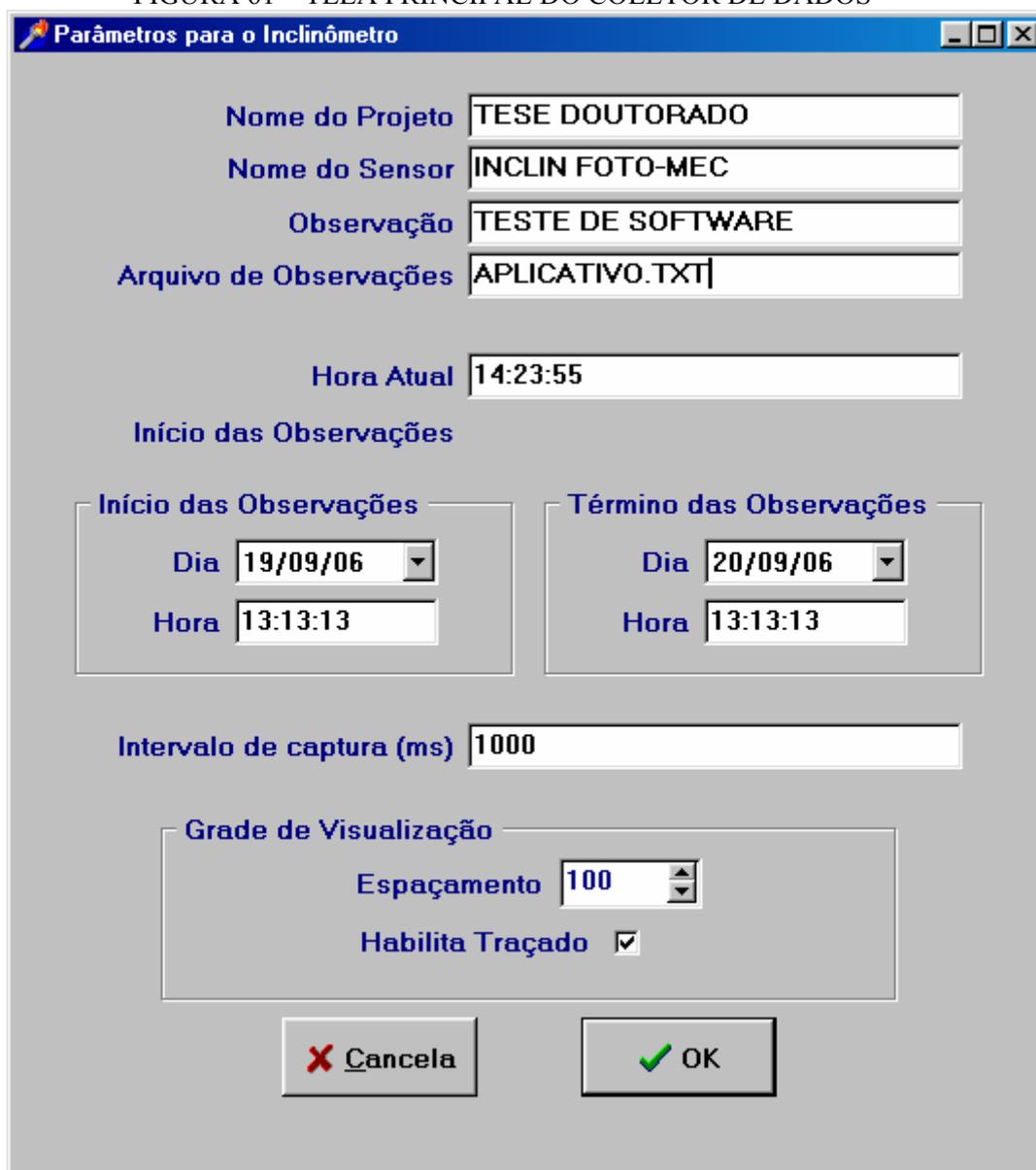


11 APÊNDICE 2 – APLICATIVO PARA COLETA DE DADOS

O software apresentado neste anexo foi desenvolvido (DELPHI 4.0) para permitir a coleta de dados por quem desejar construir um inclinômetro segundo as plantas e desenhos apresentados no apêndice 1. A listagem dos componentes se encontram no anexo 3.

Como pode ser observado na figura 61 a tela principal recebe as informações necessárias para a coleta de dados segundo o desejo do usuário.

FIGURA 61 – TELA PRINCIPAL DO COLETOR DE DADOS



Parâmetros para o Inclinômetro

Nome do Projeto: TESE DOUTORADO

Nome do Sensor: INCLIN FOTO-MEC

Observação: TESTE DE SOFTWARE

Arquivo de Observações: APLICATIVO.TXT

Hora Atual: 14:23:55

Início das Observações

Início das Observações

Dia: 19/09/06

Hora: 13:13:13

Término das Observações

Dia: 20/09/06

Hora: 13:13:13

Intervalo de captura (ms): 1000

Grade de Visualização

Espaçamento: 100

Habilita Traçado:

Cancela OK

O primeiro campo refere-se ao projeto a ser desenvolvido, o segundo refere-se ao sensor utilizado. O campo observação é útil para adicionar alguma informação extra. Estes três campos têm um espaço disponível de 20 caracteres de informação para cada um. O quarto campo recebe o nome do arquivo onde se deseja gravar as informações localmente. Este arquivo será gravado no mesmo diretório onde está o programa para coleta de dados e tem espaço de trinta caracteres para sua denominação.

O quinto campo é apenas um informativo da hora atual e os demais campos servem para adicionar o dia e hora de início e término da coleta de dados. O décimo campo (intervalo de captura) tem como unidade milésimos de segundo, ou seja, se desejamos intervalo de captura de 1seg devemos escrever 1000 naquele espaço. Múltiplos de um segundo corresponderão a múltiplos de 1000.

Para facilidade de visualização da movimentação do sensor pode-se determinar um grid de fundo cujo espaçamento é fornecido pelo usuário no campo 11. O valor padrão é 10, isto é, intersecções de um reticulado no formato 10 x 10 pixels.

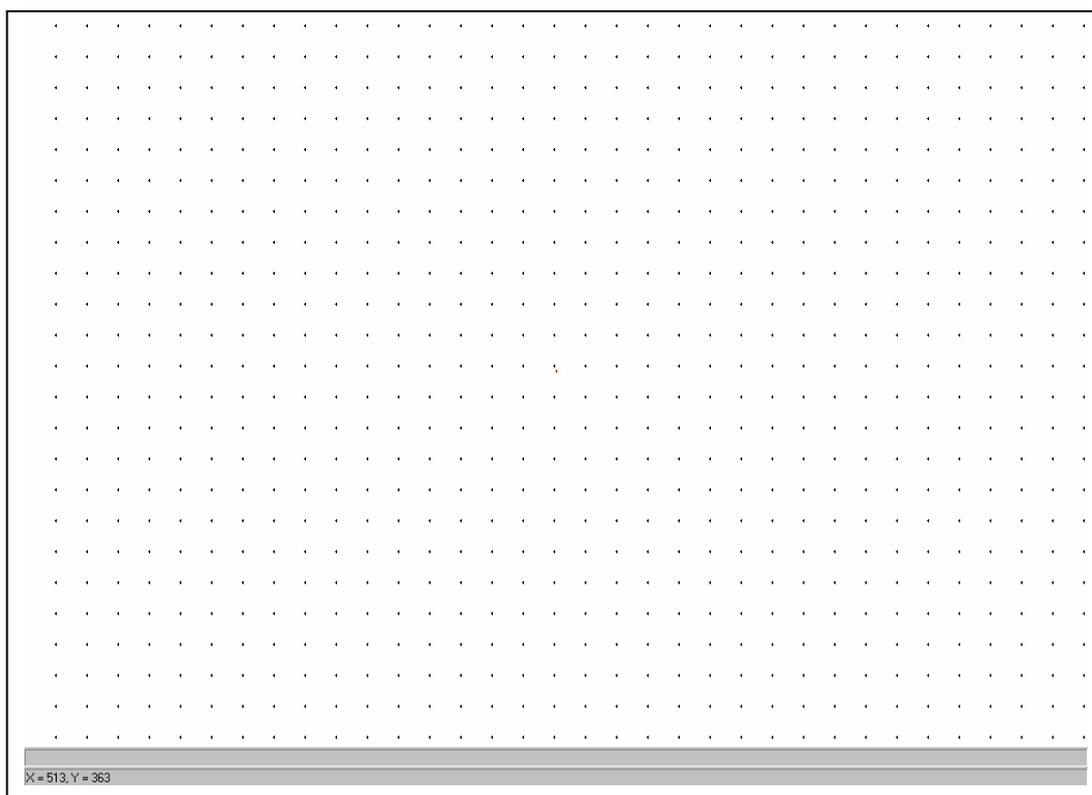
Se o usuário não desejar que o percurso do cursor durante o processo de coleta de dados seja apresentado na tela deverá desativar a caixa de verificação do campo 12. O padrão é caixa ativada. Um detalhe importante neste processo é que quando o cursor se desloca para baixo na tela equivale a dizer que a estrutura moveu a parte acima do inclinômetro em direção ao observador postado de frente para a estrutura. Se o cursor mover-se para cima na tela equivale a dizer que a parte da estrutura acima do inclinômetro afastou-se do observador. Movimento para a esquerda equivale a movimento para a esquerda da estrutura e para a direita movimento para a direita.

Após inicializado o programa ele armazena estas informações em um arquivo denominado INCLINOCONFIG.INI. Desta maneira se houver alguma interrupção as

informações da última utilização serão reapresentadas nos campos da tela de fornecimento de parâmetros para o inclinômetro. A primeira inicialização do programa apresenta uma mensagem de erro referente à inexistência do arquivo. Basta reiniciar que daí em diante não mais ocorrerá tal erro.

Após a confirmação para início da coleta a tela se mostra como a apresentada na figura 62. No fundo aparece o grid (representado apenas pelos cruzamentos das linhas e colunas), a posição atual do mouse e, no rodapé, as coordenadas do local onde se encontra o mouse. Durante o intervalo de tempo até o início programado para coleta o usuário poderá colocar o mouse no local desejado na tela a partir de onde começará a observação.

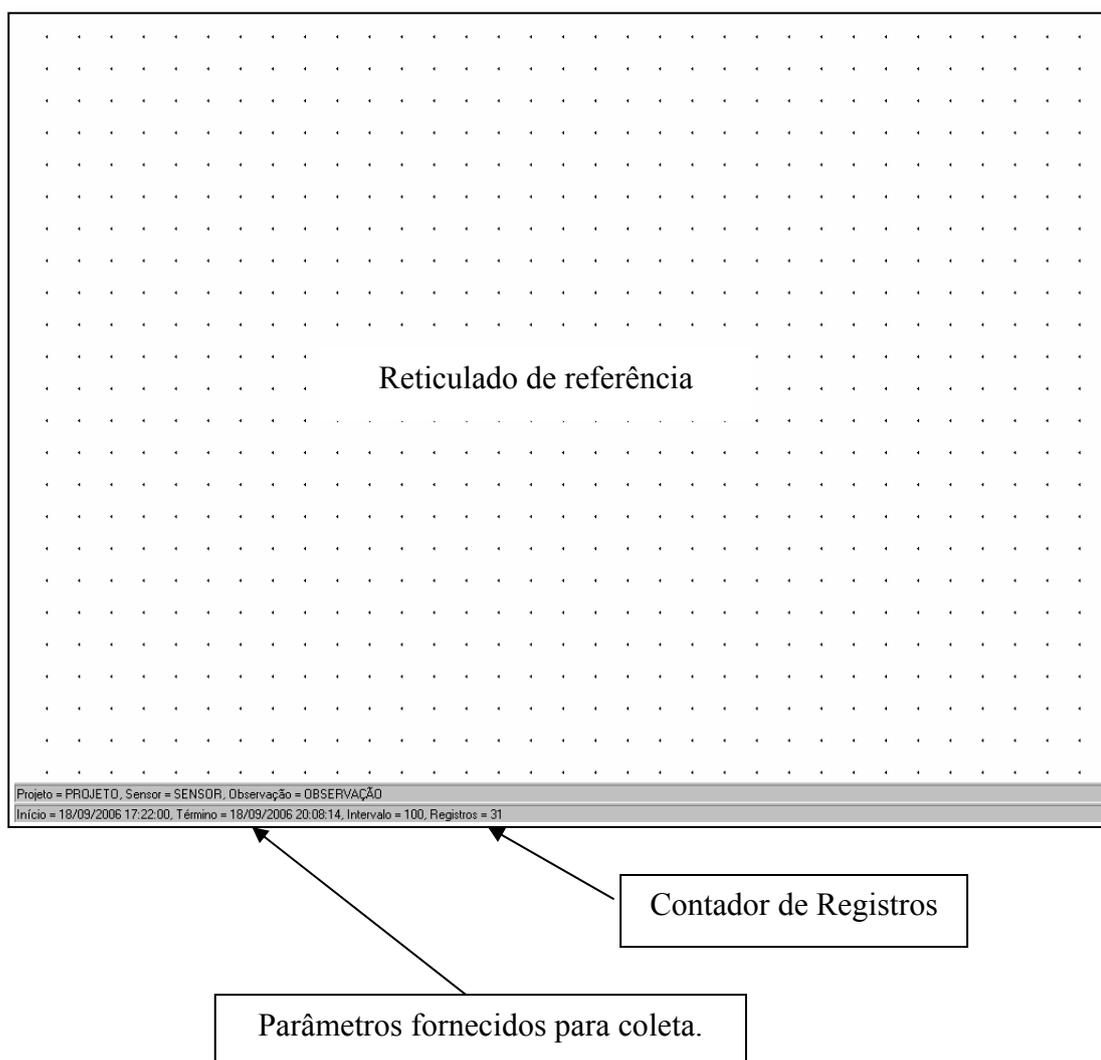
FIGURA 62 – GRID DO COLETOR DE DADOS



Passado o intervalo de tempo há mudança de tela e ela se apresenta como a apresentada na figura 63. No rodapé são apresentados agora os parâmetros inseridos para a observação e um contador de registros gravados. Como o tempo de gravação

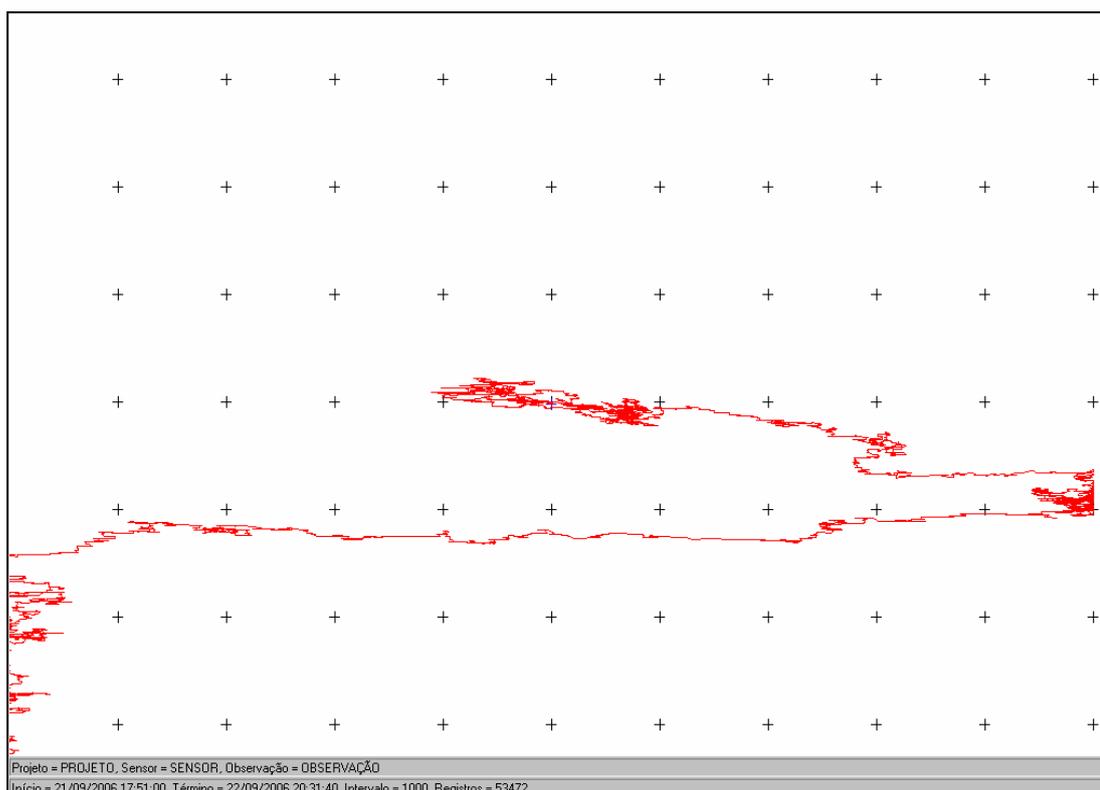
pode ser grande, quando comparado com o intervalo de captura, os dados são gravados em memória e transferidos para o arquivo. Por este motivo pode-se ocorrer mudança do contador de duas em duas unidades ou três em três, etc. Isto significa que como a gravação é lenta os dados podem ser gravados em pequenos blocos.

FIGURA 63 – TELA COLETOR DE DADOS APÓS INÍCIO



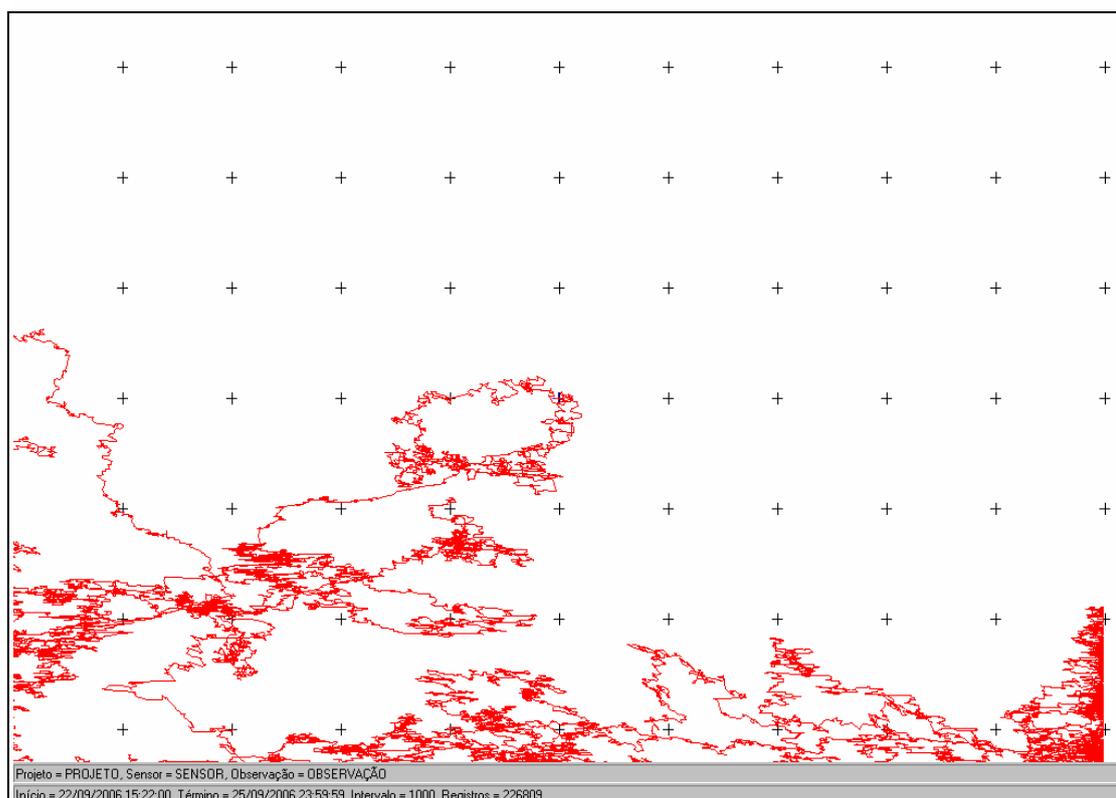
A figura 64 contém um exemplo de tela onde o posicionamento relativo estimulador-sensor é geometricamente inadequado. Observa-se que no início das observações a detecção está estável e dentro de limites. Após algum tempo as leituras começam a degenerar e sugere uma movimentação excessiva para a direita até atingir o limite da tela, retornando em seguida para a esquerda atingindo o outro limite. Considerando a separação do grid a variação entre limites equivaleria a 1200 pulsos, ou seja a aproximadamente 1,20m à altura de 100m.

FIGURA 64 – MAU POSICIONAMENTO RELATIVO ESTIMULADOR-SENSOR



A figura 65 apresenta um exemplo de tela com a movimentação completamente irregular da parede. Neste caso a distância estimulador-sensor estava correta porém a superfície irregular do estimulador exerceu influência sobre as leituras.

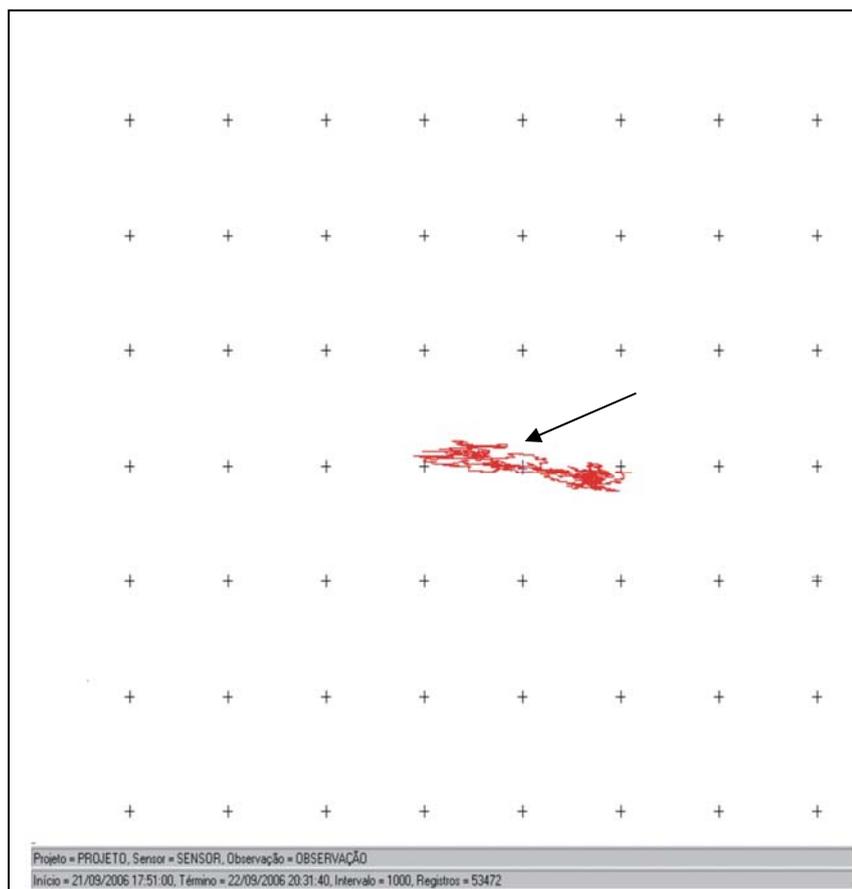
FIGURA 65 – MÁIS LEITURAS DEVIDAS À SUPERFÍCIE IRREGULAR DO ESTIMULADOR



A figura 66 contém um exemplo de tela após correto posicionamento relativo sensor-estimulador, superfície estimuladora plana e ganho adequado da alavanca secundária. Foram utilizados os mesmos parâmetros para coleta de dados, mesma origem para o processo de coleta e mesmo tempo de observação. Neste caso observa-se que as variações experimentadas pela estrutura não ultrapassaram os limites de apresentação em tela. O espaçamento do grid é de 100 pixels. Observa-se uma movimentação total de aproximadamente 200 pixels na direção paralela à estrutura e

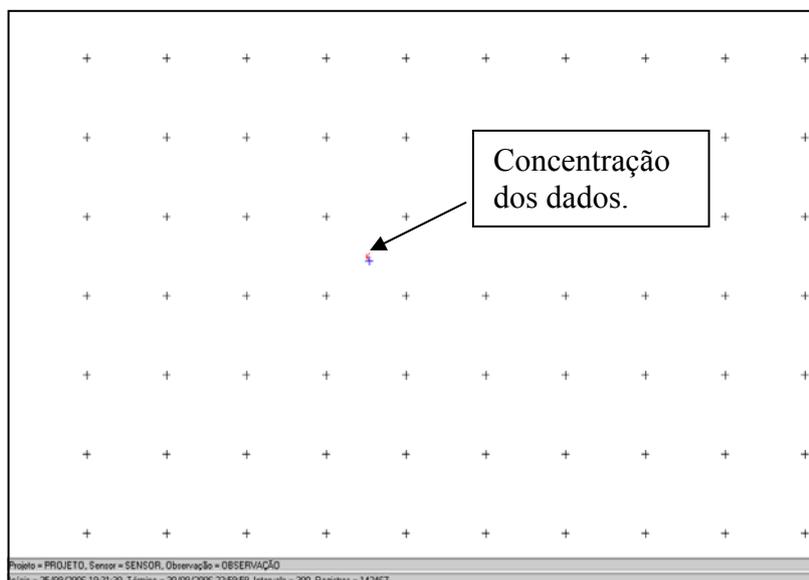
de aproximadamente 20 pixels na direção perpendicular. Este gráfico, assim como os demais, apresenta os dados brutos.

FIGURA 66 – CORRETO POSICIONAMENTO DO ESTIMULADOR COM SUPERFÍCIE PLANA



A figura 67 mostra um exemplo de tela que onde observa-se o uso da alavanca secundária com ganho muito pequeno com relação a movimentação experimentada pela estrutura. Nota-se que os dados estão acumulados numa região muito pequena.

FIGURA 67 – ALAVANCA SECUNDÁRIA MAL ESCOLHIDA



12 APÊNDICE 3 – SOFTWARE PARA COLETA DE DADOS

A seguir é apresentada a codificação do software utilizado para coleta de dados em Delphi 4.0. Esta codificação refere-se ao aplicativo cujas telas foram apresentadas no apêndice 2.

```

unit Main;
interface
uses
  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
  Parm, ExtCtrls, StdCtrls, Spin, Menus, ComCtrls;

type
  TFMain = class(TForm)
    Timer1: TTimer;
    PopupMenu1: TPopupMenu;
    Parmetros1: TMenuItem;
    N1: TMenuItem;
    Sair1: TMenuItem;
    StatusBar1: TStatusBar;
    StatusBar2: TStatusBar;
    Image1: TImage;
    procedure FormCreate(Sender: TObject);
    procedure FormPaint(Sender: TObject);
    procedure Timer1Timer(Sender: TObject);
    procedure FormKeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
    procedure Parmetros1Click(Sender: TObject);
    procedure Sair1Click(Sender: TObject);
    procedure Image1MouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X,
      Y: Integer);
  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
    function ReadCfg: boolean;
    procedure SaveCfg;
    procedure DisplayGrid;
    procedure WriteObservacao;
  end;

var
  FMain: TFMain;

```

Type

```
TReg = record
  N : integer; // Qtde de registros prontos para serem escritos
  B : boolean; // Tem registro para escrever e está escrevendo
  T : array[1..1000] of TDateTime;
  X : array[1..1000] of integer;
  Y : array[1..1000] of integer;
end;
```

Var

```
Reg : TReg;
NewReg : integer;
Liberado : boolean;
OldX, OldY, EspelhoX, EspelhoY : integer;
```

implementation

```
{ $R *.DFM }
```

Var

```
Inicio, ComecoMouse, Grava : boolean;
Registros : integer;
Tid, Tfd : TDateTime;
```

```
function TFMMain.ReadCfg: boolean;
```

Var

```
F : File of TParam;
Ok : boolean;
Pat : string;
```

begin

```
Ok := True;
```

Try

```
Pat := ExtractFilePath(Application.ExeName);
If FileExists(Pat+'INCLINOCONFIG.INI') then
begin
  AssignFile(F, Pat+'INCLINOCONFIG.INI');
  Reset(F);
  Read(F, Prm);
  CloseFile(F);
```

end

else

begin

```
Prm.Proj := "";
Prm.Sens := "";
Prm.Obs := "";
```

```

    Prm.Arq := Pat+'INCLINO1.TXT';
    Prm.Inicio := Now;
    Prm.Final := Now + 1;
    Prm.Tempo := 5000;
    Prm.Traco := True;
    Prm.Grid := 10;
end;
Except
    Ok := False;
    ShowMessage('ERRO: Leitura de Arquivo de Configuração');
    CloseFile(F);
end;
Result := Ok;
end;

```

```

procedure TFMain.SaveCfg;
Var
    F : File of TParm;
    Pat : string;
begin
    Pat := ExtractFilePath(Application.ExeName);
    AssignFile(F, Pat+'INCLINOCONFIG.INI');
    Rewrite(F);
    Write(F, Prm);
    CloseFile(F);
end;

```

```

procedure TFMain.DisplayGrid;
Const
    E = 5;
Var
    W, H, C, L, Co, Lo : integer;
begin
    Image1.Canvas.Pen.Color := clBlack;
    Image1.Canvas.Pen.Width := 1;
    W := Image1.ClientWidth;
    H := Image1.ClientHeight;

    // Posição central de um alvo => Origem dos Alvos
    Co := W div 2;
    While (Co > Prm.Grid + 10) do Co := Co - Prm.Grid;
    Lo := H div 2;
    While (Lo > Prm.Grid + 10) do Lo := Lo - Prm.Grid;

    C := Co;

```

```

While (C < W) do
begin
  L := Lo;
  While (L < H) do
  begin
    With Image1.Canvas do
    begin
      MoveTo(C-E,L);
      LineTo(C+E,L);
      MoveTo(C,L-E);
      LineTo(C,L+E);
    end;
    L := L + Prm.Grid;
  end;
  C := C + Prm.Grid;
end;
end;

```

```

procedure TFMain.WriteObservacao;

```

```

Var

```

```

  I : integer;

```

```

  F : TextFile;

```

```

  Pat, S, X : string;

```

```

  Sp, Ss, So : string;

```

```

begin

```

```

  If Reg.B then

```

```

  begin

```

```

    // Projeto/Sensor/Observação

```

```

    Sp := Prm.Proj;

```

```

    While (Length(Sp) < 30) do Sp := Sp + ' ';

```

```

    Ss := Prm.Sens;

```

```

    While (Length(Ss) < 30) do Ss := Ss + ' ';

```

```

    So := Prm.Obs;

```

```

    While (Length(So) < 30) do So := So + ' ';

```

```

    S := Sp + ';' + Ss + ';' + So;

```

```

    // Path do Arquivo

```

```

    Pat := ExtractFilePath(Application.ExeName);

```

```

    AssignFile(F, Pat+Prm.Arq);

```

```

    If FileExists(Pat+Prm.Arq) then Append(F) else Rewrite(F);

```

```

    Application.ProcessMessages;

```

```

    For I := 1 to Reg.N do

```

```

    begin

```

```

      // Data/Hora

```

```

      X := FormatDateTime('dd/mm/yy;hh:nn:ss', Reg.T[I]);

```

```

      Writeln(F, S, ',', X, ',', IntToStr(Round(Reg.X[I])), ',', IntToStr(Round(Reg.Y[I])));

```

```

    { Display na Tela }
    Inc(Registros);
    Inc(NewReg);
    Tfd := Now;
    // Atualização de minuto em minuto (60s)
    If (Tfd - Tid > 1/(24*3600)) then
    begin
        StatusBar2.SimpleText := 'Projeto = '+Trim(Sp)+'', Sensor = '+Trim(Ss)+'',
        Observação = '+Trim(So);
        StatusBar1.SimpleText := 'Início = '+FormatDateTime('dd/mm/yyyy
hh:nn:ss',Prm.Inicio)+
        ', Término = '+FormatDateTime('dd/mm/yyyy
hh:nn:ss',Prm.Final)+
        ', Intervalo = '+IntToStr(Prm.Tempo)+
        ', Registros = '+IntToStr(Registros);
        Tid := Tfd;
    end;
    Application.ProcessMessages;
end;
CloseFile(F);
// Gravei todos os registros existentes
Reg.N := 0;
Reg.B := False;
end;
end;

```

```

procedure TFMain.FormCreate(Sender: TObject);
begin
    Inicio := True;
    Grava := False;
    Liberado := False;
    Registros := 0;
    NewReg := 0;
    Reg.N := 0;
    Reg.B := False;
    Tid := Now;
    ComecoMouse := True;
    EspelhoX := ClientWidth;
    EspelhoY := ClientHeight;
end;

```

```

procedure TFMain.FormPaint(Sender: TObject);
begin
    If Inicio then
    begin

```

```

Inicio := False;
If ReadCfg then
begin
  Tid := Now;
  FParm.ShowModal;
end
else
  Self.Close;
end;
end;

procedure TFMain.Timer1Timer(Sender: TObject);
Const
  E = 5;
Var
  Mouse : TMouse;
begin
  Grava := ((Now >= Prm.Inicio) and (Now <= Prm.Final));
  If Grava and Liberado then
  begin
    Inc(Reg.N);
    Reg.T[Reg.N] := Now;
    If ComecoMouse then
    begin
      OldX := Mouse.CursorPos.X;
      OldY := Mouse.CursorPos.Y;
      EspelhoX := 2*OldX;
      EspelhoY := 2*OldY;
      ComecoMouse := False;
      Image1.Canvas.Pen.Color := clRed;
      Image1.Canvas.Pen.Width := 1;
      Reg.X[Reg.N] := EspelhoX - Mouse.CursorPos.X;
      Reg.Y[Reg.N] := EspelhoY - Mouse.CursorPos.Y;
      Image1.Canvas.Pen.Color := clBlue;
      Image1.Canvas.MoveTo(OldX-E,OldY);
      Image1.Canvas.LineTo(OldX+E,OldY);
      Image1.Canvas.MoveTo(OldX,OldY-E);
      Image1.Canvas.LineTo(OldX,OldY+E);
      Image1.Canvas.Pen.Color := clRed;
    end
  else
  begin
    Reg.X[Reg.N] := EspelhoX - Mouse.CursorPos.X;
    Reg.Y[Reg.N] := EspelhoY - Mouse.CursorPos.Y;
    Application.ProcessMessages;
  end;
end;

```

```

If Prm.Traco then
begin
  Image1.Canvas.MoveTo(OldX, OldY);
  Application.ProcessMessages;
  Image1.Canvas.LineTo(Reg.X[Reg.N], Reg.Y[Reg.N]);
  Application.ProcessMessages;
end;
OldX := Reg.X[Reg.N];
OldY := Reg.Y[Reg.N];
end;
If (not Reg.B) then
begin
  Reg.B := True;
  Application.ProcessMessages;
  WriteObservacao;
end;
end;
end;

procedure TFMain.FormKeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
begin
  If Ord(Key) = 27 then
  begin
    Timer1.Enabled := False;
    Close;
  end;
end;

procedure TFMain.Parmetros1Click(Sender: TObject);
begin
  Liberado := False;
  Tid := Now;
  FParm.ShowModal;
end;

procedure TFMain.Sair1Click(Sender: TObject);
begin
  Close;
end;

procedure TFMain.Image1MouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X,
  Y: Integer);
begin
  If (Liberado and (NewReg = 0)) then
  begin

```

```
    StatusBar1.SimpleText := 'X = '+IntToStr(X)+' Y = '+IntToStr(Y);  
end;  
end;  
  
end.
```

13 APÊNDICE 4 – DISPONIBILIZAÇÃO DE DADOS

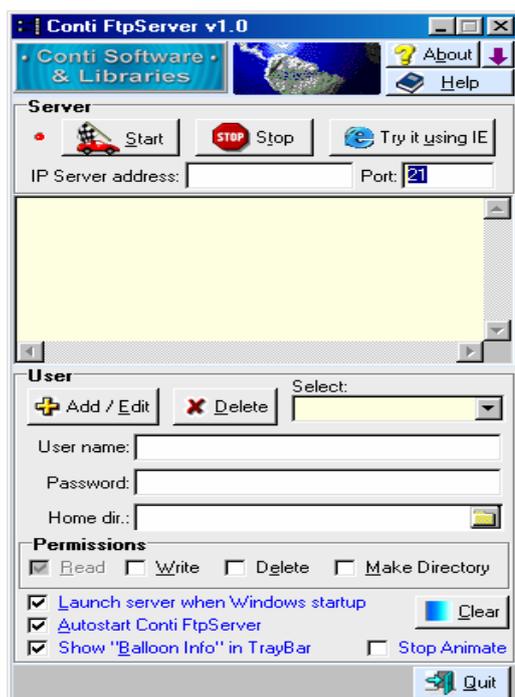
Para a comunicação de dados pode-se utilizar o “FTP- File Transfer Protocol” – Protocolo de Transferência de Arquivos. Para materializarmos esta idéia é necessário seguir alguns passos:

- a- **criar uma pasta** onde será gravado o arquivo de dados a ser disponibilizado;
- b- utilizar um **programa** que “crie” um **servidor de arquivos** no computador; remoto **onde estão sendo gravadas as observações**;
- c- **conectar** este computador remoto à **Internet** e
- d- utilizar um **navegador FTP**, isto é, software instalado no computador **a partir do qual** deseja-se acessar os dados remotos.

Para criar a pasta deve-se utilizar os recursos do sistema operacional instalado no computador remoto. Por exemplo: criar pasta em C:/INCLINÔMETRO/**DADOS**. O arquivo de dados produzido pelo software deverá estar nesta pasta DADOS.

Para disponibilizar os dados existem diversos programas para criar servidores de arquivos. Entre eles podemos citar o “Conti_FtpServer v1.0”, cuja tela inicial é a apresentada na figura 68:

FIGURA 68 – TELA PRINCIPAL DO “CONTI FTP SERVER v1.0”



O quadro 3 apresenta os campos a serem preenchidos no software que cria o servidor de arquivos.

QUADRO 3 - CONTEÚDO DOS CAMPOS	
NOME DO CAMPO	CONTEÚDO A INSERIR
IP Server Address	Endereço onde o seu computador está conectado à internet. Ele se encontra em: Iniciar- Configurações- Painel de Controle- REDE- Configuração-TCP/IP- Propriedades- Endereço de IP, se estiver sendo usado o sistema operacional Windows. Por exemplo: 123.45.678.99
PORT	Utiliza-se normalmente a 21
Select	É um nome local significativo que será dado ao usuário. Por exemplo: OBSERVADOR.
User name:	Nome que o usuário deverá fornecer quando solicitado no acesso à pasta que será disponibilizada. Por exemplo: ALFA
Password:	Senha que será solicitada ao usuário quando acessar a pasta que será disponibilizada. Por exemplo: BETA
Home dir.:	Local onde está situada a pasta a ser disponibilizada. Por exemplo: C:/INCLINÔMETRO/DADOS
Permissions	Marca-se as permissões concedidas ao usuário. O padrão é ser apenas leitura.
Launch Server	Ativar o servidor assim que ativado o Windows.
Auto Start Conti_FtpServer	Ativar o software Conti_Ftp Server automaticamente
Show Balloon Info	Mostrar o ícone na barra de ferramentas

O campo maior no centro da janela principal apresenta um histórico dos acessos feitos àquela pasta compartilhada.

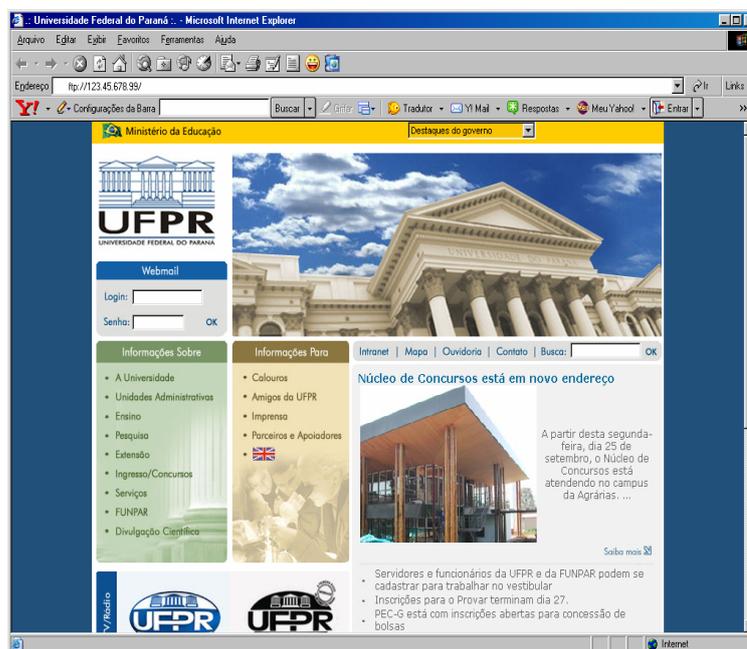
A pasta selecionada para disponibilização estará disponível sempre que o programa servidor estiver funcionando. Todo o conteúdo da pasta disponibilizada poderá ser acessado pelo usuário conforme as permissões concedidas. Por questões de segurança é interessante manter o software para coleta de dados em pasta diferente daquela onde estão sendo gravados os dados. Pode-se, por exemplo, colocar o software na pasta raiz INCLINÔMETRO. A disponibilização da pasta feita aqui não tem nada a

ver com o “compartilhamento” feito através do sistema operacional. Neste caso o arquivo compartilhado atenderá aos demais computadores da rede interna da empresa enquanto a disponibilização via FTP torna aquela pasta acessível a qualquer usuário da Internet que tenha identificação o endereço do IP do computador remoto, e, nome (“Username”) do usuário (ALFA) e senha (“Password”) (BETA) cadastrados no servidor.

Para acessar os dados pode-se utilizar um navegador Ftp (como o MS_FTP) ou um navegador internet como o Internet Explorer (figura 69). No segundo caso (figura 69) deve-se digitar na linha “Endereço:” do navegador o Endereço de IP onde se planeja acessar o arquivo procurado precedido da sigla ftp://. No exemplo será: ftp://123.45.678.99/

FIGURA 69 – TELA PRINCIPAL DO INTERNET EXPLORER

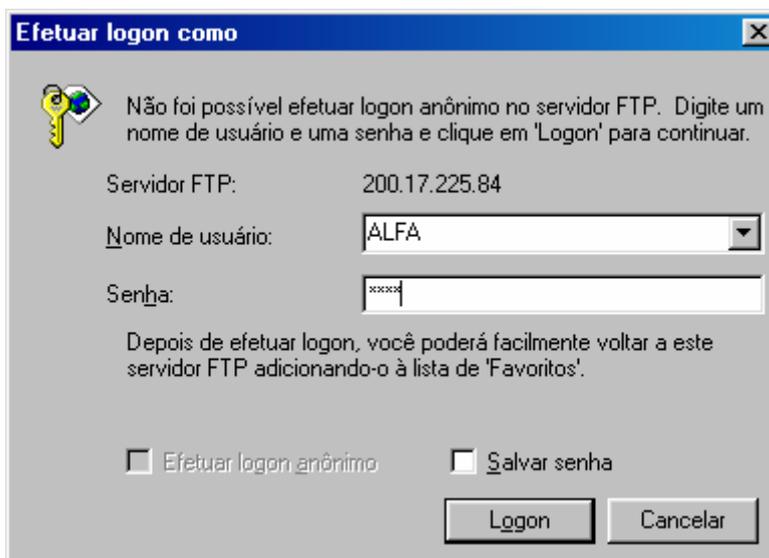
Digitar aqui o endereço de IP onde será lido o arquivo: ftp://123.45.678.99/



O software, após encontrar o endereço mencionado, solicitará (figura 70) então o nome do usuário e senha cadastrados no computador remoto, que nos exemplos são

respectivamente ALFA e BETA (veja figura a seguir). A pasta disponibilizada será apresentada e o acesso poderá ser feito de acordo com as permissões concedidas.

FIGURA 70 – SOLICITAÇÃO DE DADOS COMPLEMENTARES



Quando utilizamos o MS_FTP ao efetuarmos a conexão com o computador remoto o software solicita alguns dados para o acesso. Entre eles são pedidos o Endereço de IP (123.45.678.99, do exemplo), nome do usuário (ALFA) e senha (BETA), como no caso do software Conti_Ftp Server. A diferença é o formato da janela principal e outras características intrínsecas do programa.

14 ANEXO 1 - TERMOS TÉCNICOS UTILIZADOS EM INSTRUMENTAÇÃO GEODÉSICA

A terminologia utilizada em levantamentos geodésicos, principalmente no que tange a instrumentação geodésica, gera muita incerteza e mesmo conflito de interpretação na comunidade. Alguns termos apresentados a seguir estão baseados em FAGGION (2001),(FAGGION, P, VEIGA, L, NADAL, C.A., 2004).

Acurácia de um instrumento de medição - Aptidão de um instrumento de medição para dar respostas próximas a um valor verdadeiro

Ajustabilidade - Capacidade de um dispositivo em reproduzir o mesmo valor quando parâmetros específicos são ajustados independentemente sob condições estabelecidas de uso.

Calibração - Conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento de medição ou valores representados por uma medida materializada ou um material de referência, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões.

Notas:

- 1 - O resultado de uma calibração permite determinar os erros de indicação de um instrumento de medir.
- 2 - Uma calibração também pode determinar outras propriedades metrológicas como o efeito de quantidades de influência.
- 3 - O resultado de uma calibração pode ser registrado em um documento, denominado de certificado de calibração ou um relatório de calibração.

Certificação - Procedimento pelo qual um organismo imparcial credenciado atesta por escrito que o sistema ou pessoas são competentes para realizar tarefas específicas.

Certificado de calibração - Documento que atesta e inclui todas as informações solicitadas pelo cliente e necessárias para a interpretação dos resultados da calibração, registrando também todas as informações requeridas no método utilizado.

Faixa Nominal - Faixa de indicação que se pode obter em uma posição específica dos controles de um instrumento de medição.

Faixa de medição - Conjunto de valores de um mensurando para o qual admite-se que o erro de um instrumento de medição mantenha-se dentro dos limites especificados.

Instrumento de medição - dispositivo utilizado para uma medição, sozinho ou em conjunto com dispositivo(s) complementar(es).

Indicação (de um instrumento de medição): valor de uma grandeza fornecida por um instrumento de medição.

Grandeza (mensurável): atributo de um fenômeno, corpo ou substância que pode ser qualitativamente distinguido e quantitativamente determinado.

Escala (de um instrumento de medição): conjunto ordenado de marcas, associado a qualquer numeração, que faz parte de um dispositivo mostrador de um instrumento de medição.

Mensurando - Grandeza específica submetida à medição.

Metrologia - Ciência das medições.

Metrologia científica - Parte da metrologia que trata da pesquisa e manutenção dos padrões primários. No Brasil o Instituto Nacional de Metrologia (INMETRO) é quem detém os padrões nacionais, no Laboratório Nacional de Metrologia, e que é encarregado de repassar os valores dos mesmos aos demais laboratórios nacionais, inclusive aos responsáveis pela metrologia legal.

Metrologia legal - Parte da metrologia que trata das unidades de medida, métodos de medição e instrumentos de medição em relação às exigências técnicas e legais obrigatórias, as quais têm o objetivo de assegurar uma garantia pública do ponto de vista da segurança e da exatidão das medições. O principal objetivo estabelecido legalmente no campo econômico é proteger o consumidor enquanto comprador de produtos e serviços medidos, e o vendedor, enquanto fornecedor destes.

Atualmente, não só atividades no campo comercial são submetidas à supervisão governamental em países desenvolvidos, mas também, instrumentos de medição usados em atividades oficiais, no campo médico, na fabricação de medicamentos, bem como nos campos de proteção ocupacional, ambiental e da radiação são submetidos, obrigatoriamente, ao controle metrológico. A exatidão das medições assume especial importância no campo médico face aos vários efeitos negativos que resultados de menor confiabilidade podem provocar à saúde humana.

Padrão - Medida materializada, instrumento de medição, material de referência ou sistema de medição destinado a definir, realizar, conservar ou reproduzir uma unidade ou um ou mais valores de uma grandeza para servir como referência.

Padrão internacional - Padrão reconhecido por um acordo internacional para servir, internacionalmente, como base para estabelecer valores a outros padrões da grandeza a que se refere.

Padrão nacional - Padrão reconhecido por uma decisão nacional para servir, em um país, como base para estabelecer valores a outros padrões da grandeza a que se refere.

Padrão primário - Padrão que é designado ou amplamente reconhecido como tendo as mais altas qualidades metrológicas e cujo valor é aceito sem referência a outros padrões de mesma grandeza.

Padrão secundário - Padrão cujo valor é estabelecido por comparação a um padrão primário da mesma grandeza.

Padrão de referência - Padrão, geralmente tendo a mais alta qualidade metrológica disponível em um dado local ou em uma dada organização, a partir do qual as medições lá executadas são derivadas.

Padrão de trabalho - Padrão utilizado rotineiramente para calibrar ou controlar medidas materializadas, instrumentos de medição ou materiais de referência.

Rastreabilidade - Propriedade do resultado de uma medição ou do valor de um padrão estar relacionado a referências estabelecidas, geralmente padrões nacionais ou internacionais, através de uma cadeia contínua de comparações, todas tendo incertezas estabelecidas.

Reprodutibilidade - Quando se refere às medidas realizadas por um conjunto independente de dispositivos semelhantes, a reprodutibilidade constitui a habilidade desses dispositivos em reproduzir os mesmos resultados.

15 ANEXO 2 - INSTRUMENTAÇÃO E ANOMALIAS EM BARRAGENS

1 INSTRUMENTAÇÃO E ANOMALIAS

O principal objetivo da instrumentação é monitorar as condições relativas à segurança estrutural e operacional da barragem. Existem algumas anomalias que são comumente encontradas em barragens de concreto como percolações, trincas ou fraturas, depressões. Não se pode dispensar a realização de alguns trabalhos básicos em qualquer barragem de concreto de grande porte para a manutenção de um estado de segurança compatível com o interesse social e de desenvolvimento que a barragem necessita e para que não haja acidentes.

Segundo CAMARGO (1973), basicamente a estabilidade da estrutura se controla mantendo-a sob medição:

- os níveis d'água a montante e a jusante;
- os níveis de assoreamento do reservatório;
- os níveis piezométricos da água de percolação no contato concreto-rocha de fundação e
- controlando os movimentos experimentados pela estrutura com as variações de carga, através de trabalhos geodésicos de precisão, medição de deslocamentos com pêndulos, medida de abertura de juntas e de recalques da estrutura e suas fundações com extensômetros.

Os extensômetros têm por finalidade medir os deslocamentos lineares que ocorrem entre dois ou mais pontos da fundação ou da estrutura. Esses deslocamentos ocorrem devido a integração das deformações de natureza plástica e elástica provocadas pelos carregamentos a que fica sujeita a estrutura, seja na fase de construção ou operacional.

Os piezômetros são equipamentos responsáveis pela observação dos níveis d'água em furos de inspeção ou em locais específicos na estrutura. Tais informações

são muito importantes para a segurança da barragem, uma vez no projeto são informados os níveis aceitáveis de água de percolação nos drenos.

Os trabalhos geodésicos de precisão complementam, ou refinam, as medidas dos extensômetros pois mostram os deslocamentos absolutos da estrutura. Estes controles são comparados a posteriori com os padrões teóricos determinados no projeto. Indiretamente, estas medidas permitem uma avaliação dos esforços resistentes que se desenvolvem na estrutura e em suas fundações.

1.1 PRINCIPAIS TIPOS DE ANOMALIAS

Toda a estrutura de barragens de concreto está sujeita, seja na fase de construção ou na fase operacional, a diversas forças que podem interferir na estabilidade e durabilidade de todo o sistema.

No manual de segurança e inspeções de barragens elaborado pelo Ministério da Integração Nacional são citadas as principais anomalias existentes nestas estruturas.

1.1.1 Percolações

A passagem da água pelo maciço e fundação é chamada de percolação. A percolação torna-se um problema quando o solo do maciço ou da fundação é carregado pelo fluxo de água, ou quando ocorre um aumento de pressão na barragem ou na fundação. A percolação, quando não controlada pela drenagem interna incorporada na barragem e fundação, é geralmente chamada de percolação não controlada. As ações de inspeção mais executadas são: localizar os pontos de revências, medir as vazões e a turbidez, anotar o nível do reservatório no momento da medição da vazão, verificar a granulometria do material carregado (MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, 2002).

1.1.2 Trincas de Ressecamento

Podem ocorrer trincas em várias localidades da estrutura como na crista, no talude à jusante ou nas galerias internas podendo ser transversais ou longitudinais, cada uma delas com características diferentes. Para se inspecioná-las sugere-se: fotografar e registrar a locação, direção, profundidade, comprimento e largura, para poder comparar com medições anteriores. Aconselha-se a monitoração da evolução das trincas através de medições geodésicas precisas (MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL ,2002).

1.1.3 Instabilidade de Taludes

É referida aos vários deslizamentos, deslocamentos e pode ser agrupada em três categorias (MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL ,2002):

a) Ruptura superficial no talude de montante

Rebaixamento rápido com deslizamentos superficiais. Não causam ameaça à integridade da barragem, mas podem causar obstrução da tomada de água e deslizamentos progressivos mais profundos.

b) Ruptura superficial no talude de jusante

Deslizamentos rasos provocam aumento na declividade do talude e podem indicar perda de resistência do maciço, por saturação do talude, por percolação ou pelo fluxo superficial. Para inspecioná-las sugere-se: fotografar e registrar a locação, direção, profundidade, comprimento e largura de cada trinca observada, medir e registrar a extensão e deslocamento do material movimentado, procurar por trincas nas proximidades, especialmente acima do deslizamento, verificar percolações nas proximidades, monitorar a área para determinar se as condições estão evoluindo.

c) Ruptura profunda

É séria ameaça à integridade da barragem. É caracterizada por, talude de deslizamento íngreme bem definido, movimento rotacional e horizontal bem definido e trincas em formato de arco. As rupturas profundas, tanto no talude de montante como de jusante, podem ser indicações de sérios problemas estruturais. Na maioria dos casos, irá requerer o rebaixamento ou drenagem do reservatório para prevenir possíveis aberturas do maciço. Se há suspeita de deslizamento deve-se inspecionar com muito cuidado a área trincada ou escorregada que indique a causa do deslizamento e recomendar uma investigação para determinar a magnitude e a causa do evento, caso a suspeita seja de ruptura profunda.

1.1.4 Depressões

Podem ser localizadas ou abrangentes. Podem ser causadas por recalque no maciço ou fundação. Tais recalques podem resultar na redução da borda livre (folga) e representa um potencial para o transbordamento da barragem durante o período das cheias (MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL ,2002).

A ação das ondas no talude de montante pode remover o material fino do maciço ou a camada de apoio (transição) do rip-rap, descalçando-o e formando uma depressão quando o rip-rap recalca sobre o espaço vazio. Erosão regressiva ou “piping” com o subsequente colapso do material sobrejacente. Algumas áreas da superfície do maciço que pareçam depressões ou afundamentos podem ter sido resultado de finalização inadequada da construção, mas, mesmo assim, a causa deve ser determinada (MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL ,2002).

Ações de inspeção são: fotografar e registrar a locação, tamanho e profundidade de cada recalque observado, examinar cuidadosamente o fundo da depressão localizada para determinar se existe um vazio subjacente ou fluxo de água que poderia indicar a presença de um afundamento, investigar a causa do afundamento e determinar se existe ameaça à barragem (MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, 2002).

1.1.5 Tensões

Os problemas de resistências típicos a serem considerados consistem no comportamento de uma fundação em rocha de características mecânicas desfavoráveis, onde o projeto define determinados tratamentos de consolidação e reforço, trabalho termodinâmico do concreto. Há também concentração de forças singulares em galerias e outras descontinuidades previstas no projeto em determinados locais da fundação, zonas de apoio, etc.

Embora a deformabilidade da fundação seja em parte responsável pelos deslocamentos da estrutura ante os diversos estágios de solicitação nela atuantes, a determinação pura e simples desses deslocamentos não fornece, normalmente, elementos para a análise detalhada do estado de tensões nas fundações, sendo que se faça necessário medidas diretas no interior do maciço.

Um dos recursos mais freqüentes para a realização dessas medidas consiste em se aproveitar a rede de galerias abertas na rocha na fase de prospecção. Nessas galerias pode-se realizar instrumentação objetivando a medida de deformações como extensometria mecânica elétrica ou piezométrica, aliadas a nivelamento de precisão.