

DETERMINAÇÃO DO ERRO CÍCLICO EM  
DISTANCIÔMETROS ELETRÔNICOS

por

JUCILEI CORDINI

Dissertação aprovada como requisito parcial  
para obtenção do Grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em  
Ciências Geodésicas, pela comissão formada pelos  
professores:



PROF. Dr. MILTON DE AZEVEDO CAMPOS



PROF. MSc. ÁLVARO DOUBEK



PROF. MSc. CARLOS AURÉLIO NADAL

## Dedicatória

A minha esposa Margarete, em homenagem à sua abnegação e incentivo, que possibilitaram dedicação integral na elaboração deste trabalho.

Ao carinho e compreensão de minhas filhas Kariny, Aline e Hariany, toda minha gratidão.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço de forma especial as empresas Manfra e Cia. Ltda. e Teodolini - Equipamentos Topográficos Ltda, pela presteza no empréstimo do Laser, essencial à execução deste trabalho.

As empresas Manfra e Cia. Ltda., Engefoto-Engenharia de Aerolevantamentos S.A. e a Fundação ITCF pelos empréstimos dos equipamentos.

A Universidade Federal de Santa Catarina através do Departamento de Engenharia Civil, por permitir me ausentar e realizar este Curso.

Aos professores Álvaro Doubek e Milton de Azevedo Campos pela leitura, revisão, sugestões apresentadas e orientação deste trabalho.

Aos professores Wilson Alcântara Soares e Vicente Roberto Dumke pela ajuda e utilização do Laboratório de Ótica.

Aos colegas Marconi A. dos Santos, Gilberto Gagg e Lívio Jorge Alarma Zunino, incansáveis interlocutores durante a realização deste trabalho.

À Geóloga Izabel Simone Lazzari pela dedicação na orientação dos espelhos e obtenção das observações.

Ao Engenheiro Cartógrafo Pedro Luiz Faggion, funcionário do laboratório de Aferição, pela inestimável ajuda.

Aos professores, colegas e funcionários do Curso, pelo incentivo e ajuda.

## R E S U M O

A calibração completa de um IMED envolve várias determinações de erros sistemáticos, cujos valores se modificam em função do uso constante e envelhecimento do equipamento. Parte desta calibração destina-se à determinação do erro cíclico em laboratório, normalmente conduzida sobre uma Linha de Teste.

Este trabalho foi orientado no sentido de implementar e tornar operacional a Linha de Teste da UFPr, afim de adequá-la à seus propósitos e se transformar num instrumento útil para pós-graduandos, pesquisadores e usuários.

Dentre os trabalhos executados e melhorias introduzidas à Linha de Teste, destaca-se a implantação de cinco sistemas refletores (espelhos) que possibilita a obtenção de distâncias superiores a 100 metros.

Seis instrumentos de MED foram testados utilizando-se 03 e 05 espelhos normais, num total de 12 testes realizados; dois testes adicionais com espelhos frontais foram também realizados.

Os resultados são apresentados e comprovam a eficiência do método e a praticidade do procedimento adotado.

## A B S T R A C T

The complete calibration of a EDM I implicate in many determinations of systematic errors, whose values modify as a function of the constant use and the aging of the equipment. Part of this calibration is for determination of the cyclic error in laboratory, normally carried out over a Test Line.

This work was oriented in the meaning of to implement and at turning operational the Test Line of the UFPr , with the aim to adapt it to its purpose and at turning it a useful instrument to post-graduate, researchers and users.

Among the work carried out and the improvement introduced to the Test Line, it must be distinguished the implantation of five reflector systems (mirrors) that make possible to obtain distances over a hundred meters.

Six EDM I instruments were tested by the use of three and five normal mirrors making a total of twelve realized tests; two supplementary tests with frontal mirror were also realized.

The results are show and they confirm the efficiency of the method used and the practicality of the procedure adopted.

## S U M Á R I O

TÍTULO .....	i
DEDICATÓRIA .....	ii
AGRADECIMENTOS .....	iii
RESUMO .....	iv
ABSTRACT .....	v
SUMARIO .....	vi
LISTA DE FIGURAS .....	x
LISTA DE TABELAS .....	xii
LISTA DE FOTOGRAFIAS .....	xiii
1. INTRODUÇÃO .....	01
2. CONCEITOS BÁSICOS .....	06
2.1 Aspectos gerais da medida eletrônica de distâncias .....	06
2.2 Princípio da medição eletrônica utilizando transmissão contínua .....	07
2.3 Onda portadora .....	11
2.4 Modulação da onda portadora .....	12
2.5 Métodos de medida da diferença de fase .....	13
2.6 Condições atmosféricas específicas .....	14
2.7 Condições atmosféricas ambientes .....	16
2.8 Erro de zero ou constante aditiva ( $Z_0$ ).....	17
3. ERROS NA MEDIÇÃO ELETRÔNICA DE DISTÂNCIAS .	19
3.1 Análise dos erros utilizando a lei de propagação das variâncias .....	19

3.2	Erro na velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no vácuo .....	21
3.3	Erro no índice de refração .....	21
3.3.1	Luz e infravermelho como sinal de medida .....	22
3.4	Erro na frequência de modulação .....	23
3.5	Erro na diferença de fase .....	24
3.6	Erro na constante aditiva .....	24
3.7	Erro de escala ou erro proporcional .....	25
3.8	Erro de fase ou erro cíclico .....	26
4.	<b>O ERRO CÍCLICO NA CALIBRAÇÃO DE DISTANCIOMETROS ELETRONICOS .....</b>	<b>28</b>
4.1	Introdução .....	28
4.2	Determinação dos elementos do erro cíclico através da calibração com medidas de campo ....	30
4.3	Determinação dos elementos do erro cíclico através da calibração em laboratório .....	32
4.4	Modelo matemático para o cálculo da amplitude (A) e fase (B) do erro cíclico .....	36
4.5	Procedimento adotado na Linha de Teste da UFPr para a determinação do erro cíclico .....	38
4.6	Correções às distâncias devido ao erro cíclico	39
5.	<b>TRABALHOS PRELIMINARES DESENVOLVIDOS JUNTO À LINHA DE TESTE .....</b>	<b>43</b>
5.1	A Linha de Teste da UFPr .....	43
5.2	Pilar de altura regulável .....	44
5.3	Alinhamento e nivelamento do trilho .....	46
5.3.1	Verificação do nível eletrônico Talyvel-3. Teste de laboratório .....	52
5.4	Sistemas refletores de espelho .....	55
5.5	Alinhamento dos espelhos .....	59

5.6	Dispositivo de pontaria .....	63
5.7	Calibração da fita graduada .....	63
5.8	Determinação do erro de pontaria .....	67
6.	MEDIÇÕES NA LINHA DE TESTE DA UFPR .....	69
6.1	Acompanhamento das condições atmosféricas do local .....	69
6.2	Operações de medida .....	70
6.2.1	MED DM-S3L (TOPCON) .....	72
6.2.2	MED DM-501 (KERN) .....	77
6.2.3	MED DM-502 (KERN-I) .....	80
6.2.4	MED DM-502 (KERN-E) .....	83
6.2.5	MED DM-150 (KERN) .....	86
6.2.6	MED DM-102 (KERN) .....	89
6.3	Resultados dos ajustamentos .....	92
	DM-S3L .....	95
	DM-S3L .....	97
	DM-102 .....	99
	DM-150 .....	101
	DM-502 (KERN-E) .....	103
	DM-502 (KERN-I) .....	105
	DM-501 .....	107
6.3.1	Gráficos de correções devido ao erro cíclico ..	109
6.4	Análise dos resultados .....	113
7.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	116
7.1	Conclusões .....	116
7.2	Recomendações .....	117



ANEXOS - .....	119
ANEXO 01 - Procedimento para determinação da Umidade relativa .....	121
ANEXO 02 - Parâmetros atmosféricos na Linha de Teste da UFPr .....	119
ANEXO 03 - Variação da temperatura na Linha de Teste da UFPr .....	128
ANEXO 04 - Umidade Relativa detectada na Linha de Teste da UFPr .....	132
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	136

## L I S T A   D E   F I G U R A S

01	Princípio da medição eletrônica .....	07
02	Valores instantâneos de fase .....	10
03	Contagem de pulsos .....	14
04	Verificação do erro de zero .....	17
05	Exemplo de Linha Base de Multipilares .....	31
06	Esquema de uma Linha de Teste .....	32
07	Erro cíclico .....	37
08	Correção às distâncias devido ao erro cíclico .	42
09	Esquema da Linha de Teste (LT) da UFPr .....	48
10	Gráfico comparativo entre os nivelamentos geométrico e eletrônico .....	51
11	Desníveis finais da Linha de Teste .....	51
12	Esquema do calibrador .....	52
13	Desempenho do Nível eletrônico Talyvel-3 .....	55
14	Fenômeno da dupla reflexão .....	57
15	Laser e prisma refletor alinhados .....	61
16	Laser, prisma refletor e espelho alinhados ....	61
17	Correções aos valores nominais (01 m) .....	66
18	Correções aos valores nominais (12,5 m) .....	66
19	Curva observada x curva ajustada - DM-S3L .....	96
20	Idem - DM-S3L .....	96
21	Idem - DM-S3L .....	98
22	Idem - DM-S3L .....	98
23	Idem - DM-102 .....	100
24	Idem - DM-102 .....	100
25	Idem - DM-150 .....	102

26	Idem	- DM-150 .....	102
27	Idem	- DM-502-E ...	104
28	Idem	- DM-502-E ...	104
29	dem	- DM-502-I ...	106
30	Idem	- DM-502-I ...	106
31	Idem	- DM-501 .....	108
32	Idem	- DM-501 .....	108
33	Curva calibrada do erro cíclico	- DM-S3L .....	110
34	Idem	- DM-102 .....	110
35	Idem	- DM-150 .....	111
36	Idem	- DM-502-E ....	111
37	Idem	- DM-502-I ....	112
38	Idem	- DM-501 .....	112
39	Variação da temperatura na Linha de Teste .....		129
40	Umidade relativa detectada na Linha de Teste ..		133

## L I S T A   D E   T A B E L A S

01	Observações com o display zerado .....	53
02	Observações com o display não zerado .....	54
03	Correções aos valores nominais (01 m) .....	65
04	Correções aos valores nominais (12,5 m) .....	65
05	Teste com três espelhos .....	70
06	Teste com cinco espelhos .....	71
07	Distâncias com 03 espelhos normais - DM-S3L ...	73
08	Distâncias com 05 espelhos normais - DM-S3L ...	74
09	Distâncias com 03 espelhos frontais - DM-S3L ...	75
10	Distâncias com 05 espelhos frontais - DM-S3L ..	76
11	Distâncias com 03 espelhos normais - DM-501 ...	78
12	Distâncias com 05 espelhos normais - DM-501 ...	79
13	Distâncias com 03 espelhos normais - DM-502-I .	81
14	Distâncias com 05 espelhos normais - DM-502-I .	82
15	Distâncias com 03 espelhos normais - DM-502-E .	84
16	Distâncias com 05 espelhos normais - DM-502-E .	85
17	Distâncias com 03 espelhos normais - DM-150 ...	87
18	Distâncias com 05 espelhos normais - DM-150 ...	88
19	Distâncias com 03 espelhos normais - DM-102 ...	90
20	Distâncias com 05 espelhos normais - DM-102 ...	91
21	Parâmetros atmosféricos Linha de Teste .....	124

## L I S T A   D E   F O T O G R A F I A S

01	Interferômetro .....	34
02	Sistema de pontaria .....	34
03	Sistema refletor de espelho .....	35
04	Linha de Teste .....	45
05	Pilar de altura regulável .....	45
06	Suportes reguláveis .....	47
07	Nível eletrônico Talyvel-3 .....	50
08	Franjas de distorção (vidro de 4 mm) .....	58
09	Franjas de distorção (vidro de 6 mm) .....	58
10	Mesa para instalação e alinhamento do Laser ...	62

## 1 INTRODUÇÃO

Com o surgimento dos Distanciômetros Eletrônicos a tarefa de medição de distâncias ficou bastante facilitada. A entrada no mercado destes Instrumentos de Medida Eletrônica de Distâncias - IMED, provocou uma verdadeira revolução na Geodésia; não é para menos, basta lembrar que há alguns anos a medição de uma base utilizando o fio ou fita de invar, envolvia uma série de cuidados especiais, um significativo aparato de campo e demorava alguns meses.

Entretanto, não somente na Geodésia se fez sentir as vantagens com o surgimento dos distanciômetros. Os grandes empreendimentos da engenharia civil, tal como acompanhamento da execução e controle de barragens, entre outros, passaram também a usufruir dos benefícios advindos da utilização destes instrumentos, que apresentam inúmeras vantagens sobre os tradicionais processos de medida, tais como economia de tempo, facilidade de operação e principalmente precisão adequada para esses tipos de trabalhos.

A portabilidade e facilidade de operação, e principalmente a precisão conseguida com os distanciômetros mais modernos, são atrativos suficientes para a sua utilização nos mais diversos trabalhos topográficos e geodésicos.

Tão insinuantes vantagens motivaram sobremaneira a

aquisição de tais equipamentos não só pelas grandes empresas de levantamentos, mas também por pequenas firmas de topografia.

Mas, os IMED, a exemplo de outros equipamentos eletrônicos não estão livres de serem afetados pela ocorrência de erros sistemáticos. O conhecimento seguro das condições de funcionamento desses instrumentos requerem o estabelecimento de uma metodologia de controle da sua precisão, para que os levantamentos executados possam atender as especificações estabelecidas. A amplitude destes erros, bem como suas influências sobre as medidas são variáveis, necessitando assim de um controle rigoroso e periódico sobre os mesmos.

No Brasil, não é usual a verificação sistemática do funcionamento dos equipamentos de acordo com suas precisões preconizadas. Em outros países como Alemanha, Estados Unidos, Austrália, Inglaterra, entre outros, a calibração de equipamentos é regulamentada por lei, obrigando os usuários a procederem aferições anuais, semestrais ou mesmo antes de cada campanha. Esta exigência legal é fruto do conhecimento de que os elementos de calibração, sofrem variação com o uso e envelhecimento do instrumento [33].

Desta forma, há necessidade de se dispor de metodologias adequadas para a calibração desses instrumentos. O processo da Linha de Base, tipo multipilares (calibração com medidas de campo), é o mais utilizado e difundido em todo o mundo, mostrando-se prático e eficiente;

estabelece uma relação entre as medidas observadas com outras consideradas padrão o que permite a verificação e a determinação dos erros sistemáticos - erro de zero, erro de escala e erro cíclico - presentes nesses instrumentos. O processo da Linha de Teste (calibração em laboratório) também muito utilizado, adota a técnica das medidas diferenciais [17], o que permite a determinação rigorosa dos elementos do erro cíclico (capítulo 4).

Diante dessa carência em nosso meio, e da existência na UFPr do laboratório de Aferição com boa infraestrutura, e da Linha de Teste já implantada em sua estrutura básica, foram inicialmente desenvolvidos estudos bibliográficos e de viabilidade de execução, que culminaram com a realização do presente trabalho.

É o objetivo essencial desse trabalho, implantar uma metodologia para a determinação do erro cíclico (E) (método rigoroso) utilizando-se a Linha de Teste existente no Centro Politécnico da UFPr.

Para atender a este objetivo, foi utilizada a infraestrutura do laboratório de Aferição, o que possibilitou a implementação e execução de algumas melhorias introduzidas na Linha de Teste, tais como: a utilização do nível eletrônico Talyvel-3 no nivelamento rigoroso do trilho e do interferômetro a Laser, na calibração da fita graduada e na determinação do erro de pontaria.

Nos capítulos iniciais, os problemas relativos à medida eletrônica de distâncias são enfocados de uma forma



geral através de conceitos básicos (capítulo 2), sendo que os erros envolvidos neste processo de medida e suas influências sobre a distância observada são também discutidos (capítulo 3).

No capítulo 5, são mencionados e descritos os trabalhos preliminares desenvolvidos junto à Linha de Teste, objetivando atender os requisitos mínimos indispensáveis à aplicação do método rigoroso.

A determinação dos erros sistemáticos com medidas de campo têm nesse trabalho uma abordagem de caráter geral e informativo, pormenorizando-se em essência, o estudo das causas, detecção e determinação do erro cíclico através do método rigoroso (calibração em laboratório).

Originalmente, o presente trabalho previa a realização das observações referente à calibração em laboratório, em duas etapas:

a - obtenção das medidas utilizando-se o interferômetro;

b - obtenção das medidas diretamente sobre uma fita graduada, pré-calibrada em laboratório.

Pretendia-se, após a comparação dos resultados que seriam obtidos nas duas etapas, verificar a real necessidade da utilização do interferômetro ou se, de posse dos resultados obtidos com a fita graduada, estes atenderiam os requisitos e a precisão exigidos na calibração.

Porém, devido à inúmeros inconvenientes detectados ao longo da execução do presente trabalho tais como: poeira,

elevado índice de umidade ( $\approx 90\%$ ), inexistência de ventilação do local, inexistência de espaço adequado para a instalação do interferômetro e fundamentalmente a precária segurança do local (que é destinado às operações de manutenção das redes elétrica, de esgoto e água do prédio da Engenharia Elétrica) inviabilizaram a instalação e conseqüentemente a utilização do interferômetro na realização desse trabalho.

Diante disto, todos os esforços foram concentrados no sentido de tornar o procedimento de calibração com fita graduada tecnicamente viável e aceitável do ponto de vista da precisão, de tal forma que os resultados obtidos fossem compatíveis com aqueles oriundos da calibração com o interferômetro.

Os equipamentos testados foram em número de seis (06), de diferentes procedências, idades e modelos. As principais características técnicas e operacionais, bem como suas precisões nominais estão descritas no capítulo 6, juntamente com seus respectivos desempenhos de calibração.

Finalmente são apresentados os resultados dos ajustamentos efetuados e uma análise dos resultados obtidos.

## 2 CONCEITOS BASICOS

### 2.1 Aspectos gerais da medida eletrônica de distâncias

A maioria dos IMED adotam a seguinte expressão para o cálculo da distância: |17|, |29|

$$D = N \frac{C_0}{2fn} + \frac{\phi}{2\pi} \cdot \frac{C_0}{2fn} + Z_0 \quad (2.1.1)$$

onde: D = distância medida (eletrônica)

n = índice de refração ambiente

C<sub>0</sub> = velocidade da luz no vácuo

f = frequência de modulação

φ = ângulo de fase entre a saída e retorno do sinal

Z<sub>0</sub> = erro de zero ou constante aditiva

N = número de meios comprimento de onda

De acordo com |17|, a precisão do instrumento, isto é, o perfeito ajuste de uma série de medidas com outras, tomadas como padrão, depende basicamente da estabilidade da frequência de modulação f e da acuracidade das medidas de diferença de fase, ao passo que a acuracidade da distância medida, isto é, do valor obtido ser próximo do verdadeiro, está relacionada com outros parâmetros, tais como:

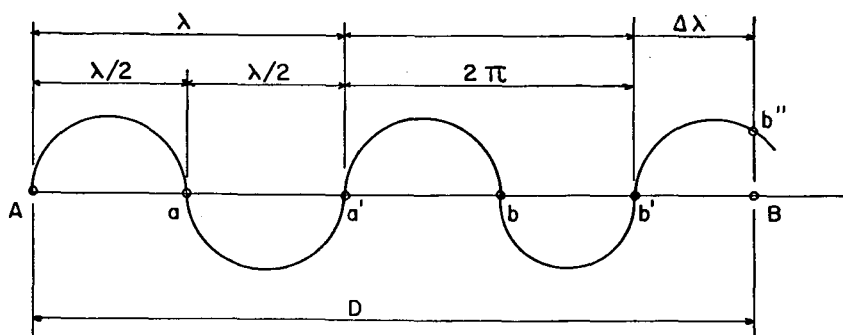
- erros de centragem do equipamento
- erro cíclico
- erro de pontaria

- adoção incorreta do índice de refração
- acuracidade com que o erro de zero ou constante aditiva tem sido determinados
- intensidade do sinal refletido

## 2.2 Princípio da medição eletrônica utilizando transmissão contínua

A maioria dos IMED utilizados em levantamentos, baseiam-se em métodos que adotam a medida da diferença de fase. Em essência, estes métodos consistem na determinação de um certo intervalo de tempo, cujo padrão é fornecido com precisão compreendido entre  $1 \times 10^{-11}$  a  $1 \times 10^{-14}$  do segundo. Uma vez conhecida a velocidade  $u$  de propagação do sinal no trajeto considerado, aquele intervalo de tempo pode ser transformado em unidades de comprimento. |06|

Figura 01 - Princípio da medição eletrônica.



Na figura 01, um sinal de frequência  $f$  é emitido a partir da estação A em um meio isotrópico (meio que possui

as mesmas propriedades óticas em todas as direções). Na estação B o sinal é refletido (retransmitido) para a estação onde o sinal foi gerado, sendo então analisado. Como as duas estações são fixas (não ocorre o efeito Doppler) teoricamente a frequência em B também será  $f$ ; porém devido ao tempo gasto para o sinal percorrer a distância  $D$ , haverá um atraso do sinal em B. Este fenômeno é conhecido por diferença de fase e será constante a cada comparação de fase entre o sinal emitido em A e o sinal refletido em B, nas mesmas condições meteorológicas.

Sendo  $\Delta\phi$  a diferença de fase correspondente ao intervalo de tempo  $\Delta t$ , referente a um sinal qualquer com a forma, por exemplo, senoidal, tem-se:

$$\Delta\phi = \omega \cdot \Delta t = 2\pi \cdot f \cdot \Delta t \quad (2.2.1)$$

O sinal recebido em B estará em fase com o sinal emitido em A (pontos  $a, a', b, b'$  - fig. 01), sempre que a distância  $D$  for tal que:

$$\Delta\phi = N \cdot 2\pi \quad (\text{com } N = 1, 2, 3, \dots) \quad (2.2.2)$$

Entrando com a (2.2.2) na (2.2.1) vem:

$$\Delta t = N \cdot T \quad \text{onde } T = 1/f \rightarrow \text{período} \quad (2.2.3)$$

Considerando  $u$  a velocidade de propagação da onda eletro-magnética (o.e.m.) no meio ambiente, tem-se:

$$D = u \cdot \Delta t \quad (2.2.4)$$

$$D = u \cdot N \cdot T \quad (2.2.5)$$

$$D = u \cdot N / f \quad (2.2.6)$$

$$D = N \cdot \lambda \quad (2.2.7)$$

sendo  $\lambda = u/f$  o comprimento de onda do sinal emitido.

A [06] afirma ser importante ter em mente que enquanto a frequência do sinal emitido pode ser mantido estável dentro de certos limites, o comprimento de onda é em geral variável, pois seu valor depende da velocidade de propagação da o.e.m. e que por sua vez depende do índice de refração do meio.

Normalmente as ondas emitidas pelos IMED são senoidais e são representadas pelas seguintes expressões:

$$v_A = V_A \cdot \text{Sen } \omega t \quad \text{sinal em A} \quad (2.2.8)$$

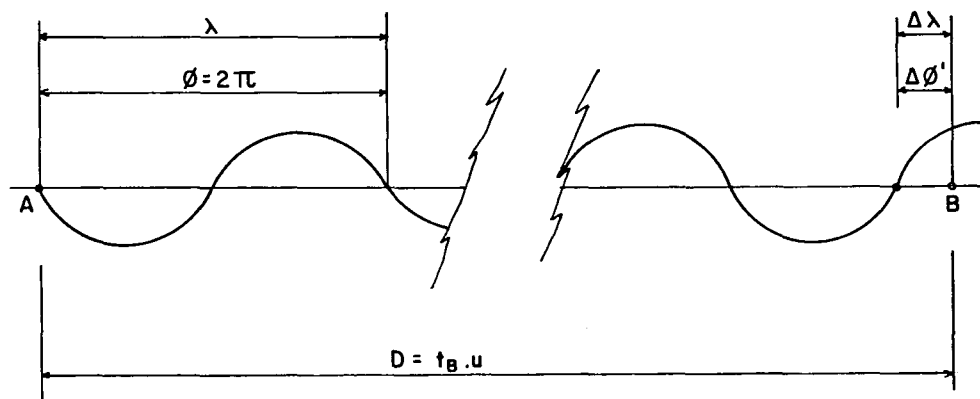
$$v_B = V_B \cdot \text{Sen } (\omega t + \Delta t) \quad \text{sinal em B} \quad (2.2.9)$$

mas devido a (2.2.4), a (2.2.9) toma a forma:

$$v_B = V_B \cdot \text{Sen } (\omega t + D/u) \quad (2.2.10)$$

onde  $v_A$  e  $v_B$  são as tensões instantâneas em A e B;  $\omega$  é a velocidade angular da onda e  $V_A$  e  $V_B$  são as tensões máximas do sinal. A figura 02 mostra os valores instantâneos de fase ao longo do trajeto AB.

Figura 02 - Valores instantâneos de fase.



O medidor de fase somente poderá medir diferença de fase entre 0 e  $2\pi$  ( $\Delta\phi'$ ). Desde que se disponha de um mecanismo para determinar o número  $N$  de meios comprimento de onda, a medida da diferença de fase de sinais entre os pontos  $A$  e  $B$ , fornecerá a distância  $D$  desejada:

$$\Delta\phi = N \cdot 2\pi + \Delta\phi'$$

$$e \quad D = N \cdot \lambda + \Delta\lambda \quad (2.2.11)$$

Na verdade, os IMED só registram diferença de fase quando o refletor estiver instalado numa posição contida num intervalo de meio comprimento de onda.

Estando o refletor nas posições  $a, a', b, b'$ , (fig. 01) o instrumento não registrará nenhuma diferença de fase e a distância  $D$  será determinada apenas em função do número  $N$  de meios comprimento de onda:

$$D = N \cdot (\lambda/2) \quad (2.2.12)$$

No caso geral, em que o refletor está numa posição qualquer, o instrumento registrará além do número  $N$ , a diferença de fase  $Bb''$  equivalente ao comprimento de onda  $\Delta\lambda$ , que é uma fração do meio comprimento de onda.

Assim, a equação (2.2.11) passa a ser escrita da seguinte maneira:

$$D = N \cdot (\lambda/2) + \Delta\lambda \quad (2.2.13)$$

onde  $\Delta\lambda$  = fração do meio comprimento de onda.

A expressão (2.2.13) sem considerar a constante aditiva ( $Z_0$ ) é idêntica a expressão (2.1.1), apenas apresentada de uma forma mais simplificada.

### 2.3 Onda Portadora

É a onda encarregada de transportar o sinal de uma estação à outra, afim de possibilitar a medida da diferença de fase. |30|

Um sistema de medição eletrônico, terá as características inerentes à escolha da frequência da onda portadora. Assim é, que de acordo com as quatro faixas de frequências hoje em utilização, originam-se quatro grupos distintos de equipamentos de medição eletrônica:



-ondas longas - comprimentos de onda maiores que 1.000 m;

-microondas - comprimentos de onda da ordem de centímetros ( $1 < \lambda < 10$  cm);

-luz visível - comprimentos de onda compreendidos entre 0,4 e 0,7  $\mu\text{m}$ ;

-infravermelho - comprimentos de onda compreendidos entre 0,72 e 0,94  $\mu\text{m}$ .

#### 2.4 Modulação da Onda Portadora

De acordo com [30] o termo modulação é usado para descrever o processo pelo qual uma das características de uma onda, chamada portadora, é variada de acordo com a variação da amplitude de uma segunda onda, de frequência muito menor, chamada moduladora.

Em geral, a onda portadora é senoidal e a onda moduladora pode ter a forma senoidal ou uma outra forma mais complexa.

A modulação é empregada para enviar informações à distância, por meio de ondas eletro-magnéticas.

Nos instrumentos que utilizam ondas longas, os sinais em geral não são modulados, sendo que a onda portadora é o próprio sinal de medida.

Os instrumentos a infravermelho (IV) utilizam a mais recente fonte de onda - o diodo de arseniato de gálio (GaAs). A sua principal vantagem é que o sinal de saída pode ser modulado diretamente em intensidade. [10]

## 2.5 Métodos de medida da diferença de fase

Na seção 2.1 foi visto que a precisão dos IMED está vinculada diretamente com a estabilidade da frequência de modulação e a acuracidade na medida da diferença de fase entre o sinal emitido e recebido. Quanto melhor for a medida da diferença de fase, mais preciso será o valor obtido para a distância.

Dois métodos normalmente são empregados para efetuar tais medidas:

- a - método dos discriminadores de fase
- b - método digital

O método dos discriminadores de fase, é utilizado em instrumentos de ondas longas e em alguns outros tipos. O método baseia-se na mistura em um circuito de dois sinais de mesma frequência e mesma amplitude. O sinal de saída deste circuito é função apenas da diferença de fase entre os dois sinais misturados. Acoplando-se ao circuito, um dispositivo de indicador de fase, obtém-se facilmente o valor da diferença de fase procurada.

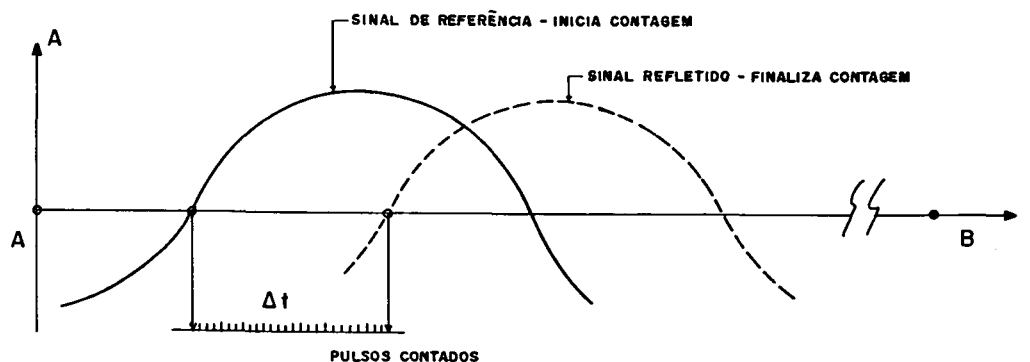
O método digital vem sendo empregado nos instrumentos de fabricação mais recente, principalmente nos instrumentos da faixa do infravermelho (curto alcance).

Um dispositivo de contagem é disparado toda a vez que o sinal de modulação muda do negativo para o positivo. O sinal refletido (ou retransmitido) interrompe a contagem e o

número de pulsos ocorridos num intervalo de tempo  $\Delta t$  é contado, exibido ou registrado.

A frequência dos pulsos é escolhida de acordo com a frequência de batimento, de tal maneira que cada pulso represente uma pequena distância conhecida, geralmente em milímetros (figura 03). Para maiores informações sugere-se ao leitor, consultar : |05|, |06|, |09|, |30|.

Figura 03 - Contagem de pulsos



FONTE = |06| CAPA

## 2.6 Condições atmosféricas específicas

Na fabricação dos IMED, os fabricantes adotam uma determinada atmosfera padrão, cujo índice de refração  $n_1$  pode ser calculado em função de parâmetros tais como: temperatura do ar seco, pressão atmosférica e percentagem de gases misturados nesta atmosfera padrão.

Cada fabricante estipula o seu índice de refração específico: 1,000325 para os instrumentos que usam

microondas; 1,000280 para os instrumentos com radiação infravermelho, podendo existir algumas variações conforme o modelo: 1,000282 para o Wild DI10 Distomat; 1,000274 para o Tellurometer MA-100. Em geral, o " $n_1$ " definido pelo fabricante é válido, pelo menos, para um certo número de modelos.

No entanto, o mais importante é ter em mente que a distância fornecida pelo instrumento nem sempre é compatível com as condições meteorológicas ambientes no momento da medida.

Por definição, tem-se:

$$\lambda = u/f = C_0/nf \quad (2.6.1)$$

Nas condições meteorológicas específicas, a (2.6.1) assume a forma:

$$\lambda_1 = u_1/f = C_0/n_1f \quad (2.6.2)$$

onde  $\lambda_1$  = comprimento de onda específico

$n_1$  = índice de refração coerente com a atmosfera padrão adotada

Assim, a distância registrada pelo instrumento nestas condições será:

$$D_1 = N \cdot (\lambda_1/2) + \Delta\lambda_1 \quad (2.6.3)$$

$$D_1 = N \cdot C_0 / 2n_1f + \Delta\lambda_1 \quad (2.6.4)$$

## 2.7 Condições atmosféricas ambientes

Em campo, o sinal de medida percorre um meio cujo índice de refração  $n_2$  é diferente daquele padrão  $n_1$ . Nestas condições, o valor correto do comprimento de onda será:

$$\lambda_2 = u_2 / f = C_0 / n_2 f \quad (2.7.1)$$

e a distância será dada pela expressão:

$$D_2 = N \cdot \lambda_2 / 2 + \Delta\lambda_2 \quad (2.7.2)$$

ou

$$D_2 = N \cdot C_0 / 2n_2 f + \Delta\lambda_2 \quad (2.7.3)$$

$$\text{com: } \Delta\lambda_2 = \Delta\lambda_1 \cdot n_1 / n_2 = \frac{\phi}{2\pi} \cdot \frac{C_0}{2nf} \quad |16| \quad (2.7.4)$$

Fazendo  $n_2 = n$  e  $D_2 = D$  com o objetivo de uniformizar a notação, resulta para a (2.7.3):

$$D = \frac{N \cdot C_0}{2 n f} + \frac{\phi}{2\pi} \cdot \frac{C_0}{2 n f} \quad (2.7.5)$$

que é a expressão da distância normalmente encontrada na literatura.

Em muitos modelos, notadamente naqueles de fabricação mais recente, o valor do índice de refração é definido anteriormente e introduzido no equipamento. Neste caso, deve-se ter em mente que:

- a correção meteorológica compatível com as

condições de medida devem ser introduzidas no instrumento em ppm;

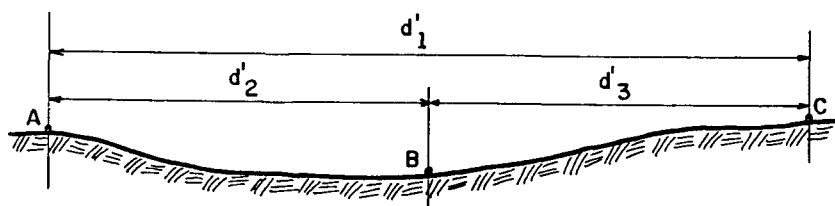
- a frequência de modulação original é alterada e o equipamento passa a gerar uma frequência coerente com as novas condições de medida.

## 2.8 Erro de zero ou constante aditiva ( $Z_0$ )

Erro de zero ou constante aditiva é a distância entre o centro eletrônico - ponto do diodo onde é gerado o sinal infravermelho - e o centro geométrico do instrumento. [16]

O valor para este erro geralmente é fornecido pelo fabricante. Atualmente, em função da moderna concepção dos distanciômetros eletrônicos esta diferença é nula ou desprezível. Estudos de calibração realizados, indicam que com o uso do equipamento o valor deste erro pode variar, necessitando pois de aferições periódicas por meio de calibração do instrumento. Um procedimento mínimo, esquematizado na figura 04, pode ser utilizado para a verificação preliminar da grandeza do erro de zero.

Figura 04 - Verificação do erro de zero



$$d_1 = d'_1 + Z_0 \quad d_2 = d'_2 + Z_0 \quad d_3 = d'_3 + Z_0$$

mas:  $d_1 = d_2 + d_3$ . Assim tem-se:

$$Z_0 = d'_1 - (d'_2 + d'_3)$$

onde:  $d'_1$ ,  $d'_2$  e  $d'_3$  são as distâncias medidas e  $d_1$ ,  $d_2$  e  $d_3$  são as distâncias corretas.

Desta forma, a (2.7.5) acrescida da constante aditiva  $Z_0$ , resulta na (2.1.1).

### 3 ERROS NA MEDIÇÃO ELETRÔNICA DE DISTÂNCIAS

Este capítulo objetiva apresentar os erros envolvidos no processo de medição eletrônica de distâncias, bem como suas influências sobre a distância medida.

#### 3.1 Análise dos erros utilizando a lei de propagação das variâncias

Em [16] é feita uma análise pormenorizada dos erros presentes no processo de medição, utilizando a lei de propagação, considerando não correlacionados os diversos elementos envolvidos na equação (2.1.1), que reescrevemos aqui :

$$D = N \frac{C_o}{2fn} + \frac{\phi}{2\pi} \cdot \frac{C_o}{2fn} + Z_o$$

$$\text{Fazendo: } U = \frac{\phi}{2\pi} \cdot \frac{C_o}{2fn} \quad (3.1.1)$$

e incluindo uma correção  $C_h$  afim de reduzir a distância  $D$  a um nível de referência, temos:

$$D_h = N \frac{C_o}{2fn} + U + Z_o + C_h \quad (3.1.2)$$

A lei de propagação aplicada à equação (3.1.2) resulta:



$$\sigma_{D_h}^2 = \left[ N \frac{C_o}{2fn} \right]^2 \left[ \left( \frac{\sigma_{C_o}}{C_o} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_f}{f} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_n}{n} \right)^2 \right] + \sigma_U^2 + \sigma_{Z_o}^2 + \sigma_{C_h}^2 \quad (3.1.3)$$

onde:

$\sigma_{D_h}$  = desvio padrão da distância  $D_h$ ;

$\sigma_{C_o}$  = desvio padrão da velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no vácuo;

$\sigma_f$  = desvio padrão da frequência de modulação;

$\sigma_n$  = desvio padrão do índice de refração do meio ambiente ( $n$ );

$\sigma_U$  = desvio padrão da diferença de fase  $U$ ;

$\sigma_{Z_o}$  = desvio padrão da constante aditiva ( $Z_o$ );

$\sigma_{C_h}$  = desvio padrão da correção  $C_h$ .

Segundo [16], analisando a equação (3.1.3) verifica-se que:

\* erros em  $C_o$ ,  $f$  e  $n$  irão influenciar diretamente na distância, introduzindo um erro de escala à mesma;

\* erros em  $U$  e  $Z_o$  influenciam de maneira constante para qualquer distância; isto é a influência será sempre a mesma, qualquer que seja o comprimento medido.

### 3.2 Erro na velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no vácuo ( $C_0$ )

A U.G.G.I. adotou em 1957, o valor de 299792,5 Km/s  $\pm$  0,46 Km/s para a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no vácuo [10], [16]. Atualmente é aceito o valor de 299792458 m/s  $\pm$  1,2 m/s, recomendado em 1973 pelo Comité Consultif pour la Définition du Mètre (CCDMD).

O padrão de tempo é fornecido por relógios atômicos com precisão de  $1 \times 10^{-11}$  a  $1 \times 10^{-14}$  do segundo.

Com isso, a velocidade padrão não pode, portanto, ser influenciada de maneira significativa pela possível ocorrência de erros nestas duas dimensões.

### 3.3 Erro no índice de refração (n)

Na seção 2.6 foi visto que na fabricação dos IMED, os fabricantes adotam uma determinada atmosfera padrão, para a especificação de seus equipamentos.

Uma certa atmosfera padrão poderia ter, por exemplo, as seguintes características físicas:

- temperatura do ar seco ==> 20°C
- pressão atmosférica ==> 760 mm Hg
- percentagem de dióxido de carbono ==> 0,003 %

Cada tipo de onda eletromagnética possui características de propagação próprias, e quando submetidas à um meio diferente daquele padrão, a frequência do sinal sofre interferências, variando o seu valor e, conseqüentemente introduzindo erros na medida da distância. Ver seção 2.7.

Importantes trabalhos de análise da influência das condições atmosféricas sobre a medida eletrônica de distâncias são encontrados em [06], [10] e [16].

Aqui, será destacada a influência de erros nas medidas dos parâmetros meteorológicos e seus efeitos sobre a distância medida.

### 3.3.1 Luz e infravermelho como sinal de medida

UMIDADE: para instrumentos a luz ou infravermelho, a influência da umidade relativa do ar, é negligenciável; [16] determinou para o ELTA 2 da ZEISS ( $\lambda=0,910\mu\text{m}$ ) que a influência da umidade do ar é da ordem de 0,001 ppm, portanto muito pequena para aplicações práticas. Já, em [10] admite-se a adoção de um valor médio de 0,5 ppm para todas as medidas.

TEMPERATURA: ainda de acordo com [10] e [16] o erro de  $1^{\circ}\text{C}$  na medição da temperatura, provoca um erro de 1 ppm nas medidas com luz. A [16] encontrou para o Elta 2 da Zeiss os seguintes valores:

erro de $0,5^{\circ}\text{C}$	—————)	0,99 ppm
$1,0^{\circ}\text{C}$	—————)	1,26 ppm
$1,5^{\circ}\text{C}$	—————)	1,61 ppm

PRESSÃO ATMOSFÉRICA: erros na medida da pressão atmosférica, da ordem de 2,5 mmHg alteram o valor da distância em 01 ppm ou mais. A [16] encontrou os seguintes valores para o Elta 2 da Zeiss:

erro de 0,5 mmHg	—————)	0,92 ppm
1,5	—————)	1,04
2,0	—————)	1,14
2,5	—————)	1,26

### 3.4 Erro na frequência de modulação (f)

Segundo [17] a frequência de modulação está intrinsicamente relacionada com a precisão do IMED. A estabilidade do sinal de medida, aspecto fundamental para se obter precisão na medida, pode ser conseguida durante a utilização do equipamento, desde que o circuito de oscilação - gerador do sinal de medida - seja mantido em uma temperatura constante.

Havendo falhas no controle da temperatura ou envelhecimento dos cristais de quartzo que controlam as oscilações do sinal, podem ocorrer alterações nos valores das frequências geradas.

Segundo [07] detectou-se em alguns modelos de IMED, desvios de até 50 Hz por ano. A ocorrência de erros com tal ordem de grandeza, impõe a verificação sistemática das frequências geradas pelo instrumento.

A calibração da frequência pode ser realizada utilizando-se frequencímetros.

### 3.5 Erro na medida da diferença de fase

De acordo com [17], além da frequência de modulação, também a medida da diferença de fase influi de maneira decisiva na precisão dos IMED que utilizam este método.

Atualmente a precisão da medida da diferença de fase é muito alta, graças ao método digital de medida de fase, que propicia leituras até o milímetro. Na realidade, o processo de medida não é perfeito, o que acarreta incertezas no valor relativo ao milímetro.

Na prática, a precisão é melhorada sensivelmente, uma vez que as medidas de diferença de fase são repetidas algumas vezes durante o processo de medição da distância, tomando-se como resultado a média dos valores encontrados.

### 3.6 Erro na constante aditiva ( $Z_0$ )

A constante aditiva, ou erro de zero, apesar dos fabricantes de IMED estabelecerem valores nulos ou negligenciáveis para os modelos atuais, pode sofrer variação em função do uso e envelhecimento do equipamento. [33]

Atualmente, a grande maioria dos IMED em uso apresentam um erro de zero de poucos milímetros, o que pode induzir o usuário a negligenciá-lo em medições de rotina.

Desta forma, torna-se importante a determinação da amplitude deste erro através da calibração, que pode ser conduzida de duas maneiras:

linha base de campo

linha de teste em laboratório

Os procedimentos para a determinação do erro de zero com medidas de campo (linha base de campo) podem ser encontrados em [02], [07], [16], [25], [26] e [32].

A calibração do erro de zero em laboratório é conduzida numa Linha de Teste, porém requer o conhecimento de uma distância padrão com precisão. Detalhes sobre este procedimento é encontrado em [17].

### 3.7 Erro de escala ou erro proporcional (m)

Este erro é oriundo de erros nos valores da velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas ( $C_0$ ), do índice de refração ( $n$ ) e da frequência de modulação ( $f$ ).

De acordo com o que foi visto na seção 3.2 é muito improvável a ocorrência de erros significativos no valor de  $C_0$ . Já com relação ao índice de refração e a frequência, ambos podem trazer erros embutidos nos respectivos valores, isto é, erros nos parâmetros atmosféricos e meteorológicos e erros na frequência gerada devido à falhas na estabilização do sinal, respectivamente.

Para reduzir o efeito dos erros no valor do índice de refração, a solução indicada é o cuidadoso procedimento nas medidas dos parâmetros meteorológicos e atmosféricos.

Com relação a possível erro na frequência de modulação, a solução recomendada é a calibração do instrumento através de frequencímetros.

Para a verificação da existência do erro de escala é necessário medir um comprimento que possa servir de escala,

ou seja, que tenha sido medido com equipamento preciso, por exemplo, o Mekômetro. As simples diferenças de comprimento - medido e o padrão - fornecem o erro de escala, desde que se conheçam o erro cíclico e a constante aditiva do instrumento.

Outro procedimento para a determinação do erro de escala é a calibração do instrumento em uma linha-base de campo, cujas distâncias interpilares sejam conhecidas.

A correção à distância medida devida ao fator de escala é introduzida em ppm, ou seja é uma correção multiplicativa.

### 3.8 Erro de fase ou erro cíclico ( $E_i$ )

É um erro proveniente de falhas na determinação da diferença de fase; surge em consequência de variações bruscas da fase, entre a emissão e recepção do sinal. Se comporta de forma cíclica no intervalo do meio comprimento de onda ( $\lambda/2$ ) de modulação do instrumento, variando senoidalmente com a distância.

Possui a mesma configuração a cada meio comprimento de onda e esta configuração se apresenta como uma senóide. Em [16], [25] e [26] é encontrada a expressão abaixo, geralmente utilizada para modelar o erro cíclico:

$$E_i = A \cdot \text{Sen} \left[ \frac{2\pi}{\lambda} (d_i + B) \right] \quad (3.8.1)$$

onde:  $E_i$  = erro cíclico correspondente à distância  $d_i$

A = amplitude do erro

$B$  = ângulo de fase inicial

$d_i$  = comprimento correspondente a diferença de fase obtida eletronicamente

$\lambda'$  = metade do comprimento de onda de modulação do instrumento

Para corrigir a distância medida, do efeito do erro cíclico, devemos conhecer os parâmetros definidores deste erro: amplitude ( $A$ ) e fase ( $B$ ), bem como o fator de calibração ( $d_i$ ), todos obtidos na calibração.

Para proceder a determinação do erro cíclico através da calibração, é necessário a obtenção de medidas convenientemente espaçadas dentro da metade do comprimento de onda de modulação do instrumento a ser testado.

Assim, levando-se em consideração os erros que se apresentam na medida eletrônica da distância, podemos escrever:

$$D = m \left[ N \frac{C_o}{2fn} + \frac{\phi}{2\pi} \cdot \frac{C_o}{2fn} \right] + Z_o + E_i \quad (3.8.2)$$

onde:  $Z_o$  = correção do erro de zero ou constante aditiva

$m$  = correção de escala ou fator proporcional

$E_i$  = erro cíclico



## 4 O ERRO CÍCLICO NA CALIBRAÇÃO DE DISTANCIÔMETROS ELETRÔNICOS

### 4.1 Introdução

O erro de fase, preferencialmente denominado de erro cíclico pela grande maioria dos autores, tem sido mencionado seguidamente por estudiosos e especialistas em calibração. Nota-se claramente a preocupação em se conhecer com precisão o seu comportamento, bem como avaliar quantitativamente seus elementos (amplitude e fase) através de medidas rigorosas, geralmente conduzidas num processo de calibração.

Uma não linearidade na medida da diferença de fase foi detectada, já quando o primeiro distanciômetro foi testado. A razão desta variação não é bem conhecida. Em [17] acredita-se que a complexa interligação dos componentes eletrônicos (excentricidades eletrônicas) entre os diferentes canais de detecção da fase do sinal, ocasionam o aparecimento de erros sistemáticos que ao invés de se comportarem de forma linear, variam ciclicamente em amplitude com período igual a metade do comprimento de onda ( $\lambda/2$ ) de modulação.

Este erro, com amplitude inicialmente conhecida apenas pelas informações fornecidas pelos fabricantes, era aceito como sendo insignificante diante da precisão nominal dos distanciômetros eletrônicos.

A medida que os IMED foram sendo aperfeiçoados e a precisão de medida melhorada, verificou-se que no processo

de fabricação, estes tem sido preparados para que o erro cíclico possua amplitude desprezível; entretanto sabe-se que, com o uso constante e envelhecimento do equipamento a amplitude pode variar, podendo afetar significativamente (quando extrapola a precisão nominal) o valor da distância medida [18]. Diante disto, torna-se evidente a necessidade de haver um controle-rigoroso sobre o seu comportamento.

Renomados especialistas em levantamentos, como SCHWENDENER [29], CHRZANOWSKI [07], RUEGER [26], entre outros, são unânimes em destacar a necessidade de incluir em calibrações periódicas dos IMED, a determinação dos elementos do erro cíclico, uma vez que sua amplitude além de sofrer variação, pode alcançar valores que influam em trabalhos de precisão.

A calibração consiste basicamente numa forma requintada de obtenção de medidas com o instrumento a ser testado, objetivando a detecção e determinação dos erros sistemáticos inerentes ao equipamento.

O conjunto de medidas a obter, além de obedecer rigorosamente a critérios pré-estabelecidos deve estar em conformidade com o procedimento indicado para cada tipo de calibração.

A determinação dos elementos do erro cíclico pode ser conduzida de duas maneiras: calibração com medidas de campo e calibração em laboratório.

#### 4.2 DETERMINAÇÃO DOS ELEMENTOS DO ERRO CÍCLICO ATRAVÉS DA CALIBRAÇÃO COM MEDIDAS DE CAMPO

A calibração dos IMED com medidas de campo é a mais simples e acessível a qualquer operador que esteja familiarizado com o equipamento. Ao contrário da calibração em laboratório, que requer equipamentos sofisticados tais como frequencímetros e interferômetros, na calibração de campo é suficiente a existência ou a implantação de uma Linha Base.

A Linha Base consiste fundamentalmente de um certo número de pilares alinhados e criteriosamente espaçados, de forma a permitir a obtenção de um número redundante de observações, para posterior ajustamento.

Este método possibilita a determinação precisa da constante aditiva ( $Z_0$ ) e do fator de escala ( $m$ ), e uma boa estimativa dos elementos do erro cíclico, desde que as distâncias interpilares sejam conhecidas. No caso destas serem desconhecidas, é possível a determinação apenas da constante aditiva e dos elementos do erro cíclico.

Na implantação da Linha Base, no que se refere a definição do comprimento máximo, de acordo com [25] a experiência tem mostrado não ser necessário trabalhar com Linhas Base com extensão superior a 1Km.

Quanto ao local de implantação, deve-se tomar algumas precauções de ordem prática [25] com o objetivo de torná-la funcional e eficiente.

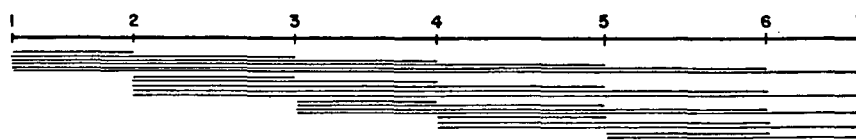
Com relação a distribuição das estações ao longo da

Linha Base, verifica-se na bibliografia critérios que orientam a escolha do espaçamento entre as estações, visando a determinação dos elementos do erro cíclico.

A Linha Base de Multipilares é o tipo mais antigo e difundido [02], [07], [13], [16], [18], [20], [25], e adota como critério uma boa distribuição das distâncias entre pilares ao longo da metade do comprimento de onda de modulação dos principais instrumentos [25].

A figura 05 mostra um exemplo deste tipo de Linha Base constituída de sete pilares, o que possibilita a obtenção de vinte e uma (21) observações e a estimativa do erro cíclico de meio em meio metro [25].

Figura 05 - Exemplo de Linha Base de Multipilares



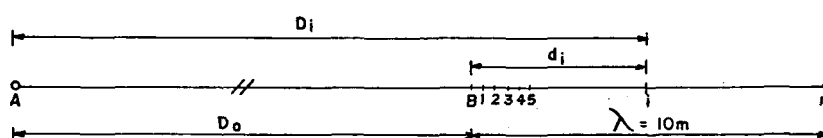
Como já foi mencionado, a calibração com medidas de campo foge ao escopo do presente trabalho; por isso recomenda-se aos interessados no assunto, a leitura de referências bibliográficas tais como: [02], [07], [13], [16], [18], [20], [25], [31], [32].

#### 4.3 DETERMINAÇÃO DOS ELEMENTOS DO ERRO CÍCLICO ATRAVÉS DA CALIBRAÇÃO EM LABORATÓRIO

A calibração em laboratório é um método de determinação rigorosa do erro cíclico. Requer a disponibilidade de equipamentos adicionais tais como frequencímetros (para a verificação da frequência de trabalho do instrumento no caso de constatação da existência de erro de escala) e interferômetros (que permitem registrar os deslocamentos do prisma refletor sobre o trilho, automaticamente), um criterioso procedimento na obtenção das medidas e um rigoroso acompanhamento das condições meteorológicas (pressão atmosférica, variação da temperatura seca e úmida e variação da umidade relativa).

Na determinação dos elementos do erro cíclico: amplitude (A) e fase (B) utiliza-se uma Linha de Teste, conforme a figura 06 a seguir:

Figura 06 - Esquema de uma Linha de Teste



As operações de medida consistem em instalar o instrumento no ponto A e registrar as distâncias medidas  $D_i$  entre este ponto e as posições 1, 2, 3, ..., i, ao longo de uma

linha rigorosamente alinhada, e medir com precisão pequenos deslocamentos ( $d_i$ ) de um refletor que se locomove sobre um trilho, num espaçamento de meio comprimento de onda de modulação do instrumento utilizado.

Quanto ao deslocamento do refletor, não existem recomendações especiais, porém é certo que, quanto menor a distância  $d_i$  melhor a determinação.

A medida do deslocamento do refletor pode ser efetuada de duas maneiras: sobre uma fita calibrada ou mais sofisticadamente utilizando-se o interferômetro (foto 01). No caso da utilização da fita graduada, este procedimento requer a utilização de um sistema de pontaria (foto 02) objetivando melhorar a precisão das medidas.

Em relação a distância  $D_o$  existem recomendações (discretas) |17|, |25| no sentido de se evitar medições de distâncias inferiores a 100 metros, uma vez que abaixo deste limite o erro cíclico apresenta irregularidades no seu comportamento. Em laboratório, onde normalmente o espaço disponível é reduzido, recomenda-se a utilização de espelhos (foto 03) com o objetivo de se obter distâncias maiores. Durante a execução do presente trabalho, foram desenvolvidos testes com distâncias inferiores a 100 metros utilizando-se três espelhos e com distâncias superiores a 100 metros utilizando-se cinco espelhos.

A fim de se poder avaliar a precisão dos resultados obtidos com a fita graduada, deve-se ter atenção para dois aspectos básicos: a fita deve ter sido previamente calibrada

Foto 01 - Interferômetro da HP.

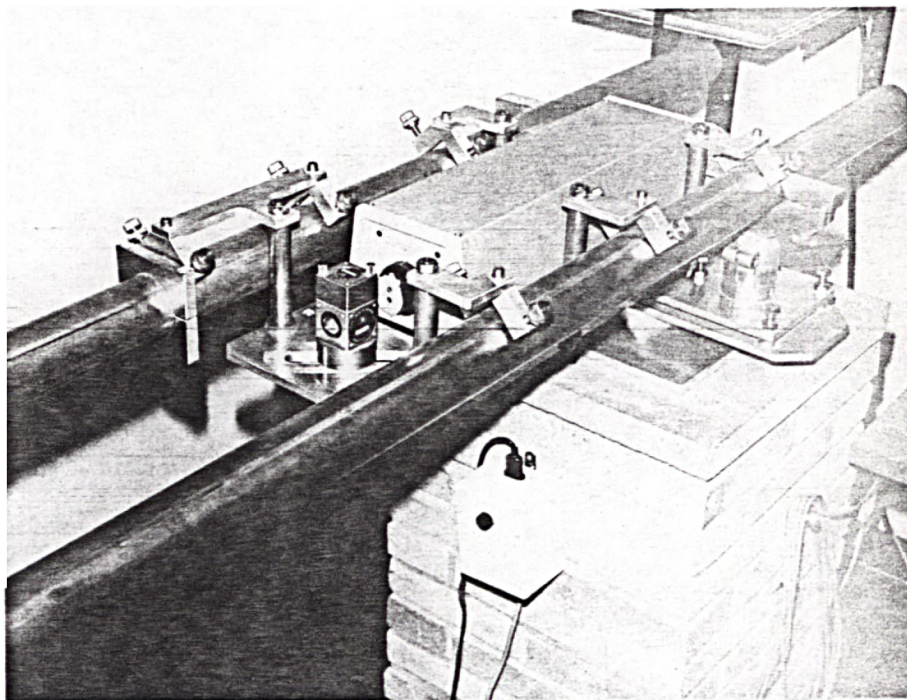


Foto 02 - Sistema de pontaria

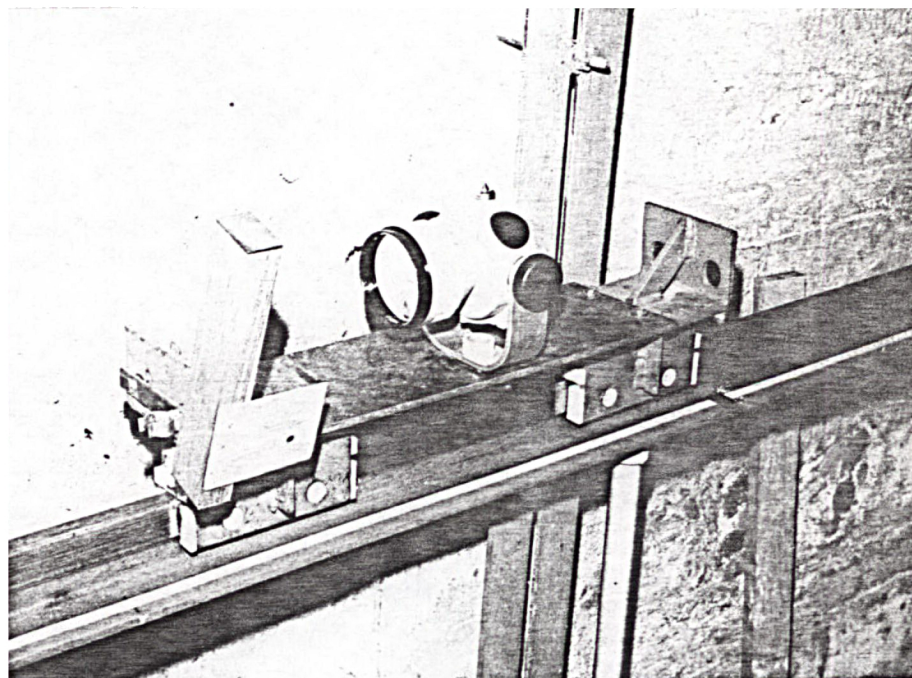
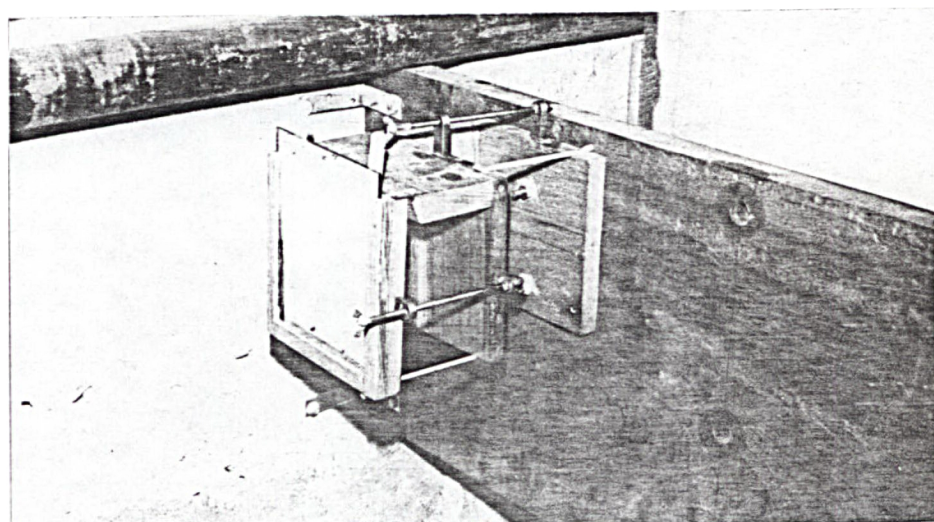
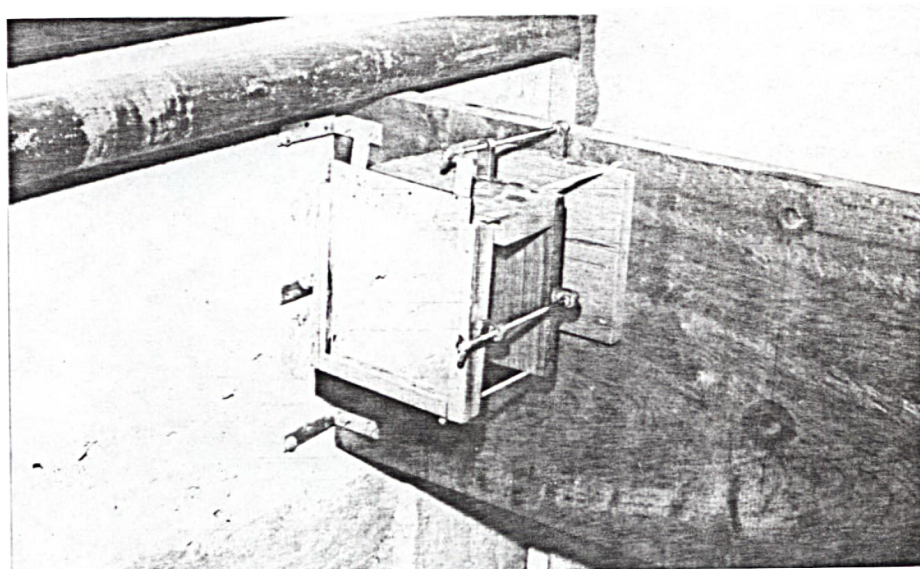


Foto 03 - Sistema refletor (espelho)



e o erro de pontaria deve ser conhecido com precisão.

No capítulo 5 veremos em detalhes, os procedimentos adotados na calibração da fita graduada bem como a determinação do erro de pontaria, utilizando-se o interferômetro.



#### 4.4 MODELO MATEMÁTICO PARA O CÁLCULO DA AMPLITUDE (A) E FASE (B) DO ERRO CÍCLICO

O erro cíclico pode ser modelado por uma função senoidal, cujos parâmetros podem ser determinados através do ajustamento de um conjunto de observações.

O conjunto de observações realizadas na Linha de Teste formam um sistema de equações de observações do tipo:

$$D_i = D_o + d_i + E_i \quad \text{com } i=1,2,\dots,n \quad (4.4.1)$$

onde:

$d_i$  = deslocamento do refletor = fator de calibração rigorosamente conhecido. É escolhido de forma a se obter um conjunto redundante de observações, ao longo do meio comprimento de onda de modulação do instrumento a ser testado. Assim, para um equipamento com  $\lambda/2$  de 10 metros sugere-se adotar  $d_i = 50$  cm, o que propiciaria vinte e uma observações. Para um instrumento com  $\lambda/2$  de um metro (MA-100) o mesmo número de observações seria obtido adotando-se  $d_i = 5$  cm.

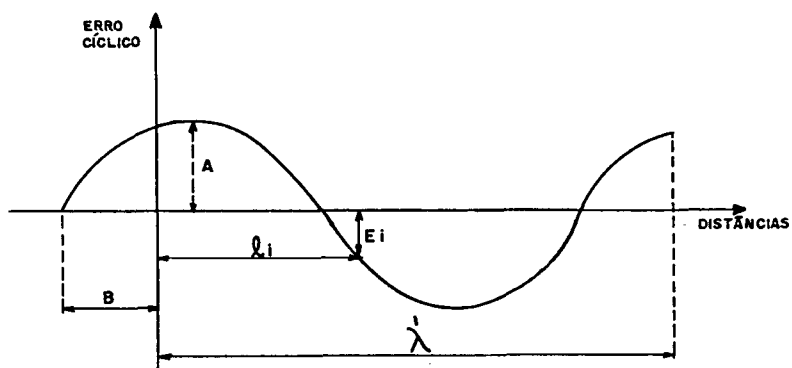
$D_i$  = distância eletrônica observada;

$n$  = número de posições ao longo do meio comprimento de onda em que é estacionado o refletor;

$D_o$  = distância desconhecida; não participa dos cálculos do erro cíclico;

$E_i$  = erro cíclico correspondente à distância  $d_i$ , e que pode ser calculado pela expressão (3.8.1) e visto esquematicamente através da figura 07:

Figura 07 - Erro cíclico



A equação (4.4.1) tem como parâmetros  $D_0$ ,  $A$  e  $B$ , e apresenta um inconveniente por apresentar uma parte não linear, justamente aquela relativa ao erro cíclico:

$$D_i = D_0 + d_i + A \cdot \text{Sen} \left[ \frac{2\pi}{\lambda} (d_i + B) \right] \quad (4.4.2)$$

Mediante pequenas modificações no modelo, pode-se linearizar a expressão (4.4.2) tornando-a mais simples.

Assim, na (3.8.1) podemos efetuar a seguinte transformação:

$$E_i = A \cdot \text{Sen} \left[ \frac{2\pi}{\lambda} (d_i + B) \right] = A \cdot \text{Sen} \left[ \frac{2\pi}{\lambda} d_i + \frac{2\pi}{\lambda} B \right] \quad (4.4.3)$$

O termo  $\frac{2\pi}{\lambda} B$  é o ângulo de fase ( $\phi$ ) e o termo  $\frac{2\pi}{\lambda} d_i$  é uma constante ( $\theta$ ) para cada instrumento.

Manipulando as equações (4.4.2) e (4.4.3) pode-se escrever a expressão linear do erro cíclico da seguinte

forma: [16]

$$E_i = P_i \cdot X + Q_i \cdot Y \quad (4.4.4)$$

onde:

$$P_i = \text{Sen}(\theta_i) = \text{Sen}\left(\frac{2\pi}{\lambda'} d_i\right) \quad (4.4.5)$$

$$Q_i = \text{Cos}(\theta_i)$$

$$X = A \cdot \text{Cos}(\phi) \quad \text{e} \quad Y = A \cdot \text{Sen}(\phi)$$

O modelo original fica então escrito na seguinte forma:

$$D_i = D_0 + d_i + P_i \cdot X + Q_i \cdot Y \quad (4.4.6)$$

onde  $D_0$ ,  $X$  e  $Y$  são parâmetros a serem determinados através do ajustamento pelo método dos mínimos quadrados (MMQ).

Interessa-nos  $X$  e  $Y$ , com os quais obtém-se a amplitude ( $A$ ) e a fase ( $B$  ou  $\phi$ ) do erro cíclico:

$$\begin{aligned} A^2 &= X^2 + Y^2 \\ \phi &= \text{arc tg } \frac{Y}{X} = 2 \cdot \text{arc tg } \frac{Y}{A+X} \\ B &= \frac{\phi \lambda'}{2\pi} \end{aligned} \quad (4.4.7)$$

#### 4.5 PROCEDIMENTO ADOTADO NA LINHA DE TESTE PARA A DETERMINAÇÃO DO ERRO CÍCLICO

Para a determinação do erro cíclico com observações realizadas na Linha de Teste, adotou-se nesse trabalho a metodologia utilizada por [17].

O método consiste em se obter uma série de observações  $D_i$  ao longo do meio comprimento de onda,

movendo-se o refletor  $n$  vezes exatamente de uma distância  $d_i$ . A cada deslocamento do refletor obtém-se uma distância  $D_i$  resultante da média de três (03) diferentes leituras.

As diferenças relativas entre as diversas observações  $(D_{i+1} - D_i)$  propiciam valores muito próximos do valor de  $d_i$  adotado. As duplas diferenças  $(D_{i+1} - D_i) - d_i$  fornecem os resíduos das observações que neste caso representam o erro cíclico presente no instrumento.

$$(D_{i+1} - D_i) - d_i = V_i = E_i \quad (4.5.1)$$

Assim, concluídas as observações, estas formam um conjunto de vinte e uma (21) equações do tipo (4.4.6); as duplas diferenças formam um sistema de vinte (20) equações do tipo (4.5.1) que uma vez ajustadas pelo M.M.Q. fornecem os parâmetros  $X$  e  $Y$ . Com as equações (4.4.7) determinam-se os elementos do erro cíclico:  $A$  e  $\phi$  ou  $B$ .

#### 4.6 CORREÇÃO AS DISTÂNCIAS DEVIDO AO ERRO CÍCLICO

O resultado da calibração de um instrumento são parâmetros que possibilitam introduzir correções às distâncias obtidas eletronicamente. As equações (4.5.1) fornecem valores que indicarão a existência e a grandeza do erro cíclico presente nos IMED.

As correções devidas ao erro cíclico podem ser obtidas de duas maneiras:

- 1 - diretamente através do cálculo utilizando-se a

expressão (3.8.1) e os parâmetros de calibração;

2 - através de interpolação à curva padrão (ajustada) do erro cíclico.

Em ambos os casos é importante observar que a correção a ser aplicada é de sinal contrário àquela obtida analítica ou graficamente.

Com o intuito de esclarecer o procedimento a ser adotado para a obtenção da correção devido ao erro cíclico, apresentamos a seguir um exemplo hipotético.

Seja um instrumento com comprimento de onda de modulação de 20 metros ( $\lambda/2=10$  m); os parâmetros de calibração são:

$$A = 20,0 \text{ mm} \quad \text{e} \quad B = 5,0 \text{ m}$$

O fator de calibração adotado foi  $d_i = 50,0$  cm.

#### Procedimento 1: Graficamente.

O certificado de calibração fornece um gráfico do erro cíclico para cada instrumento, do tipo mostrado na figura 08, indispensável para a interpolação das correções.

Supondo que foi medida uma distância de 1237,500 m. Qual a correção a ser adotada para se corrigir a distância medida, do efeito do erro cíclico? Entra-se no gráfico com o valor da distância apenas relativo ao metro. Assim, tomamos o valor 7,500 que no gráfico nos fornece o valor +20 mm. A correção a ser adotada será  $C = -20,0$  mm e a distância corrigida resulta:  $D_c = 1237,480$  m.

Para uma outra distância de 423,730 m, o valor

será de +14,0 mm resultando para a distância corrigida o valor 423,744 m.

Procedimento 2: Analiticamente.

Neste caso a correção é obtida diretamente do cálculo utilizando-se a expressão do erro cíclico e os parâmetros de calibração.

No nosso exemplo hipotético, devemos considerar:

$$\lambda' = \lambda/2 = 10 \text{ metros (unidade de medida)}$$

$$A = 20,0 \text{ mm} \quad \text{e} \quad B = 5,0 \text{ m}$$

$$E_i = A \cdot \text{Sen} \left[ \frac{2\pi}{\lambda'} (d_i + B) \right]$$

Para a distância  $D = 1237,500 \text{ m}$  o valor encontrado é:

$$E_i = 20 \cdot \text{Sen} \left[ \frac{2\pi}{10} (7,5 + 5) \right] \rightarrow E_i = +20,0 \text{ mm}$$

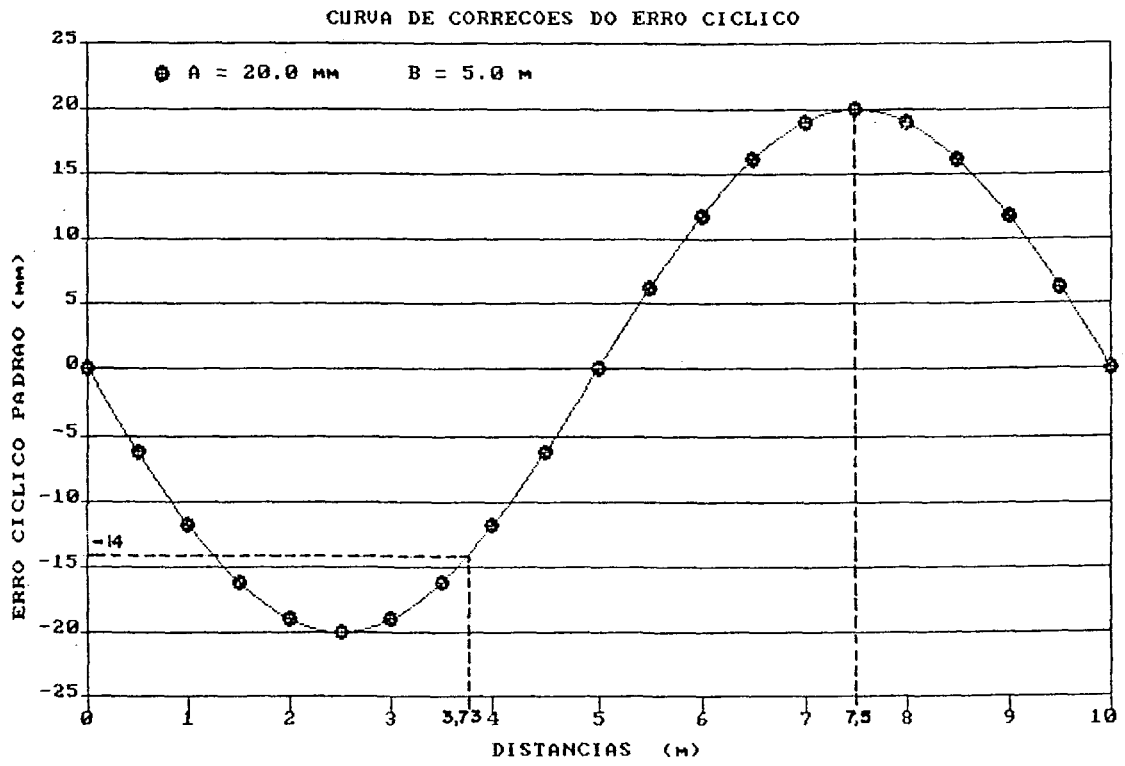
A correção será  $C = -20,0 \text{ mm}$ , resultando

$$D_c = 1237,480 \text{ m.}$$

Para a distância  $D = 423,730 \text{ m}$ , a correção é de  $C = 14,3 \text{ mm}$ , resultando para a distância corrigida o valor

$$D_c = 423,744 \text{ m.}$$

Figura 08 - Correções às distâncias devido ao erro cíclico



## 5 TRABALHOS PRELIMINARES DESENVOLVIDOS JUNTO A LINHA DE TESTE

Como foi visto no capítulo anterior, a calibração em laboratório requer a realização de medidas compatíveis com as exigências do método rigoroso e obtidas através dos deslocamentos rigorosamente definidos do refletor. Para tal, utilizou-se a Linha de Teste existente no Centro Politécnico da UFPr, onde foram implementadas algumas melhorias consideradas indispensáveis à execução dos trabalhos.

A implantação de pilar de altura regulável, nivelamento rigoroso do trilho, instalação de sistemas de espelhos e de pontaria, foram algumas melhorias implementadas, dentre outras. Mencionaremos a seguir as tarefas executadas e os procedimentos adotados, no sentido de prover o interessado, das inúmeras implicações e dificuldades encontradas.

### 5.1 A LINHA DE TESTE DA UFPr

A Linha de Teste da UFPr foi implantada há cerca de 10 (dez) anos no porão do prédio do Departamento de Engenharia Elétrica. O local, um corredor hermeticamente isolado por estrutura de concreto, mede aproximadamente 25 metros e secção de 1,2 x 2,0 m, e destina-se como local de operações de manutenção das redes elétrica, água e esgoto.

Algumas observações de temperatura (bulbo seco e úmido) e pressão, realizadas à priori, indicaram boas



condições de trabalho, com excessão do alto índice de umidade detectado ( $\approx 90\%$ ). Ver seção 6.1.

As condições meteorológicas do local são facilmente acompanhadas, haja visto que as mesmas apresentam uma variação lenta e gradual nos seus parâmetros ao longo dos dias.

A estrutura física da Linha de Teste (foto 04) compreende um trilho de aço (guia de elevador) com 12,5 metros de comprimento, apoiado em suportes de ferro (tipo cantoneiras) fixos à parede de concreto. Sobre o trilho, desliza um carrinho encarregado de locomover o prisma refletor. Ligeiramente abaixo do refletor, na base do trilho, é presa uma fita graduada que possibilita o acompanhamento dos deslocamentos do refletor durante as operações de medida.

## 5.2 PILAR DE ALTURA REGULAVEL

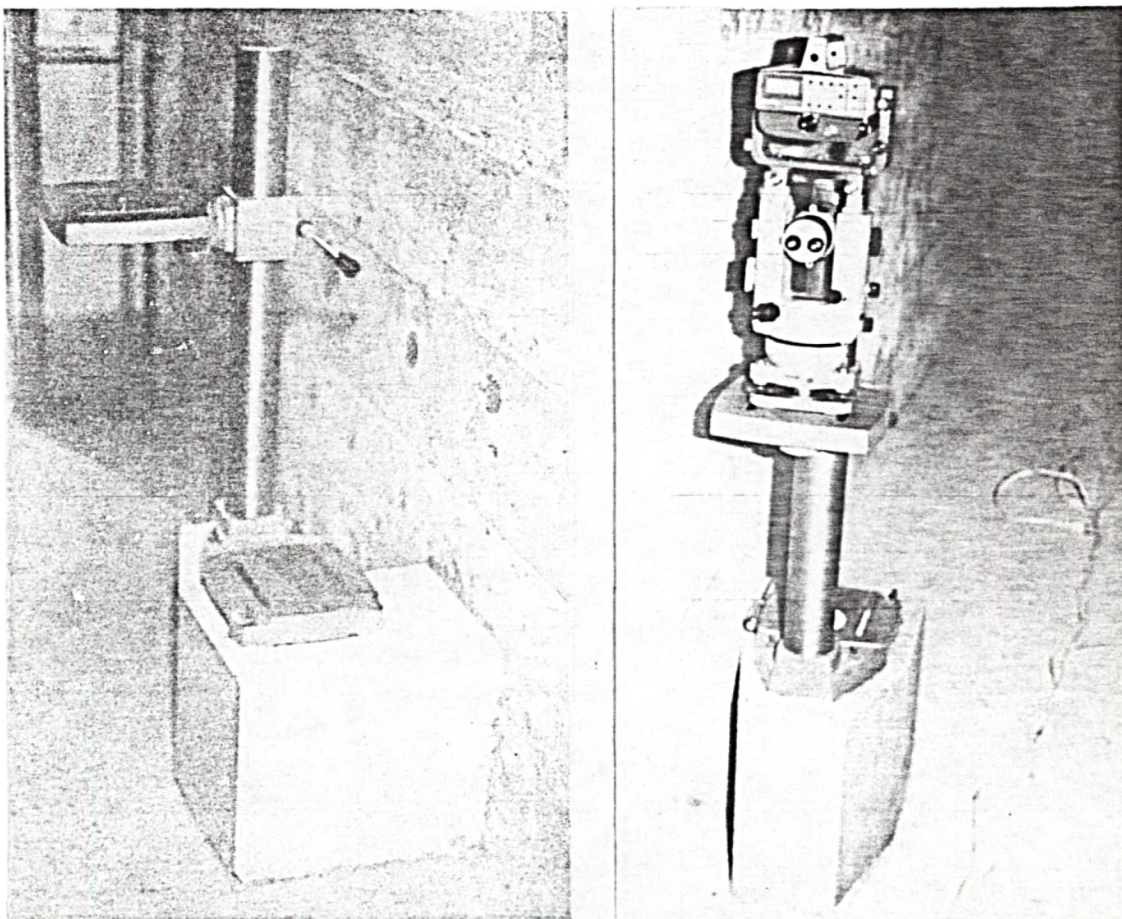
É uma estrutura mista, cuja base foi construída em concreto com cerca de 35 (trinta e cinco) centímetros de altura; sobre esta base foi parafusado um sistema mecânico (mesa de furadeira) composto das seguintes partes: base de fixação, coluna, mesa móvel e alavanca de fixação. Esta alavanca permite fixar a mesa móvel, possibilitando assim posicioná-la na altura desejada. Sobre esta mesa é fixado o instrumento a ser testado (foto 05).

As vantagens da utilização deste tipo de pilar, são:

Foto 04 - Linha de Teste da UFPr.



Foto 05 - Pilar de altura regulável



- facilidade na instalação do instrumento, evitando os inconvenientes do uso do tripé;

- possibilita posicionar o instrumento na mesma altura do refletor ou na posição mais adequada durante a calibração;

- comodidade durante as operações de medida - o operador trabalha sentado em frente ao equipamento; evita-se os inconvenientes de um deslocamento acidental do tripé.

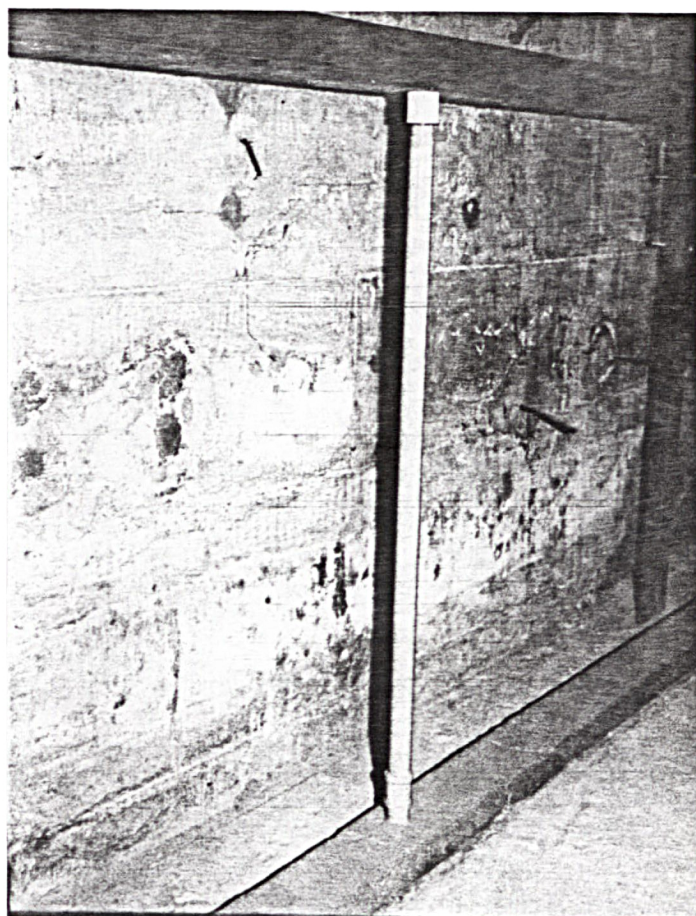
### 5.3 ALINHAMENTO E NIVELAMENTO DO TRILHO

Em experiência presenciada no Laboratório de Aferição quando da calibração de uma mira, fomos alertados da enorme importância do alinhamento e nivelamento do trilho em que se deslocará o refletor. Nestas situações em que se utiliza o interferômetro para o registro das medidas, irregularidades no trilho podem até impossibilitar a medida por não haver retorno do sinal.

No caso da Linha de Teste, a situação era muito mais complicada uma vez que o trilho além de necessitar de um nivelamento rigoroso, apresentava deslocamentos laterais aleatórios como se tivesse sido submetido a um esforço de torção.

As operações de alinhamento e nivelamento do trilho foram refeitas diversas vezes, utilizando-se suportes reguláveis colocados sob o trilho, cujo objetivo era forçá-lo a se deslocar até a posição correta (foto 06).

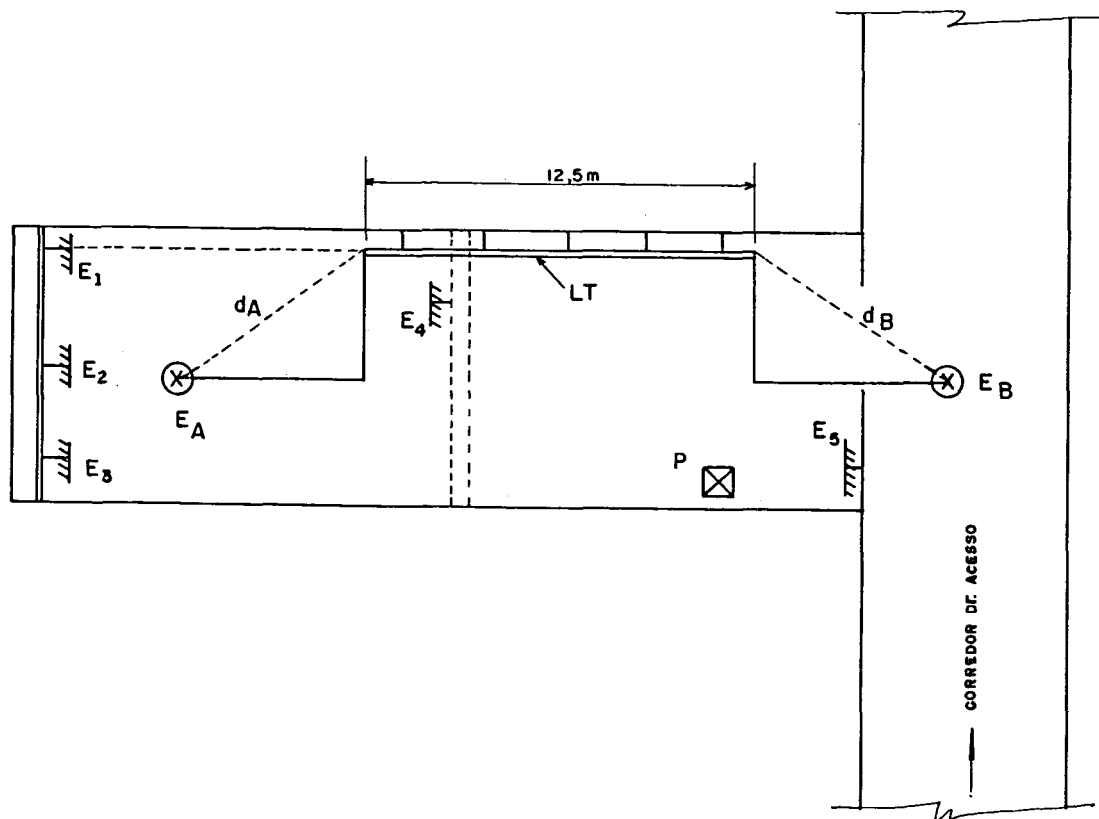
Foto 06 - Suportes reguláveis



O método de nivelamento (verificação dos desníveis) utilizado foi o das visadas equidistantes, uma vez que o método clássico não foi possível ser adotado por falta de espaço. Utilizou-se o nível Wild N-3 devidamente retificado e aferido para a verificação dos desníveis.

A figura 09 mostra esquematicamente o local onde está instalada a Linha de Teste e também o procedimento adotado no nivelamento.

Figura 09 - Esquema da Linha de Teste (LT) da UFPR.



$E_A$  e  $E_B$  são as posições onde o nível Wild N-3 foi instalado. As distâncias  $d_A$  e  $d_B$  devem ser iguais para que haja equivalência entre as leituras efetuadas a partir das duas estações; isto assegura a eliminação do erro de colimação. [12].

As leituras foram efetuadas sobre uma escala milimétrica, adaptada e fixada ao carrinho. As posições de leitura foram as graduações zero, 50, 100, ..., 1100 centímetros da fita graduada, ou seja, as mesmas posições a serem ocupadas na calibração.

A figura 10 mostra as ondulações do trilho durante as operações de nivelamento, e a figura 11 apresenta a melhor

situação conseguida em termos de desníveis. Verifica-se a existência de desníveis relativos máximos, da ordem de 0,6 mm.

O gráfico da figura 10 aparentemente mostra melhores resultados quando comparado com o da figura 11. Acontece que as correções dos desníveis longitudinais foram conseguidos mais facilmente, enquanto que as correções dos desvios laterais do trilho só foram minimizados mais tarde. É a situação mostrada na figura 11. Infelizmente para a clareza, os gráficos mostram somente as ondulações longitudinais, enquanto os desvios laterais só aparecem quando do deslocamento do refletor sobre o trilho.

Todos os nivelamentos com o nível Wild N-3 foram conferidos com o nível eletrônico Talyvel-3. Este nível fornece a inclinação da superfície em que o mesmo encontra-se estacionado, em segundos de arco (foto 07). Esta inclinação pode facilmente ser transformada num desnível, em unidades milimétricas mediante uma simples operação trigonométrica:

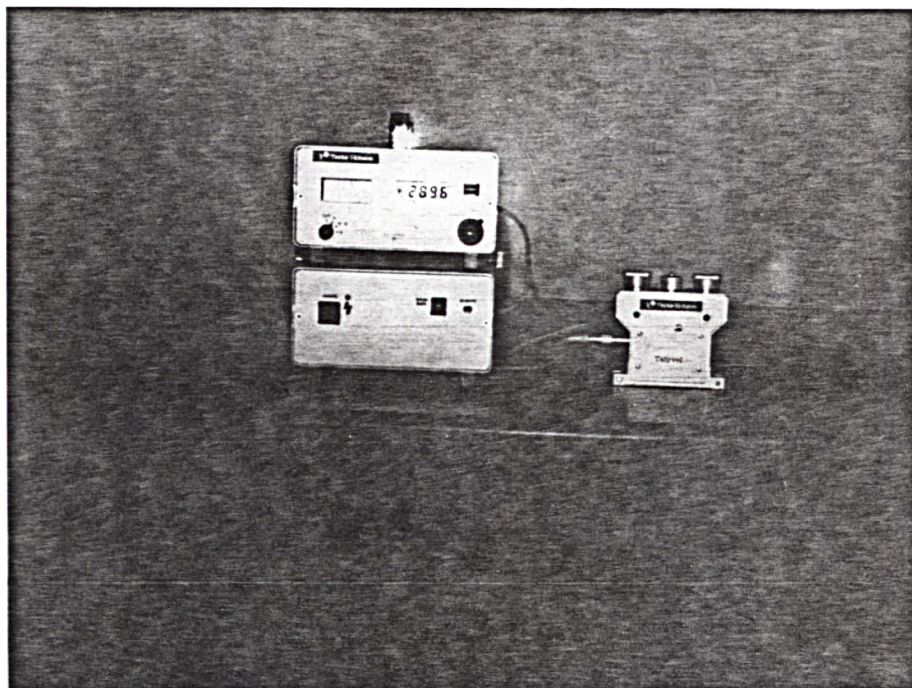
$$\Delta h_{(mm)} = \text{sen} \left[ \ell'' / 3600 \right] * d$$

onde:  $\Delta h_{(mm)}$  = desnível em milímetros;

$\ell''$  = leitura em segundos de arco;

d = distância entre as extremidades ou apoios da superfície sobre a qual está colocado o Talyvel-3.

Foto 07 - Nível eletrônico TALYVEL-3



Tendo em vista a utilização do nível eletrônico como verificador dos nivelamentos efetuados e também, tendo sido verificados resultados discordantes entre os dois tipos de nivelamento, procedeu-se uma verificação do Talyvel-3 em laboratório, descrita a seguir, com o objetivo de confirmar ou não algumas dúvidas surgidas durante o nivelamento do trilho.

Figura 10 - Gráfico comparativo entre os nivelamentos geométrico e eletrônico.

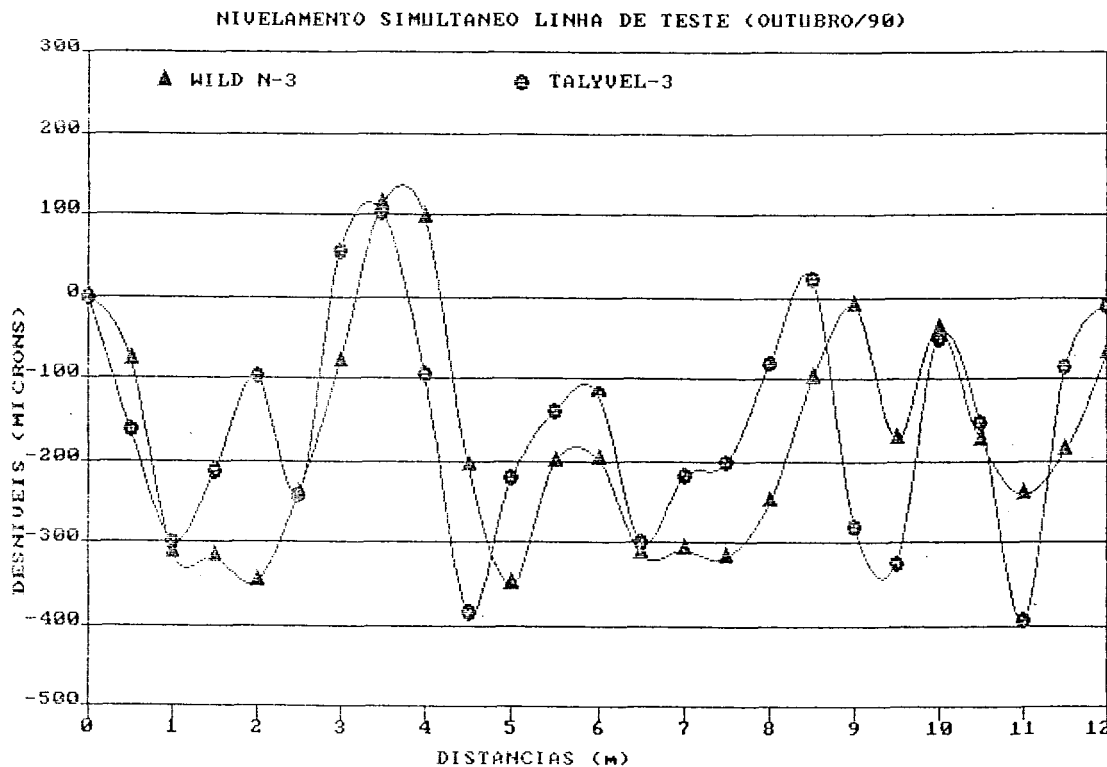
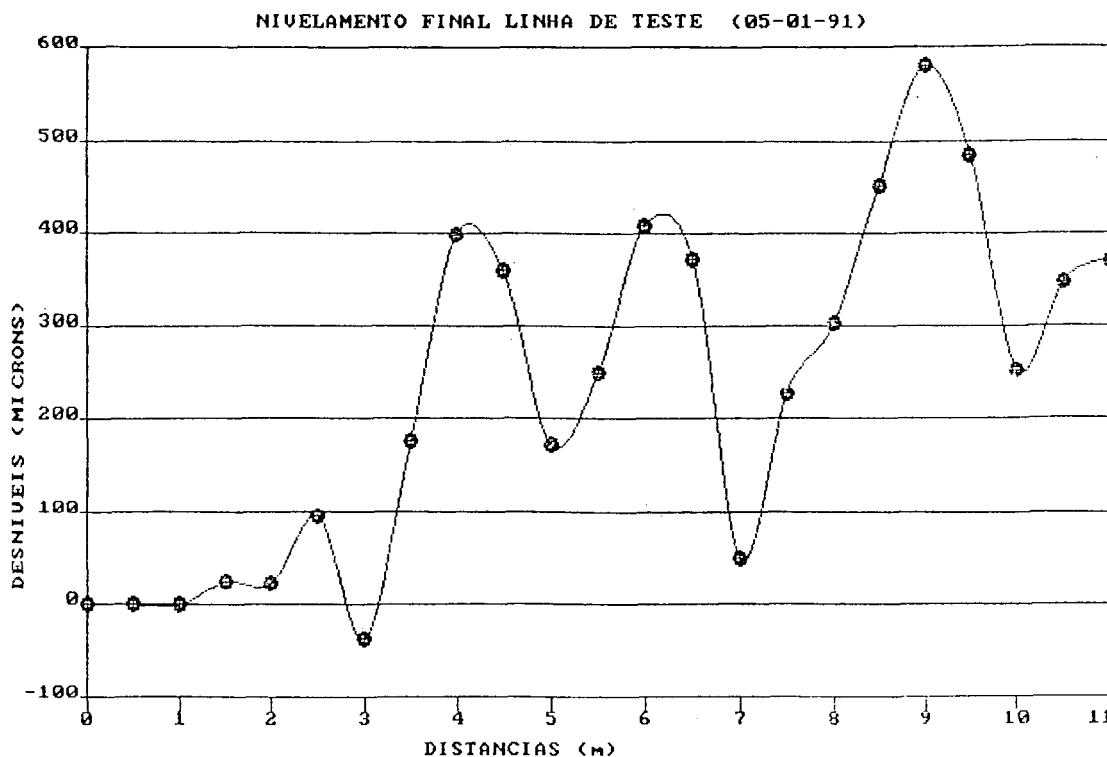


Figura 11 - Desníveis finais da Linha de Teste.





### 5.3.1 VERIFICAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO NÍVEL ELETRÔNICO TALYVEL-3. TESTE DE LABORATÓRIO.

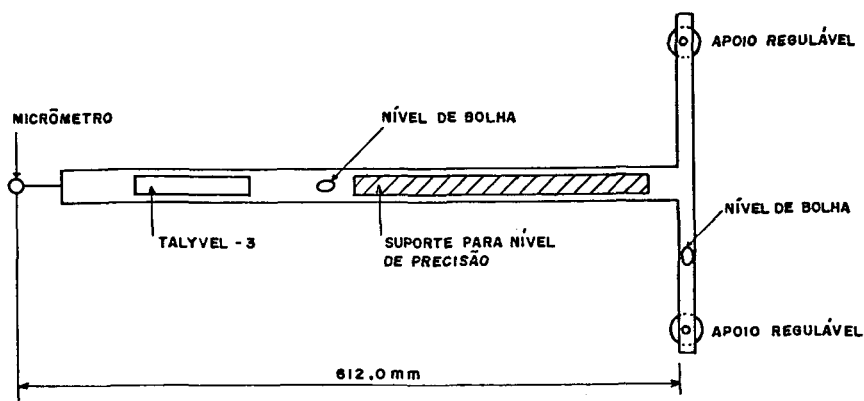
Para a verificação do funcionamento do nível eletrônico Talyvel-3 foram utilizados:

- calibrador de níveis de precisão;
- mesa horizontal (lisa e nivelada).

a) Local: laboratório de Aferição da UFPr.

b) Descrição do calibrador: é um mecanismo construído com viguetas de alumínio maciço apoiado em três pontos; dois apoios reguláveis que possibilitam o nivelamento do calibrador e um micrômetro que possibilita a introdução de inclinações milimétricas (figura 12). Este calibrador de níveis foi desenvolvido no C.P.G.C.G. da UFPr pelo professor José Celso São João em seu trabalho de Mestrado.

Figura 12 - Esquema do calibrador



c) Experiência: Após nivelado o calibrador, posicionou-se a Unidade de Medida do Talyvel-3 sobre o

mesmo. Verificou-se que a leitura registrada era diferente de zero, indicando que o calibrador não estava rigorosamente nivelado. Com o auxílio do micrômetro, introduziu-se inclinações no calibrador até a Unidade de Medida mostrar um valor igual ou próximo de zero. Tendo em vista a precisão do micrômetro ser inferior a do Talyvel, é praticamente impossível obter tal proeza.

d) Observações: Foram efetuadas duas séries de medidas com o Talyvel: com o display zerado (aproximadamente) e com o display registrando um valor qualquer. Em ambos os casos, os desníveis inseridos ao calibrador através do micrômetro eram conhecidos.

Tabela 01 - Observações com o display zerado

TALYVEL (")	Leitura (mm) Micrômetro	Desnível (mm) Talyvel	Desnível (mm) Micrômetro
-0,3	3,83	-	-
169,9	3,33	-0,505	-0,500
333,1	2,83	-0,989	-1,000
501,0	2,33	-1,487	-1,500
2,0	3,83	-	-
-166,4	4,33	0,500	0,500
-335,6	4,83	1,002	1,000
-506,1	5,33	1,508	1,500

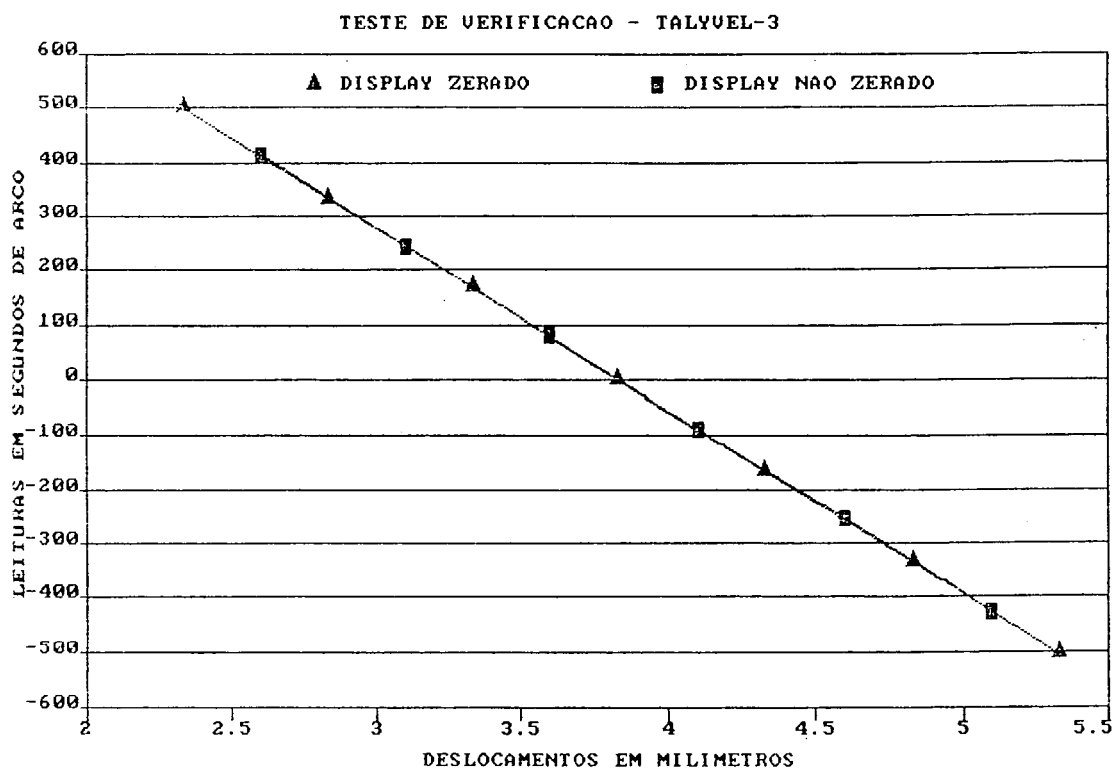
Tabela 02 - Observações com o display não zerado

TALYVEL (")	Leitura (mm) Micrômetro	Desnível (mm) Talyvel	Desnível (mm) Micrômetro
-88,9	4,10	-	-
-253,2	4,60	0,487	0,500
-427,5	5,10	1,005	1,000
-87,7	4,10	-	-
79,8	3,60	-0,497	-0,500
245,2	3,10	-0,988	-1,000
414,1	2,60	-1,489	-1,500

e) Conclusão: Tendo em vista a precisão do micrômetro assegurar confiança somente no décimo do milímetro (o centésimo é estimado), verifica-se pelos resultados obtidos que o nível eletrônico Talyvel-3 está funcionando perfeitamente de acordo com as prescrições (figura 13).

Este teste veio confirmar as suspeitas com relação ao desempenho do carrinho. Verificou-se mais tarde problemas num dos apoios (folga) que foi devidamente corrigido e eliminado.

Figura 13 - Desempenho do nível eletrônico Talyvel-3.



#### 5.4 SISTEMAS REFLETORES DE ESPELHO

Conforme descrito na seção 4.2, as distâncias a serem medidas durante o processo de calibração devem, preferencialmente ser maiores que 100 m. O local de trabalho, devido as limitações de espaço propiciam medições diretas de distâncias não superiores a 23 (vinte e três) metros. Diante deste fato, implantou-se no local, sistemas refletores de espelho com o objetivo de ampliar o trajeto percorrido pela onda portadora.

Estudos realizados no local, indicaram que com cinco sistemas refletores seria possível conseguir distâncias entre 105 e 115 metros. A disposição dos mesmos é mostrada na figura 09, onde  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ ,  $E_4$  e  $E_5$  são as posições escolhidas para a fixação dos sistemas refletores.

Quanto ao espelho a ser utilizado deve-se cuidar de dois aspectos básicos:

1- o vidro a ser utilizado no espelhamento deve ser testado em laboratório (uso do Flat) no que diz respeito à sua planicidade;

2- o espelhamento deve ser de superfície.

Tomando-se os cuidados acima mencionados, evita-se a ocorrência de dois fenômenos prejudiciais à reflexão do raio incidente:

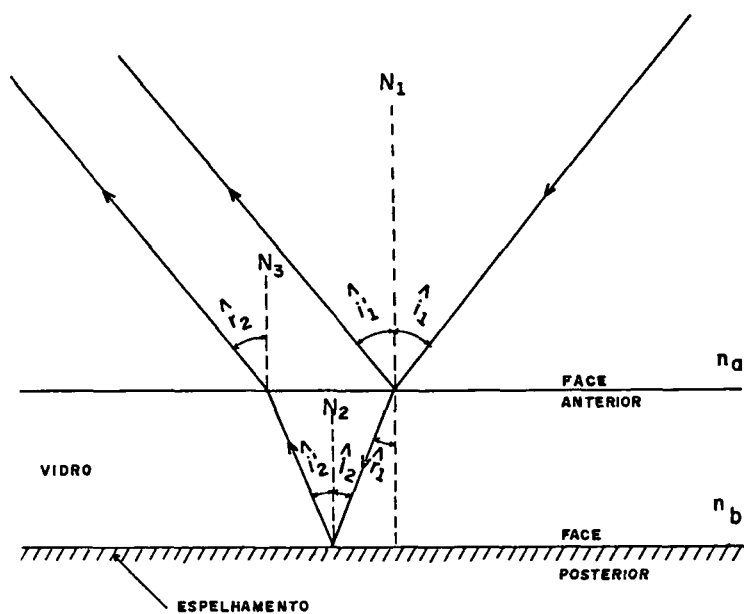
a) fenômeno da dupla reflexão - ocorre sempre nos espelhos comuns, devido a espessura do vidro; (figura 14)

b) distorção (distúrbios) na reflexão - ocorre sempre, em maior ou menor grau, devido à imperfeições na superfície do vidro (planicidade irregular).

Foram realizados testes em vidros dos mais variados tipos e espessuras (fotos 08 e 09) e verificou-se que, mesmo o do tipo cristal que apresentaram menos defeitos de planicidade, todos, sem exceção, não possuem a superfície perfeitamente plana. Neste trabalho foram utilizados seis vidros do tipo cristal com 4 mm de espessura.

Quanto aos sistemas refletores, foram construídos cinco dispositivos para adaptação dos espelhos. Tais

Figura 14 - Fenômeno da dupla reflexão



$$\hat{i}_1 = \hat{i}'_1$$

$$\hat{i}_2 = \hat{i}'_2$$

$$n_a \cdot \sin \hat{i}_1 = n_b \cdot \sin \hat{r}_1$$

$$n_b \cdot \sin \hat{i}'_2 = n_a \cdot \sin \hat{r}_2$$

$\hat{i}_1$  = ângulo de incidência na face anterior

$\hat{i}'_1$  = ângulo de reflexão na face anterior

$\hat{r}_1$  = ângulo de refração na primeira refração

$\hat{r}_2$  = idem na segunda refração

$\hat{i}_2$  = ângulo de incidência na face posterior

$\hat{i}'_2$  = ângulo de reflexão na face posterior

Foto 08 - Franjas de distorção (Espelho de 4 mm)

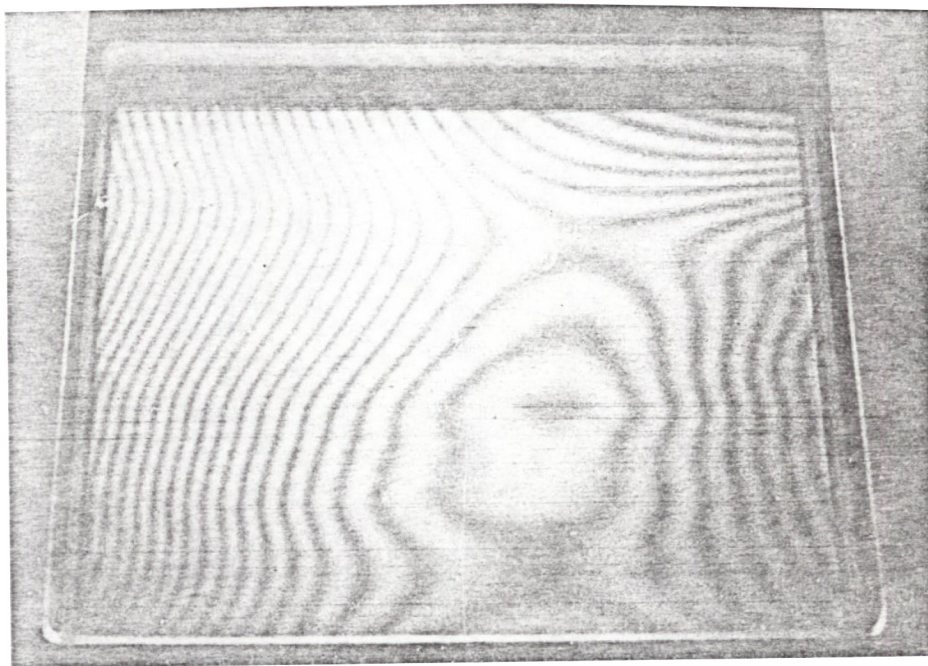
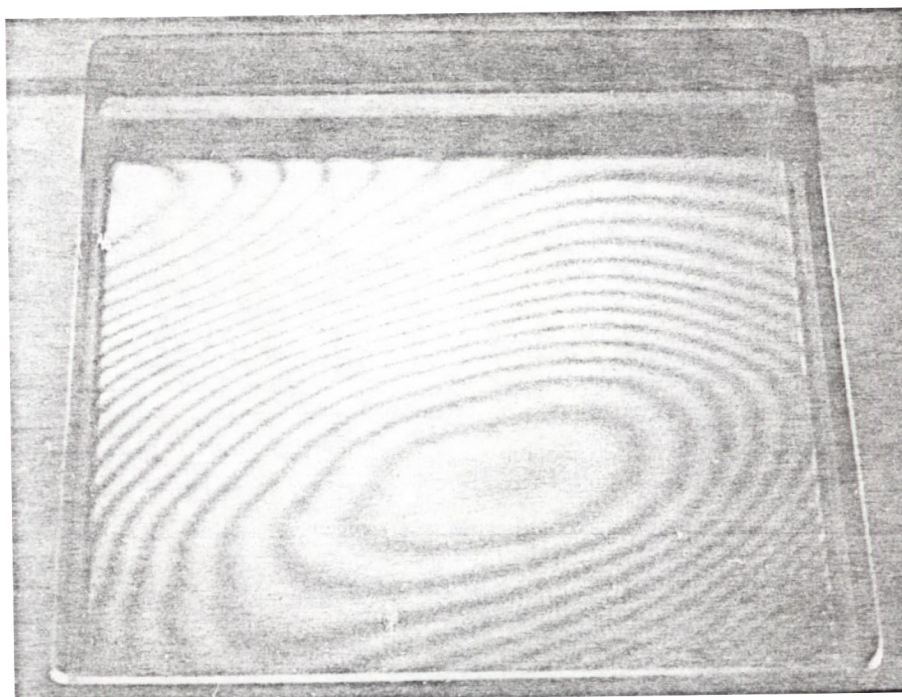


Foto 09 - Franjas de distorção (Espelho de 6 mm)



dispositivos, uma vez fixados no local desejado permitem movimentar o espelho (em rotação) tanto no sentido horizontal como no vertical. Este duplo movimento é possível e muito se assemelha ao movimento micrométrico, graças a um dispositivo tipo parafuso de rosca sem fim que gira solidário à dois pinos cravados na madeira sob pressão. Uma rotação qualquer no parafuso provoca um deslocamento (giro) no pino, que é transmitido ao espelho. Desta maneira foi possível realizar com relativa facilidade a orientação dos espelhos.

## 5.5 ALINHAMENTO DOS ESPELHOS

Teoricamente, o alinhamento dos espelhos é conseguido fazendo-se incidir o raio incidente exatamente no centro geométrico do primeiro espelho. Atuando nos parafusos dos movimentos horizontal e vertical, desloca-se o raio refletido até que o mesmo incida no centro do segundo espelho. Repete-se a operação sucessivamente até a obtenção do alinhamento do último espelho.

Na prática, esta tarefa não é tão simples como parece; pois inúmeros fatores concorrem para torná-la delicada, demorada e exaustiva, tais como:

- 1) a orientação só é possível de ser realizada se visualmente observada; para tal é necessário a utilização de equipamento de onda luminosa (luz ou Laser). Neste trabalho utilizou-se inicialmente um Laser com 0,95 mW de potência, emprestado junto ao laboratório de ótica do Departamento de



Física.

2) a orientação deve ser conduzida para todo o conjunto - IMED, espelhos e prisma refletor - simultaneamente, o que provoca o surgimento de novo problema: o desconhecimento do centro de emissão da radiação dos instrumentos.

3) todo o processo de orientação está correlacionado com o perfeito alinhamento entre o refletor (colocado sobre o trilho) e o primeiro espelho ( $E_1$ ). Qualquer irregularidade presente neste trecho, pode significar a perda do sinal de medida quando do deslocamento do refletor. Para assegurar o perfeito alinhamento, confeccionou-se uma mesa metálica de altura regulável e possível de ser nivelada (foto 10) que possibilitou posicionar o Laser (materializando o sinal proveniente do IMED) na mesma altura do refletor. Isto assegura o paralelismo entre o Laser e o trilho. Instalou-se o Laser numa das extremidades do trilho e o prisma refletor na outra. Após a perfeita colimação entre ambos (verificado pelo retorno do sinal sobre o Laser) retirou-se o refletor e orientou-se o espelho  $E_1$  segundo esta direção. As figuras 15 e 16 esquematizam esta operação.

4) o Laser utilizado abre muito rapidamente o feixe irradiado, o que obrigou a utilização de anteparos (cartões de cartolina com furo central) colocados sobre os espelhos com o objetivo de concentrar a parte central do feixe e tornar o alinhamento mais preciso. Com isso foi possível

Figura 15 - Laser e prisma refletor alinhados

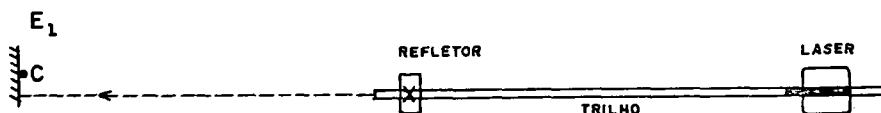
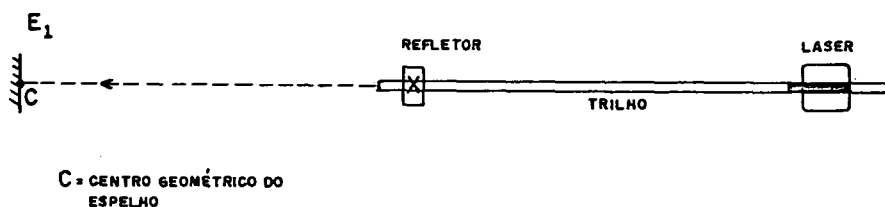


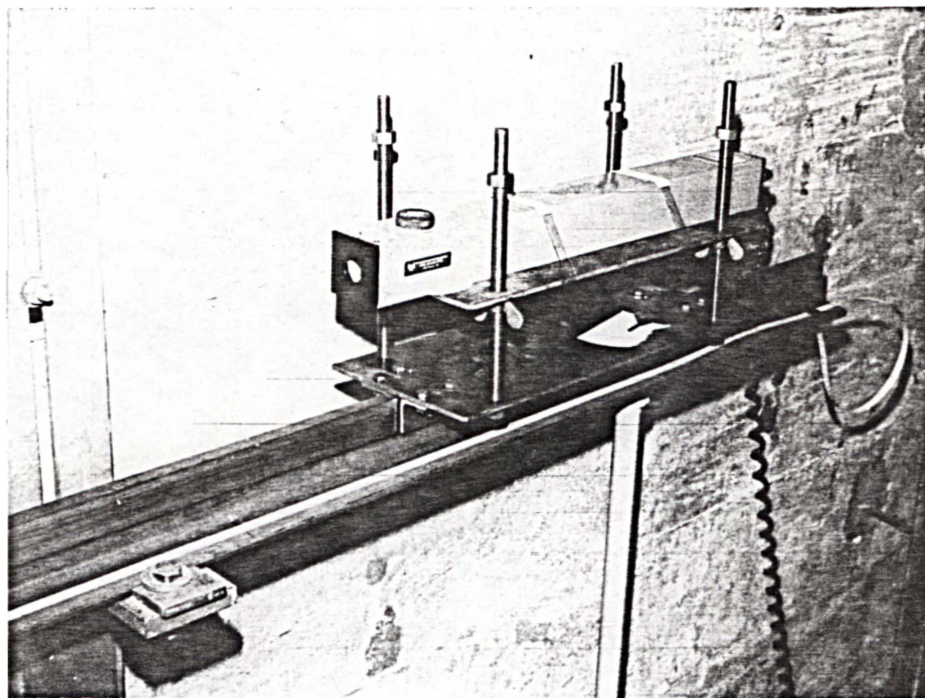
Figura 16 - Laser, prisma refletor e espelho alinhados



detectar outros problemas: o Laser é de baixa potência (0,95 mW) e também devido às perdas de irradiação causados pelos anteparos e distorções não foi possível alinhar todos os espelhos; apenas três deles foram alinhados. Outro problema detectado foi o aparecimento de franjas na imagem projetada, mostrando que o espelho utilizado apresenta problemas de planicidade; isto foi confirmado em testes realizados em laboratório, os quais mostravam ligeiras distorções da imagem.

Em função do exposto, deparou-se com dois problemas

Foto 10 - Mesa para o nivelamento e alinhamento do Laser



cruciais:

a) apenas três espelhos alinhados propiciariam distâncias da ordem de 70 metros, o que atenderia apenas em partes o objetivo do presente trabalho;

b) mesmo com os três espelhos alinhados, não foi possível obter sinal de retorno necessário para a efetivação das medidas, em função dos problemas anteriormente mencionados.

A solução para o impasse foi pesquisar a existência de um Laser com maior potência, que possibilitasse a realização dos trabalhos.

Um Laser com 2 mW de potência foi emprestado junto à

uma empresa de equipamentos de medição o que possibilitou a realização das orientações dos espelhos e das medições.

## 5.6 DISPOSITIVO DE PONTARIA

Para que haja precisão de leitura sobre a fita graduada, há necessidade de um sistema de pontaria que acoplado ao carrinho do refletor permita apontar corretamente sobre a marca desejada.

Para tal, foi confeccionado um dispositivo em madeira, muito simples, que atendeu plenamente aos objetivos (foto 02). Com este dispositivo é possível efetuar leituras com precisão do milímetro (estimando-se o décimo) com relativa comodidade.

Também foi adaptado ao carrinho um sistema de iluminação que projeta o feixe de luz diretamente sobre a fita graduada, melhorando sensivelmente a pontaria.

## 5.7 CALIBRAÇÃO DA FITA GRADUADA

A calibração da fita utilizada na Linha de Teste objetiva atender os requisitos de precisão exigidos na calibração.

Sabe-se que durante o processo de gravação das graduações, ocorrem erros de natureza aleatória e que no caso da fita, estes se acumulam ao longo de toda a sua extensão. Assim, em trabalhos de precisão é indispensável o conhecimento do erro de gravação presente nos instrumentos de medição direta, para que se possa introduzir correções às

distâncias observadas.

Os trabalhos de calibração foram conduzidos no laboratório de Aferição em duas etapas:

a) primeiramente foi calibrado um metro de fita de 5 em 5 cm, para utilização com IMED com  $\lambda/2$  igual a um metro;

b) numa segunda etapa foram calibrados 12,5 m da fita, de 50 em 50 cm, para utilização com a maioria dos instrumentos que possuem  $\lambda/2$  igual a 10 metros.

Os dados referentes à calibração são:

- trena metálica, marca LUFKIN, modelo YS20CM, com 20 metros de comprimento;

- menor divisão: mm;

- temperatura: 20° C;

- pressão: 689,5 mmHg;

- constante do interferômetro: 754,4

- data de calibração: 17/12/90.

As tabelas 03 e 04 a seguir, mostram os valores das correções resultantes da calibração, e as figuras 17 e 18 mostram os gráficos destas correções.

Tabela 03 - Correções aos valores nominais da fita (01 m)

Marca (cm)	Correção ( $\mu\text{m}$ )	Marca (cm)	Correção ( $\mu\text{m}$ )	Marca (cm)	Correção ( $\mu\text{m}$ )
00	0	35	-382	70	-658
05	52	40	-434	75	-668
10	-40	45	-489	80	-623
15	-100	50	-512	85	-663
20	-304	55	-640	90	-636
25	-285	60	-660	95	-590
30	-364	65	-630	100	-574

Tabela 04 - Correções aos valores nominais da fita (12,5 m)

Marca (cm)	Correção ( $\mu\text{m}$ )	Marca (cm)	Correção ( $\mu\text{m}$ )	Marca (cm)	Correção ( $\mu\text{m}$ )
0	0	450	-985	900	-2617
50	-512	500	-819	950	-2224
100	-574	550	-1555	1000	-2572
150	-1014	600	-1410	1050	-2986
200	-1176	650	-1689	1100	-2818
250	-373	700	-1956	1150	-3287
300	-1033	750	-1786	1200	-3160
350	-851	800	-2348	1250	-3359
400	-1224	850	-2152	—	—

Figura 17 - Correções aos valores nominais (01 m)

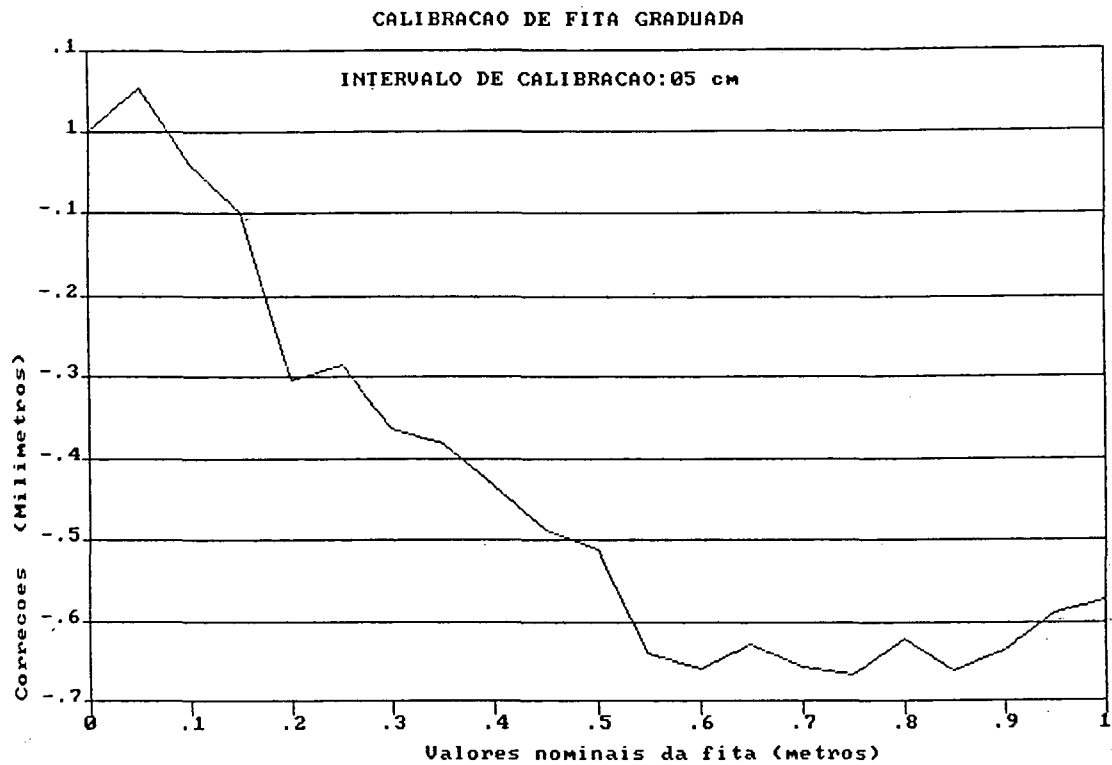
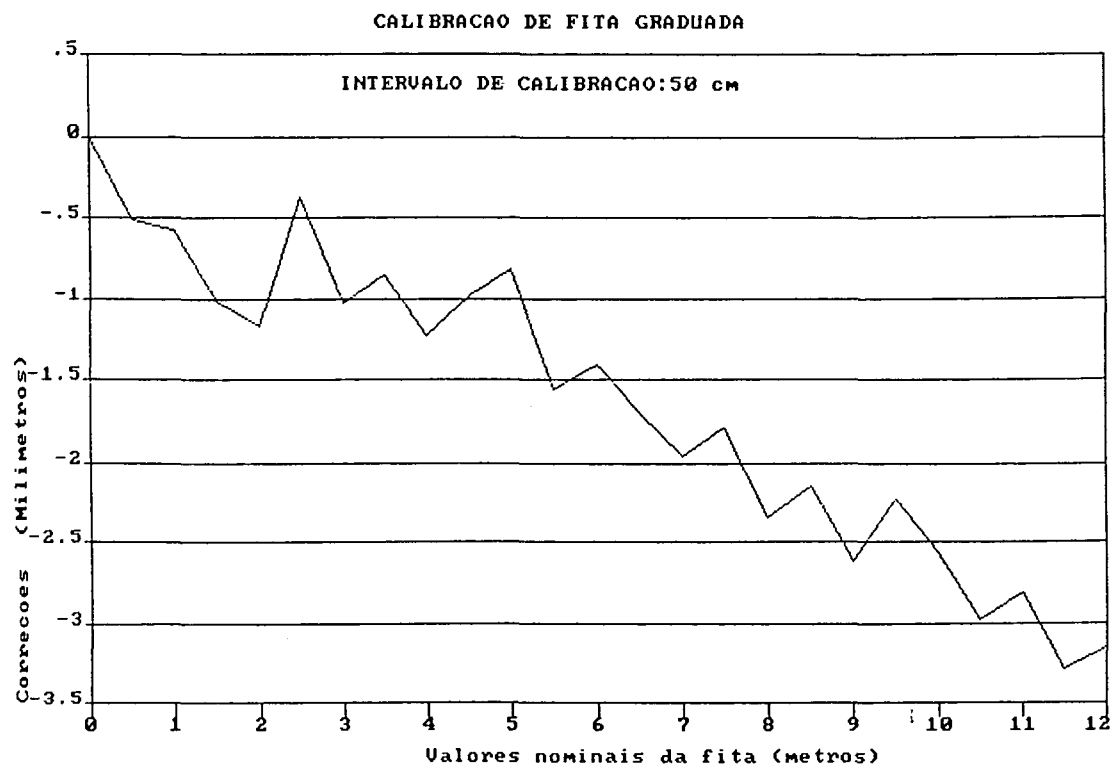


Figura 18 - Correções aos valores nominais (12,5 m)



## 5.8 DETERMINAÇÃO DO ERRO DE PONTARIA

O objetivo da determinação deste erro, é o de se conhecer a priori e com boa aproximação a provável influência do erro de pontaria sobre as medidas efetuadas.

O processo de obtenção das medidas foi conduzido no laboratório de Aferição, utilizando-se o interferômetro. Para tal o sistema de pontaria utilizado na Linha de Teste foi adaptado ao mesmo e as leituras foram efetuadas sobre a fita graduada, também utilizada na Linha de Teste.

Foram utilizadas duas graduações da fita (30 e 70) obtendo-se assim dois conjuntos de observações. A cada pontaria efetuada, um auxiliar anotava o valor registrado no interferômetro, sem o conhecimento do operador.

Os resultados obtidos foram os seguintes:

1) Marca de referência = 30

Número de observações = 30

Média = 29,95

Maior valor observado = 30,05

Menor valor observado = 29,87

Afastamento máximo = 0,22

Erro médio = 0,05 mm

Erro máximo = 0,22 mm

2) Marca de referência = 70

Número de observações = 30

Média = 69,97

Maior valor observado = 70,14

Menor valor observado = 69,86



Afastamento máximo = 0,28

Erro médio = 0,03 mm

Erro máximo = 0,28 mm

Os resultados acima indicam uma tendência de erro para menos, com amplitude máxima estimada em torno de 0,3 mm.

## 6 MEDIÇÕES NA LINHA DE TESTE DA UFPr

Uma vez concluídos os trabalhos preliminares descritos no capítulo anterior, as operações de medida pertinentes à determinação do erro cíclico foram conduzidas rigorosamente de acordo com o procedimento exigido pelo método rigoroso (capítulo 4, seção 4.2).

### 6.1 ACOMPANHAMENTO DAS CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS DO LOCAL

Durante todo o transcorrer dos trabalhos junto à Linha de Teste, as condições meteorológicas do local foram acompanhadas diariamente, através das leituras de temperatura - bulbo seco e úmido - e de pressão atmosférica. Para tal foram utilizados um altímetro Paulin no. PG-254 e um psicrômetro de funda no. 40.126.

Nos anexos 02, 03 e 04 estão relacionados todos os dados meteorológicos obtidos (médias diárias), variação da temperatura e a umidade relativa detectada ao longo da realização deste trabalho.

O objetivo destas observações, é o de se conhecer o comportamento no local, dos parâmetros meteorológicos, no que se refere a variabilidade de seus valores. Isto pode indicar a necessidade ou não de se introduzir correções meteorológicas às distâncias medidas, uma vez que as medições com os IMED foram realizadas em dias diferentes.

## 6.2 OPERAÇÕES DE MEDIDA

Preliminarmente às medições destinadas à determinação do erro cíclico, foram realizadas várias medidas de distâncias com o objetivo de testar dois aspectos básicos: a) veracidade dos valores fornecidos pelo instrumento e b) verificar o perfeito alinhamento entre instrumento, prisma refletor e espelhos.

O instrumento utilizado foi um distanciômetro Topcon modelo DM-S3L com precisão nominal de  $\pm(5 \text{ mm} + 3 \text{ ppm})$ .

Os valores encontrados para as distâncias, utilizando-se três e cinco espelhos, estão relacionados nas tabelas 05 e 06 e são oriundas dos deslocamentos do refletor sobre o trilho, de metro em metro, ao longo de 10 metros, que é o valor do meio comprimento de onda dos instrumentos testados.

Tabela 05 - Teste com três espelhos

DISTANCIAS		COM	TRÊS	ESPELHOS
Ponto Visado	Distância Medida		Ponto Visado	Distância Medida
0,0	61,562		6,0	67,561
1,0	62,561		7,0	68,560
2,0	63,560		8,0	69,558
3,0	64,561		9,0	70,558
4,0	65,561		10,0	71,559
5,0	66,560		-	-

Tabela 06 - Teste com cinco espelhos

DISTANCIAS COM CINCO ESPELHOS			
Ponto Visado	Distância Medida	Ponto Visado	Distância Medida
0,0	106,762	6,0	112,758
1,0	107,764	7,0	113,762
2,0	108,758	8,0	114,760
3,0	109,760	9,0	115,756
4,0	110,763	10,0	116,761
5,0	111,759	-	-

Data do teste: 28-01-91

Temperatura: 23,4°C

Pressão: 684,5 mm Hg

Este teste serviu para comprovar não somente os valores das distâncias, mas também a funcionabilidade do procedimento de obtenção de distâncias com os mais variados comprimentos, simplesmente utilizando-se espelhos.

Para a determinação do erro cíclico, foram realizadas medidas com seis (06) distanciômetros. Estes instrumentos, segundo informações dos proprietários, possuem horas de uso bastante diferenciadas. Assim, foram testados um instrumento novo (DM-S3L), dois com muitas horas de trabalho (DM-502 e DM-102) porém revisados recentemente, além de outros com menos horas de uso.

As medidas meteorológicas foram realizadas antes e após a realização das medições.

As distâncias foram medidas a cada deslocamento do refletor ( 50 em 50 cm) e cada medida foi definida a partir de três leituras.

Para verificar a normalidade e a coerência das medidas, os instrumentos foram testados em dias diferentes.

Os valores das distâncias, obtidos para cada instrumento estão relacionados nas tabelas 07 a 20 a seguir, juntamente com as principais características técnicas.

A interpretação das tabelas mencionadas acima é a seguinte:

Coluna 1 = posições da fita graduada ocupadas pelo refletor;

Coluna 2 = distâncias medidas;

Coluna 3 = intervalo de calibração ( $d_i$ ) oriundos da calibração da fita (tabela 04);

Coluna 4 = simples diferenças entre as distâncias observadas;

Coluna 5 = erro de observação = col.4 - col.3; correspondem às duplas diferenças mencionadas na seção 4.5.

#### 6.2.1 DISTANCIÔMETRO DM-S3L DA TOPCON

Onda portadora: infravermelho ( $\lambda=0,780 \mu\text{m}$ )

Comprimento de onda de modulação fina:  $\lambda = 20,0 \text{ m}$

Precisão nominal:  $\pm(5 \text{ mm} + 3 \text{ ppm})$

Alcance médio: 3500 m

Proprietário: Manfra e Cia. Ltda. - Curitiba.

TABELA 07 - Distâncias obtidas com 03 espelhos - DM-S3L

* CALIBRAÇÃO DE IMED - DETERMINAÇÃO DO ERRO CÍCLICO *				
MED= DM-S3L (TOPCON) (MANFRA)		$\lambda/2= 10,0$ metros		
Onda portadora= I.V.		Temperatura= 24,2°C		
Pressão atmosférica= 685 mm Hg		Data= 20-02-91		
***** DISTANCIAS COM TRÊS ESPELHOS *****				
Ponto Visado	Distância Medida (m)	Deslocamento Refletor (m)	$D_{i+1} - D_i$	$D_{i+1} - D_i - d_i$
0 (m)	61,564	-	-	-
0,5	62,063	0,499488	0,499	-0,488
1,0	62,562	0,499938	0,499	-0,938
1,5	63,062	0,499560	0,500	0,440
2,0	63,562	0,499980	0,500	0,020
2,5	64,063	0,500803	0,501	0,197
3,0	64,563	0,499340	0,500	0,660
3,5	65,064	0,500182	0,501	0,818
4,0	65,562	0,499627	0,498	-1,627
4,5	66,062	0,500239	0,500	-0,239
5,0	66,562	0,500166	0,500	-0,166
5,5	67,061	0,499264	0,499	-0,264
6,0	67,562	0,500145	0,501	0,855
6,5	68,062	0,499721	0,500	0,279
7,0	68,562	0,499733	0,500	0,267
7,5	69,062	0,500170	0,500	-0,170
8,0	69,560	0,499438	0,498	-1,438
8,5	70,061	0,500196	0,501	0,804
9,0	70,561	0,499535	0,500	0,465
9,5	71,062	0,500393	0,501	0,607
10,0	71,562	0,499652	0,500	0,348

TABELA 08 - Distâncias obtidas com 05 espelhos - DM-S3L

* CALIBRAÇÃO DE IMED - DETERMINAÇÃO DO ERRO CÍCLICO *				
MED= DM-S3L (TOPCON) (MANFRA)		$\lambda/2= 10,0$ metros		
Onda portadora= I.V.		Temperatura= $24,2^{\circ}\text{C}$		
Pressão atmosférica= 685 mm Hg		Data= 20-02-91		
***** DISTANCIAS COM CINCO ESPELHOS *****				
Ponto Visado	Distância Medida (m)	Deslocamento Refletor (m)	$D_{i+1} - D_i$	$D_{i+1} - D_i - d_i$
0 (m)	106,761	-	-	-
0,5	107,262	0,499488	0,501	1,512
1,0	107,763	0,499938	0,501	1,062
1,5	108,260	0,499560	0,497	-2,560
2,0	108,757	0,499980	0,497	-2,980
2,5	109,257	0,500803	0,500	-0,803
3,0	109,758	0,499340	0,501	1,660
3,5	110,262	0,500182	0,504	3,818
4,0	110,763	0,499627	0,501	1,373
4,5	111,262	0,500239	0,499	-1,239
5,0	111,759	0,500166	0,497	-3,166
5,5	112,255	0,499264	0,496	-3,264
6,0	112,756	0,500145	0,501	0,855
6,5	113,259	0,499721	0,503	3,279
7,0	113,760	0,499733	0,501	1,267
7,5	114,262	0,500170	0,502	1,830
8,0	114,761	0,499438	0,499	-0,438
8,5	115,257	0,500196	0,496	-4,196
9,0	115,755	0,499535	0,498	-1,535
9,5	116,256	0,500393	0,501	0,607
10,0	116,759	0,499652	0,503	3,348

TABELA 09 - Distâncias obtidas com 03 espelhos frontais

* CALIBRAÇÃO DE IMED - DETERMINAÇÃO DO ERRO CÍCLICO *				
MED= DM-S3L (TOPCON) (MANFRA)		$\lambda/2= 10,0$ metros		
Onda portadora= I.V.		Temperatura= $24,0^{\circ}\text{C}$		
Pressão atmosférica= 689 mm Hg		Data= 15-02-91		
***** DISTÂNCIAS COM TRÊS ESPELHOS FRONTAIS *****				
Ponto Visado	Distância Medida (m)	Deslocamento Refletor (m)	$D_{i+1} - D_i$	$D_{i+1} - D_i - d_i$
0 (m)	61,528	-	-	-
0,5	62,027	0,499488	0,499	-0,488
1,0	62,526	0,499938	0,499	-0,938
1,5	63,026	0,499560	0,500	0,440
2,0	63,525	0,499980	0,499	-0,980
2,5	64,027	0,500803	0,502	1,197
3,0	64,526	0,499340	0,499	-0,340
3,5	65,027	0,500182	0,501	0,818
4,0	65,526	0,499627	0,499	-0,627
4,5	66,025	0,500239	0,499	-1,239
5,0	66,526	0,500166	0,501	0,834
5,5	67,025	0,499264	0,499	-0,264
6,0	67,526	0,500145	0,501	0,855
6,5	68,026	0,499721	0,500	0,279
7,0	68,525	0,499733	0,499	-0,733
7,5	69,025	0,500170	0,500	-0,170
8,0	69,525	0,499438	0,500	0,562
8,5	70,024	0,500196	0,494	-1,196
9,0	70,524	0,499535	0,500	0,465
9,5	71,025	0,500393	0,501	0,607
10,0	71,525	0,499652	0,500	0,348



TABELA 10 - Distâncias obtidas com 05 espelhos frontais

* CALIBRAÇÃO DE IMED - DETERMINAÇÃO DO ERRO CÍCLICO *				
MED= DM-S3L (TOPCON) (MANFRA)		$\lambda/2= 10,0$ metros		
Onda portadora= I. V.		Temperatura= $24,0^{\circ}\text{C}$		
Pressão atmosférica= 689 mm Hg		Data= 15-02-91		
***** DISTANCIAS COM CINCO ESPELHOS FRONTAIS ****				
Ponto Visado	Distância Medida (m)	Deslocamento Refletor (m)	$D_{i+1} - D_i$	$D_{i+1} - D_i - d_i$
0 (m)	106,669	-	-	-
0,5	107,171	0,499488	0,502	2,512
1,0	107,672	0,499938	0,501	1,062
1,5	108,170	0,499560	0,498	-0,156
2,0	108,666	0,499980	0,496	-3,980
2,5	109,165	0,500803	0,499	-1,803
3,0	109,666	0,499340	0,501	1,660
3,5	110,170	0,500182	0,504	3,818
4,0	110,671	0,499627	0,501	1,373
4,5	111,171	0,500239	0,500	-0,239
5,0	111,668	0,500166	0,497	-3,166
5,5	112,164	0,499264	0,496	-3,264
6,0	112,664	0,500145	0,500	-0,145
6,5	113,166	0,499721	0,502	2,279
7,0	113,669	0,499733	0,503	3,267
7,5	114,171	0,500170	0,502	1,830
8,0	114,669	0,499438	0,498	-1,438
8,5	115,166	0,500196	0,497	-3,196
9,0	115,663	0,499535	0,497	-2,535
9,5	116,163	0,500393	0,500	-0,393
10,0	116,667	0,499652	0,504	4,348

### 6.2.2 DISTANCIÔMETRO DM-501 DA KERN

Onda portadora: infravermelho ( $\lambda = 0,860 \mu\text{m}$ )

Comprimento de onda de modulação fina:  $\lambda = 20,0 \text{ m}$

Precisão nominal:  $\pm(5 \text{ mm} + 5 \text{ ppm})$

Alcance médio: 1000 m

Proprietário: Fundação ITCF - Curitiba.

TABELA 11 - Distâncias obtidas com 03 espelhos - DM-501

* CALIBRAÇÃO DE IMED - DETERMINAÇÃO DO ERRO CÍCLICO *				
MED= DM-501 (KERN) (ITCF)			$\lambda/2= 10,0$ metros	
Onda portadora= I.V.			Temperatura= 24,0°C	
Pressão atmosférica= 686 mm Hg			Data= 07-02-91	
***** DISTANCIAS COM TRÊS ESPELHOS *****				
Ponto Visado	Distância Medida (m)	Deslocamento Refletor (m)	$D_{i+1} - D_i$	$D_{i+1} - D_i - d_i$
0 (m)	61,592	-	-	-
0,5	62,100	0,499488	0,508	8,512
1,0	62,603	0,499938	0,503	3,062
1,5	63,102	0,499560	0,499	-0,560
2,0	63,596	0,499980	0,494	-5,980
2,5	64,096	0,500803	0,500	-0,803
3,0	64,581	0,499340	0,485	-14,340
3,5	65,080	0,500182	0,499	-1,182
4,0	65,575	0,499627	0,495	-4,627
4,5	66,077	0,500239	0,502	1,761
5,0	66,576	0,500166	0,499	-1,166
5,5	67,075	0,499264	0,499	-0,264
6,0	67,576	0,500145	0,501	0,855
6,5	68,074	0,499721	0,498	-1,721
7,0	68,574	0,499733	0,500	0,267
7,5	69,073	0,500170	0,499	-1,170
8,0	69,574	0,499438	0,501	1,562
8,5	70,076	0,500196	0,502	1,804
9,0	70,578	0,499535	0,502	2,465
9,5	71,082	0,500393	0,504	3,607
10,0	71,580	0,499652	0,498	-1,652

TABELA 12 - Distâncias obtidas com 05 espelhos - DM-501

* CALIBRAÇÃO DE IMED - DETERMINAÇÃO DO ERRO CÍCLICO *				
MED= DM-501 (KERN) (ITCF)		$\lambda/2= 10,0$ metros		
Onda portadora= I.V.		Temperatura= 24,0°C		
Pressão atmosférica= 686 mm Hg		Data= 07-02-91		
***** DISTANCIAS COM CINCO ESPELHOS *****				
Ponto Visado	Distância Medida (m)	Deslocamento Refletor (cm)	$D_{i+1} - D_i$	$D_{i+1} - D_i - d_i$
0 (m)	106,749	-	-	-
0,5	107,248	0,499488	0,499	-0,488
1,0	107,739	0,499938	0,491	-8,938
1,5	108,243	0,499560	0,504	4,440
2,0	108,745	0,499980	0,502	2,020
2,5	109,243	0,500803	0,498	-2,803
3,0	109,744	0,499340	0,501	1,660
3,5	110,248	0,500182	0,504	3,818
4,0	110,744	0,499627	0,496	-3,627
4,5	111,247	0,500239	0,503	2,761
5,0	111,748	0,500166	0,501	0,834
5,5	112,248	0,499264	0,500	0,736
6,0	112,750	0,500145	0,502	1,855
6,5	113,247	0,499721	0,497	-2,721
7,0	113,748	0,499733	0,501	1,267
7,5	114,247	0,500170	0,499	-1,170
8,0	114,746	0,499438	0,499	-0,438
8,5	115,246	0,500196	0,500	-0,196
9,0	115,744	0,499535	0,498	-1,535
9,5	116,242	0,500393	0,498	-2,393
10,0	116,743	0,499652	0,501	1,348

### 6.2.3 DISTANCIÔMETRO DM-502 DA KERN

Onda portadora: infravermelho ( $\lambda = 0,860 \mu\text{m}$ )

Comprimento de onda de modulação fina:  $\lambda = 20,0 \text{ m}$

Precisão nominal:  $\pm(3 \text{ mm} + 5 \text{ ppm})$

Alcance médio: 2000 m

Proprietário: Fundação ITCF - Curitiba.

TABELA 13 - Distâncias obtidas com 03 espelhos - DM-502I

* CALIBRAÇÃO DE IMED - DETERMINAÇÃO DO ERRO CÍCLICO *				
MED= DM-502 (KERN) (ITCF)			$\lambda/2= 10,0$ metros	
Onda portadora= I.V.			Temperatura= 24,0°C	
Pressão atmosférica= 686 mm Hg			Data= 07-02-91	
***** DISTANCIAS COM TRÊS ESPELHOS *****				
Ponto Visado	Distância Medida (m)	Deslocamento Refletor (m)	$D_{i+1} - D_i$	$D_{i+1} - D_i - d_i$
0 (m)	61,549	-	-	-
0,5	62,047	0,499488	0,498	-1,488
1,0	62,546	0,499938	0,499	-0,938
1,5	63,044	0,499560	0,498	-0,156
2,0	63,542	0,499980	0,498	-0,198
2,5	64,043	0,500803	0,501	0,197
3,0	64,543	0,499340	0,500	0,660
3,5	65,042	0,500182	0,499	-1,182
4,0	65,542	0,499627	0,500	0,373
4,5	66,043	0,500239	0,501	0,761
5,0	66,540	0,500166	0,497	-3,166
5,5	67,040	0,499264	0,500	0,736
6,0	67,542	0,500145	0,502	1,855
6,5	68,042	0,499721	0,500	0,279
7,0	68,542	0,499733	0,500	0,267
7,5	69,043	0,500170	0,501	0,830
8,0	69,542	0,499438	0,499	-0,438
8,5	70,042	0,500196	0,500	-0,196
9,0	70,542	0,499535	0,500	0,465
9,5	71,043	0,500393	0,501	0,607
10,0	71,543	0,499652	0,500	0,348

TABELA 14 - Distâncias obtidas com 05 espelhos - DM-502I

* CALIBRAÇÃO DE IMED - DETERMINAÇÃO DO ERRO CÍCLICO *				
MED= DM-502 (KERN) (ITCF)		$\lambda/2= 10,0$ metros		
Onda portadora= I.V.		Temperatura= $24,0^{\circ}\text{C}$		
Pressão atmosférica= 686 mm Hg		Data= 07-02-91		
***** DISTANCIAS COM CINCO ESPELHOS *****				
Ponto Visado	Distância Medida (m)	Deslocamento Refletor (m)	$D_{i+1} - D_i$	$D_{i+1} - D_i - d_i$
0 (m)	106,737	-	-	-
0,5	107,235	0,499488	0,498	-1,488
1,0	107,736	0,499938	0,501	1,062
1,5	108,237	0,499560	0,501	0,144
2,0	108,740	0,499980	0,503	3,020
2,5	109,239	0,500803	0,499	-1,803
3,0	109,741	0,499340	0,502	2,660
3,5	110,242	0,500182	0,501	0,818
4,0	110,744	0,499627	0,502	2,373
4,5	111,244	0,500239	0,500	-0,239
5,0	111,743	0,500166	0,499	-1,166
5,5	112,244	0,499264	0,501	1,736
6,0	112,744	0,500145	0,500	-0,145
6,5	113,242	0,499721	0,498	-1,721
7,0	113,735	0,499733	0,493	-6,733
7,5	114,238	0,500170	0,503	2,830
8,0	114,736	0,499438	0,498	-1,438
8,5	115,235	0,500196	0,499	-1,196
9,0	115,734	0,499535	0,499	-0,535
9,5	116,234	0,500393	0,500	-0,393
10,0	116,734	0,499652	0,500	0,348

#### 6.2.4 DISTANCIÔMETRO DM-502 DA KERN

Proprietário: Engefoto - Engenharia de  
Aerolevantamentos S/A. Curitiba.

Demais características técnicas já mencionadas na  
seção anterior.



TABELA 15 - Distâncias obtidas com 03 espelhos - DM-502E

* CALIBRAÇÃO DE IMED - DETERMINAÇÃO DO ERRO CÍCLICO *				
MED= DM-502 (KERN) (ENGEFOTO)		$\lambda/2= 10,0$ metros		
Onda portadora= I.V.		Temperatura= $24,2^{\circ}\text{C}$		
Pressão atmosférica= 685 mm Hg		Data= 17-02-91		
***** DISTANCIAS COM TRÊS ESPELHOS *****				
Ponto Visado	Distância Medida (m)	Deslocamento Refletor (m)	$D_{i+1} - D_i$	$D_{i+1} - D_i - d_i$
0 (m)	61,548	-	-	-
0,5	62,048	0,499488	0,500	0,512
1,0	62,547	0,499938	0,499	-0,938
1,5	63,047	0,499560	0,500	0,440
2,0	63,546	0,499980	0,499	-0,980
2,5	64,042	0,500803	0,496	-4,803
3,0	64,539	0,499340	0,497	-2,340
3,5	65,037	0,500182	0,498	-2,182
4,0	65,536	0,499627	0,499	-0,627
4,5	66,033	0,500239	0,497	-3,239
5,0	66,534	0,500166	0,501	0,834
5,5	67,032	0,499264	0,498	-1,264
6,0	67,534	0,500145	0,502	1,855
6,5	68,034	0,499721	0,500	0,279
7,0	68,535	0,499733	0,501	1,267
7,5	69,039	0,500170	0,504	3,830
8,0	69,540	0,499438	0,501	1,562
8,5	70,048	0,500196	0,508	7,804
9,0	70,542	0,499535	0,494	-5,535
9,5	71,041	0,500393	0,499	-1,393
10,0	71,549	0,499652	0,508	8,348

TABELA 16 - Distâncias obtidas com 05 espelhos - DM-502E

* CALIBRAÇÃO DE IMED - DETERMINAÇÃO DO ERRO CÍCLICO *				
MED= DM-502 (KERN) (ENGFOTO)		$\lambda/2= 10,0$ metros		
Onda portadora= I.V.		Temperatura= $24,2^{\circ}\text{C}$		
Pressão atmosférica= 685 mm Hg		Data= 17-02-91		
***** DISTÂNCIAS COM CINCO ESPELHOS *****				
Ponto Visado	Distância Medida (m)	Deslocamento Refletor (m)	$D_{i+1} - D_i$	$D_{i+1} - D_i - d_i$
0 (m)	106,730	-	-	-
0,5	107,228	0,499488	0,498	-1,488
1,0	107,732	0,499938	0,504	4,062
1,5	108,232	0,499560	0,500	0,440
2,0	108,736	0,499980	0,504	4,020
2,5	109,242	0,500803	0,506	5,197
3,0	109,743	0,499340	0,501	1,660
3,5	110,246	0,500182	0,503	2,818
4,0	110,735	0,499627	0,489	-10,627
4,5	111,250	0,500239	0,515	14,761
5,0	111,742	0,500166	0,492	-8,166
5,5	112,240	0,499264	0,498	-1,264
6,0	112,734	0,500145	0,494	-6,145
6,5	113,234	0,499721	0,500	0,279
7,0	113,736	0,499733	0,502	2,267
7,5	114,233	0,500170	0,497	-3,170
8,0	114,727	0,499438	0,494	-5,438
8,5	115,227	0,500196	0,500	-0,196
9,0	115,726	0,499535	0,499	-0,535
9,5	116,226	0,500393	0,500	-0,393
10,0	116,725	0,499652	0,499	-0,652

#### 6.2.5 DISTANCIÔMETRO DM-150 DA KERN

Onda portadora: infravermelho ( $\lambda = 0,860 \mu\text{m}$ )

Comprimento de onda de modulação fina:  $\lambda = 20,0 \text{ m}$

Precisão nominal:  $\pm(5 \text{ mm} + 2 \text{ ppm})$

Alcance médio: 2000 m

Proprietário: Manfra e Cia. Ltda. - Curitiba.

TABELA 17 - Distâncias obtidas com 03 espelhos - DM-150

* CALIBRAÇÃO DE IMED - DETERMINAÇÃO DO ERRO CÍCLICO *				
MED= DM-150 (KERN) (MANFRA)		$\lambda/2= 10,0$ metros		
Onda portadora= I.V.		Temperatura= $24,2^{\circ}\text{C}$		
Pressão atmosférica= 687 mm Hg		Data= 15-02-91		
***** DISTANCIAS COM TRES ESPELHOS *****				
Ponto Visado	Distância Medida (m)	Deslocamento Refletor (m)	$D_{i+1} - D_i$	$D_{i+1} - D_i - d_i$
0 (m)	61,561	-	-	-
0,5	62,059	0,499488	0,498	-1,488
1,0	62,560	0,499938	0,501	1,062
1,5	63,060	0,499560	0,500	0,440
2,0	63,558	0,499980	0,498	-1,980
2,5	64,060	0,500803	0,502	1,197
3,0	64,560	0,499340	0,500	0,660
3,5	65,058	0,500182	0,498	-2,182
4,0	65,557	0,499627	0,499	-0,627
4,5	66,058	0,500239	0,501	0,834
5,0	66,557	0,500166	0,499	-1,166
5,5	67,057	0,499264	0,500	0,736
6,0	67,558	0,500145	0,501	0,855
6,5	68,057	0,499721	0,499	-0,721
7,0	68,558	0,499733	0,501	1,267
7,5	69,059	0,500170	0,501	0,830
8,0	69,558	0,499438	0,499	-0,438
8,5	70,059	0,500196	0,501	0,804
9,0	70,558	0,499535	0,499	-0,535
9,5	71,059	0,500393	0,501	0,607
10,0	71,559	0,499652	0,500	0,348

TABELA 18 - Distâncias obtidas com 05 espelhos - DM-150

* CALIBRAÇÃO DE IMED - DETERMINAÇÃO DO ERRO CÍCLICO *				
MED= DM-150 (KERN) (MANFRA)		$\lambda/2= 10,0$ metros		
Onda portadora= I.V.		Temperatura= $24,2^{\circ}\text{C}$		
Pressão atmosférica= 687 mm Hg		Data= 15-02-91		
***** DISTANCIAS COM CINCO ESPELHOS *****				
Ponto Visado	Distância Medida (m)	Deslocamento Refletor (m)	$D_{i+1} - D_i$	$D_{i+1} - D_i - d_i$
0 (m)	106,759	-	-	-
0,5	107,263	0,499488	0,504	4,512
1,0	107,763	0,499938	0,500	0,062
1,5	108,262	0,499560	0,499	-0,560
2,0	108,763	0,499980	0,501	1,020
2,5	109,263	0,500803	0,500	-0,803
3,0	109,761	0,499340	0,498	-1,340
3,5	110,263	0,500182	0,502	1,818
4,0	110,765	0,499627	0,502	2,373
4,5	111,264	0,500239	0,499	-1,239
5,0	111,764	0,500166	0,500	-0,166
5,5	112,264	0,499264	0,500	0,736
6,0	112,763	0,500145	0,499	-1,145
6,5	113,261	0,499721	0,498	-1,721
7,0	113,761	0,499733	0,500	0,267
7,5	114,260	0,500170	0,499	-1,170
8,0	114,759	0,499438	0,499	-0,438
8,5	115,259	0,500196	0,500	-0,196
9,0	115,759	0,499535	0,500	0,465
9,5	116,260	0,500393	0,501	0,607
10,0	116,757	0,499652	0,497	-2,652

**6.2.6 DISTANCIÔMETRO DM-102 DA KERN**

Onda portadora: infravermelho ( $\lambda = 0,860 \mu\text{m}$ )

Comprimento de onda de modulação fina:  $\lambda = 20,0 \text{ m}$

Precisão nominal:  $\pm(5 \text{ mm} + 5 \text{ ppm})$

Alcance médio: 1700 m

Proprietário: Manfra e Cia Ltda. - Curitiba.

TABELA 19 - Distâncias obtidas com 03 espelhos - DM-102

* CALIBRAÇÃO DE IMED - DETERMINAÇÃO DO ERRO CÍCLICO *				
MED= DM-102 (KERN) (MANFRA)		$\lambda/2= 10,0$ metros		
Onda portadora= I. V.		Temperatura= $24,2^{\circ}\text{C}$		
Pressão atmosférica= 685 mm Hg		Data= 18-02-91		
***** DISTANCIAS COM TRÊS ESPELHOS *****				
Ponto Visado	Distância Medida (m)	Deslocamento Refletor (m)	$D_{i+1} - D_i$	$D_{i+1} - D_i - d_i$
0 (m)	61,574	-	-	-
0,5	62,072	0,499488	0,498	-1,488
1,0	62,572	0,499938	0,500	0,062
1,5	63,072	0,499560	0,500	0,440
2,0	63,572	0,499980	0,500	0,020
2,5	64,072	0,500803	0,500	-0,803
3,0	64,570	0,499340	0,498	-1,340
3,5	65,074	0,500182	0,504	3,818
4,0	65,570	0,499627	0,496	-3,627
4,5	66,071	0,500239	0,501	0,761
5,0	66,570	0,500166	0,499	-1,166
5,5	67,071	0,499264	0,501	1,736
6,0	67,571	0,500145	0,500	-0,145
6,5	68,072	0,499721	0,501	1,279
7,0	68,574	0,499733	0,502	2,267
7,5	69,073	0,500170	0,499	-1,170
8,0	69,575	0,499438	0,502	2,562
8,5	70,076	0,500196	0,501	0,804
9,0	70,576	0,499535	0,500	0,465
9,5	71,077	0,500393	0,501	0,607
10,0	71,574	0,499652	0,497	-2,652

TABELA 20 - Distâncias obtidas com 05 espelhos - DM-102

* CALIBRAÇÃO DE IMED - DETERMINAÇÃO DO ERRO CÍCLICO *				
MED= DM-102 (KERN) (MANFRA)		$\lambda/2= 10,0$ metros		
Onda portadora= I.V.		Temperatura= $24,0^{\circ}\text{C}$		
Pressão atmosférica= 685 mm Hg		Data= 18-02-91		
***** DISTANCIAS COM CINCO ESPELHOS *****				
Ponto Visado	Distância Medida (m)	Deslocamento Refletor (m)	$D_{i+1} - D_i$	$D_{i+1} - D_i - d_i$
0 (m)	106,764	-	-	-
0,5	107,263	0,499488	0,499	-0,488
1,0	107,763	0,499938	0,500	0,062
1,5	108,263	0,499560	0,500	0,440
2,0	108,765	0,499980	0,502	2,020
2,5	109,268	0,500803	0,503	2,197
3,0	109,770	0,499340	0,502	2,660
3,5	110,270	0,500182	0,500	-0,182
4,0	110,772	0,499627	0,502	2,373
4,5	111,273	0,500239	0,501	0,761
5,0	111,772	0,500166	0,499	-1,166
5,5	112,272	0,499264	0,500	0,736
6,0	112,773	0,500145	0,501	0,855
6,5	113,272	0,499721	0,499	-0,721
7,0	113,769	0,499733	0,497	-2,733
7,5	114,268	0,500170	0,499	-1,170
8,0	114,764	0,499438	0,496	-3,438
8,5	115,265	0,500196	0,501	0,804
9,0	115,762	0,499535	0,497	-2,535
9,5	116,260	0,500393	0,498	-2,393
10,0	116,760	0,499652	0,500	0,348



### 6.3 RESULTADOS DOS AJUSTAMENTOS

Para a determinação dos elementos do erro cíclico - amplitude (A) e fase (B) - foi realizado um ajustamento das observações obtidas para cada instrumento, utilizando-se o método paramétrico com iterações. Durante o processo de medição, foram obtidos dois conjuntos de observações para cada instrumento, referentes a utilização de três e cinco espelhos. Um dos instrumentos possibilitou a obtenção de quatro conjuntos de observações, sendo dois conjuntos referentes a utilização de espelhos normais e dois conjuntos referentes a utilização de espelhos frontais (espelhamento na face anterior). Com isso totalizaram-se quatorze testes realizados e ajustados.

#### A) MODELO MATEMÁTICO

O modelo matemático utilizado, foi apresentado no capítulo 4, seção 4.4, equação (4.4.4) que reescrevemos aqui:

$$E_i = P_i \cdot X + Q_i \cdot Y$$

onde:

$$X = A \cdot \cos(\phi)$$

$$Y = A \cdot \sin(\phi)$$

$$P_i = \sin(2\pi/\lambda' \cdot d_i)$$

$$Q_i = \cos(2\pi/\lambda' \cdot d_i)$$

$E_i$  = erro cíclico juntamente com outros erros de natureza aleatória;

Então, podemos escrever:

$$E_i = E_c + v_i = V_i = P_i \cdot X + Q_i \cdot Y \quad \Rightarrow \quad L_a = F(X_a)$$

que é o modelo paramétrico.

$$E_i = (D_{i+1} - D_i) - d_i \quad (6.3.1)$$

onde:

$D_{i+1}$ ,  $D_i$  = são as distâncias observadas conforme descritas na seção 4.4;

$d_i$  = deslocamentos do refletor ao longo do trilho, cujos valores foram calibrados;

X e Y são os parâmetros.

#### B) EQUAÇÕES DE OBSERVAÇÃO

Foram obtidas vinte equações de observação do tipo (6.3.1) para cada teste efetuado. A solução proposta pelo método paramétrico é:

$$X = -(A^T P A)^{-1} A^T P L$$

onde:

X = vetor (2x1) das correções aos valores aproximados dos parâmetros;

A = matriz (2x20) dos coeficientes das incógnitas:

$$A = \begin{vmatrix} P_1 & P_1 \\ P_2 & Q_2 \\ \vdots & \vdots \\ P_n & Q_n \end{vmatrix} \quad \text{com } n = 1, 2, \dots, 20$$

$P_1, P_2, \dots, P_n$  e  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$  são calculados pelas expressões (4.4.5).

P = matriz dos pesos. Neste trabalho foram considerados pesos iguais para todas as observações, tendo em vista que as medições foram realizadas nas mesmas condições. Assim, a matriz dos pesos é uma matriz

identidade:  $P = I$ .

$$L = L_o - L_b \qquad L_o = F(X_o)$$

$L_b$  = vetor (20x1) dos valores observados;

$X_o$  = vetor (2x1) cujas componentes são os valores aproximados dos parâmetros;

$X_a = X_o + X \quad ==>$  vetor (2x1) dos parâmetros ajustados.

Os parâmetros ajustados ( X,Y) propiciam o cálculo da amplitude e fase do erro cíclico:

$$A^2 = X^2 + Y^2 \quad ==> \text{amplitude}$$

$$\phi = \text{arc tg } \frac{Y}{X} \quad ==> \text{ângulo de fase}$$

$B = (\phi \cdot \lambda') / 2\pi \quad ==>$  ângulo de fase em unidades lineares.

Os valores medidos e os erros observados em cada teste, estão relacionados nas tabelas 07 a 20.

### C) RESULTADOS DOS AJUSTAMENTOS

#### 1) DM-S3L (TOPCON)

Amplitude: 0,079 mm

Fase : 3,224 m

Erro cíclico obtido com três espelhos normais:

$d_i$	$E_i$	$d_i$	$E_i$
0,5	0,057	5,5	-0,057
1,0	0,037	6,0	-0,037
1,5	0,014	6,5	-0,014
2,0	-0,011	7,0	0,011
2,5	-0,035	7,5	0,035
3,0	-0,055	8,0	0,055
3,5	-0,070	8,5	0,070
4,0	-0,078	9,0	0,078
4,5	-0,078	9,5	0,078
5,0	-0,071	10,0	0,071

Curva observada x Curva ajustada (figura 19)

#### 2) DM-S3L (TOPCON)

Amplitude: 0,055 mm

Fase : 3,028 m

Erro cíclico obtido com cinco espelhos normais:

$d_i$	$E_i$	$d_i$	$E_i$
0,5	0,044	5,5	-0,044
1,0	0,032	6,0	-0,032
1,5	0,016	6,5	-0,016
2,0	-0,001	7,0	0,001
2,5	-0,018	7,5	0,018
3,0	-0,033	8,0	0,033
3,5	-0,045	8,5	0,045
4,0	-0,053	9,0	0,053
4,5	-0,055	9,5	0,055
5,0	-0,052	10,0	0,052

Curva observada x curva ajustada (figura 20)

Figura 19 - Curva observada x curva ajustada - DM-S3L

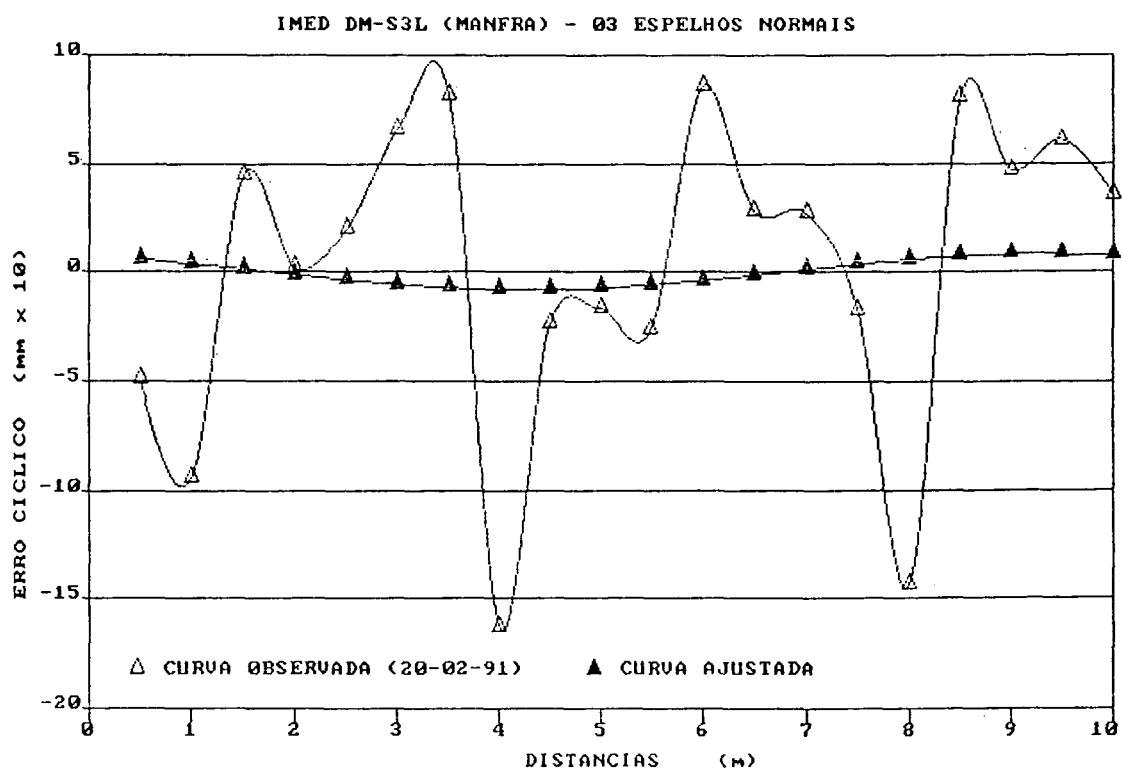
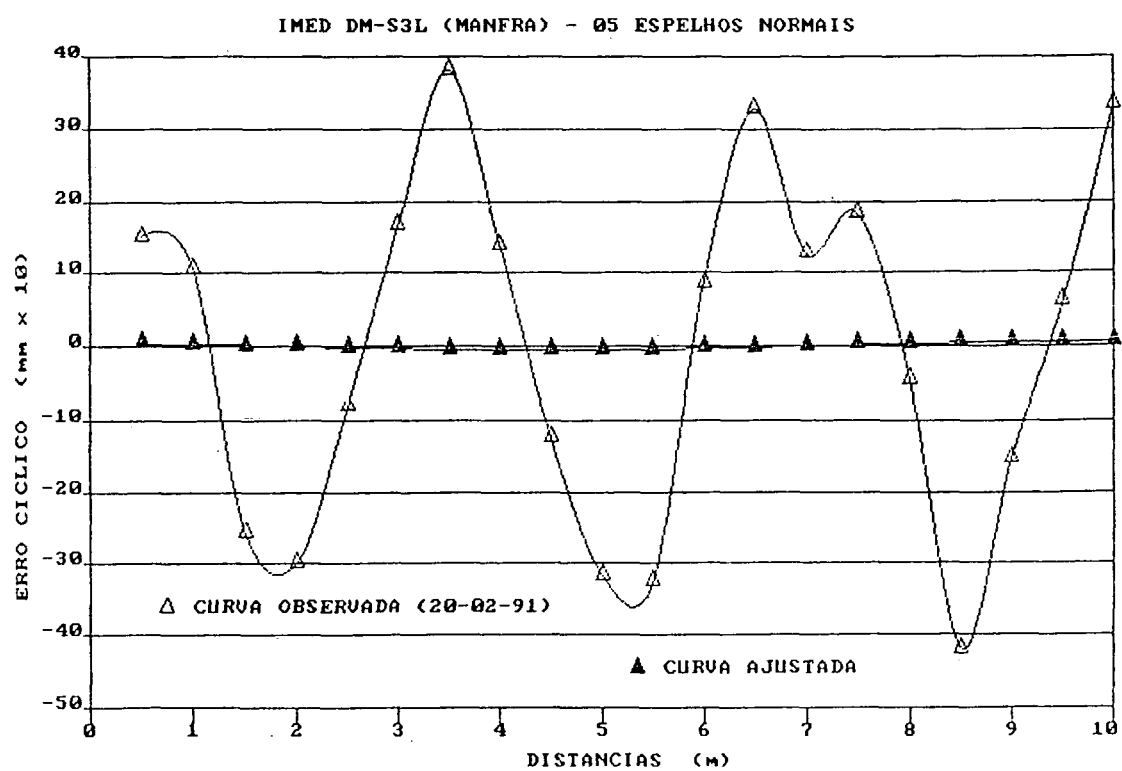


Figura 20 - Curva observada x curva ajustada - DM-S3L



## 3) DM-S3L (TOPCON)

Amplitude: 0,050 mm

Fase : 11,465 m

Erro cíclico obtido com três espelhos frontais:

$d_i$	$E_i$	$d_i$	$E_i$
0,5	-0,047	5,5	0,047
1,0	-0,050	6,0	0,050
1,5	-0,048	6,5	0,048
2,0	-0,041	7,0	0,041
2,5	-0,030	7,5	0,030
3,0	-0,017	8,0	0,017
3,5	-0,001	8,5	0,001
4,0	0,014	9,0	-0,014
4,5	0,028	9,5	-0,028
5,0	0,040	10,0	-0,040

Curva observada x curva ajustada (figura 21)

## 4) DM-S3L (TOPCON)

Amplitude: 0,111 mm

Fase : 2,745 m

Erro cíclico obtido com cinco espelhos frontais:

$d_i$	$E_i$	$d_i$	$E_i$
0,5	0,099	5,5	-0,099
1,0	0,079	6,0	-0,079
1,5	0,051	6,5	-0,051
2,0	0,018	7,0	-0,018
2,5	-0,017	7,5	0,017
3,0	-0,050	8,0	0,050
3,5	-0,078	8,5	0,078
4,0	-0,099	9,0	0,099
4,5	-0,110	9,5	0,110
5,0	-0,110	10,0	0,110

Curva observada x curva ajustada (figura 22)

Figura 21 - Curva observada x curva ajustada - DM-S3L

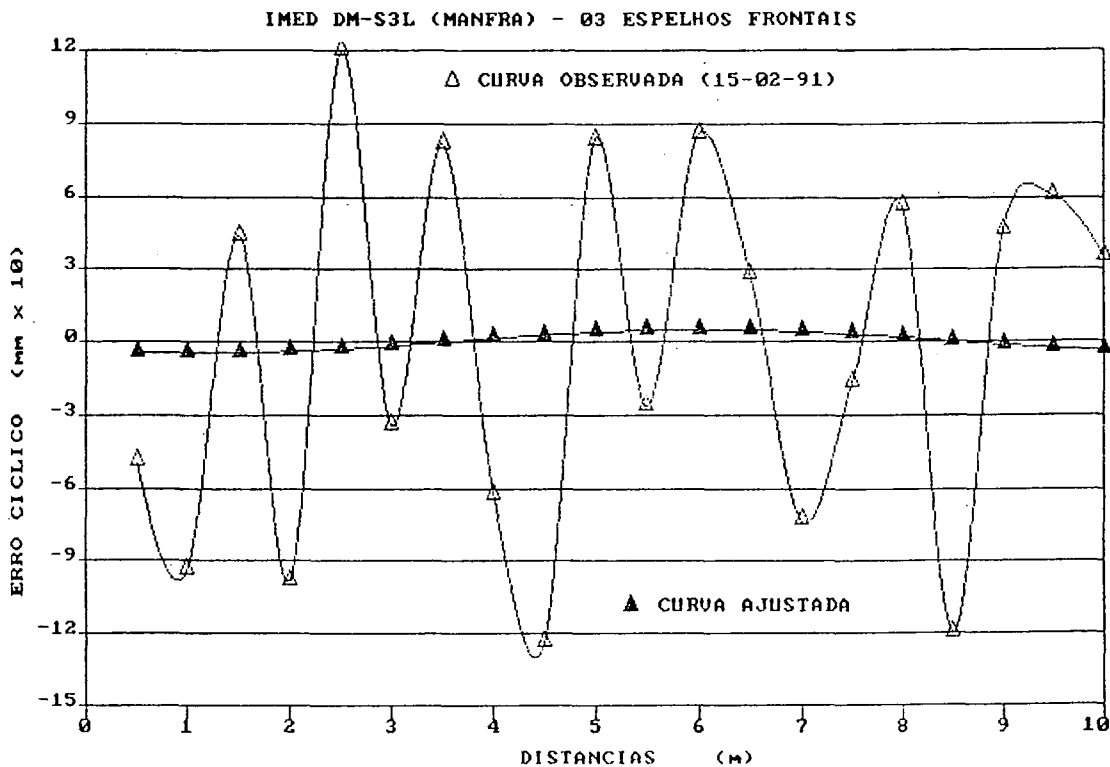
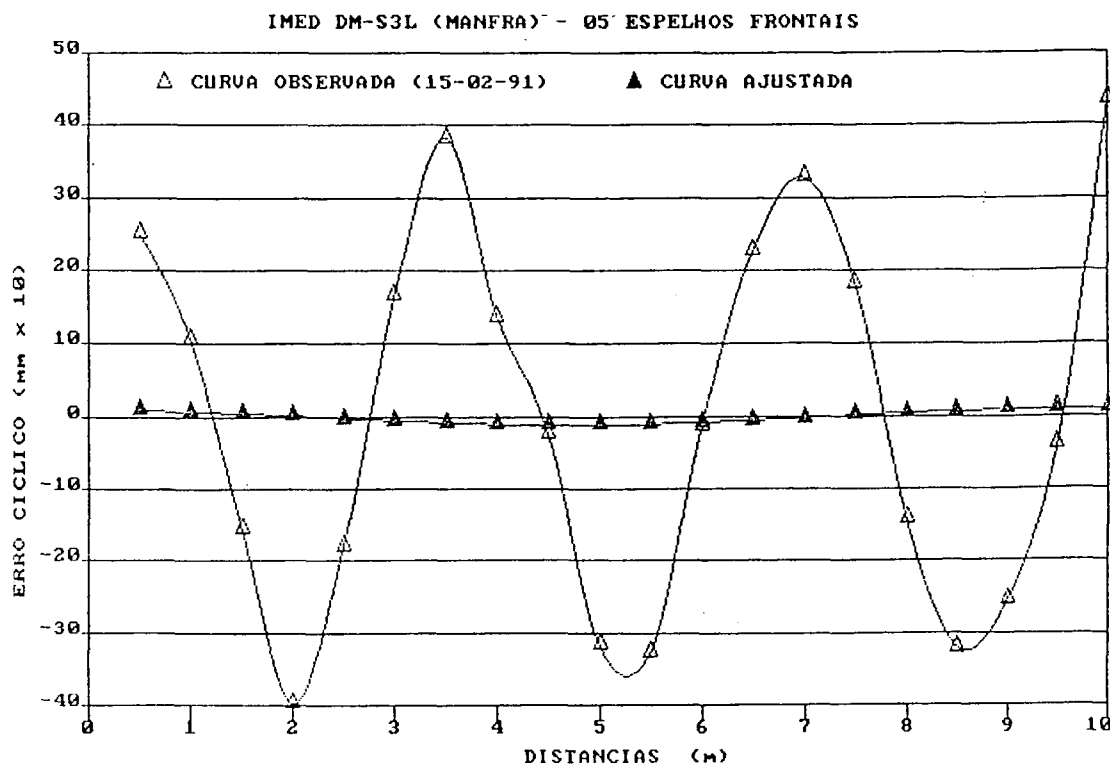


Figura 22 - Curva observada x curva ajustada - DM-S3L



## 5) DM-102 (KERN)

Amplitude: 0,756 mm

Fase : 10,645 m

Erro cíclico obtido com três espelhos normais:

$d_i$	$E_i$	$d_i$	$E_i$
0,5	-0,498	5,5	0,498
1,0	-0,650	6,0	0,650
1,5	-0,737	6,5	0,737
2,0	-0,753	7,0	0,753
2,5	-0,695	7,5	0,695
3,0	-0,569	8,0	0,569
3,5	-0,387	8,5	0,388
4,0	-0,168	9,0	0,168
4,5	0,069	9,5	-0,068
5,0	0,298	10,0	-0,297

Curva observada x curva ajustada (figura 23)

## 6) DM-102 (KERN)

Amplitude: 1,802 mm

Fase : 9,422 m

Erro cíclico obtido com cinco espelhos normais:

$d_i$	$E_i$	$d_i$	$E_i$
0,5	-0,089	5,5	0,090
1,0	0,472	6,0	-0,471
1,5	0,986	6,5	-0,985
2,0	1,404	7,0	-1,403
2,5	1,685	7,5	-1,684
3,0	1,800	8,0	-1,800
3,5	1,739	8,5	-1,740
4,0	1,509	9,0	-1,510
4,5	1,130	9,5	-1,131
5,0	0,641	10,0	-0,643

Curva observada x curva ajustada (figura 24)



Figura 23 - Curva observada x curva ajustada - DM-102

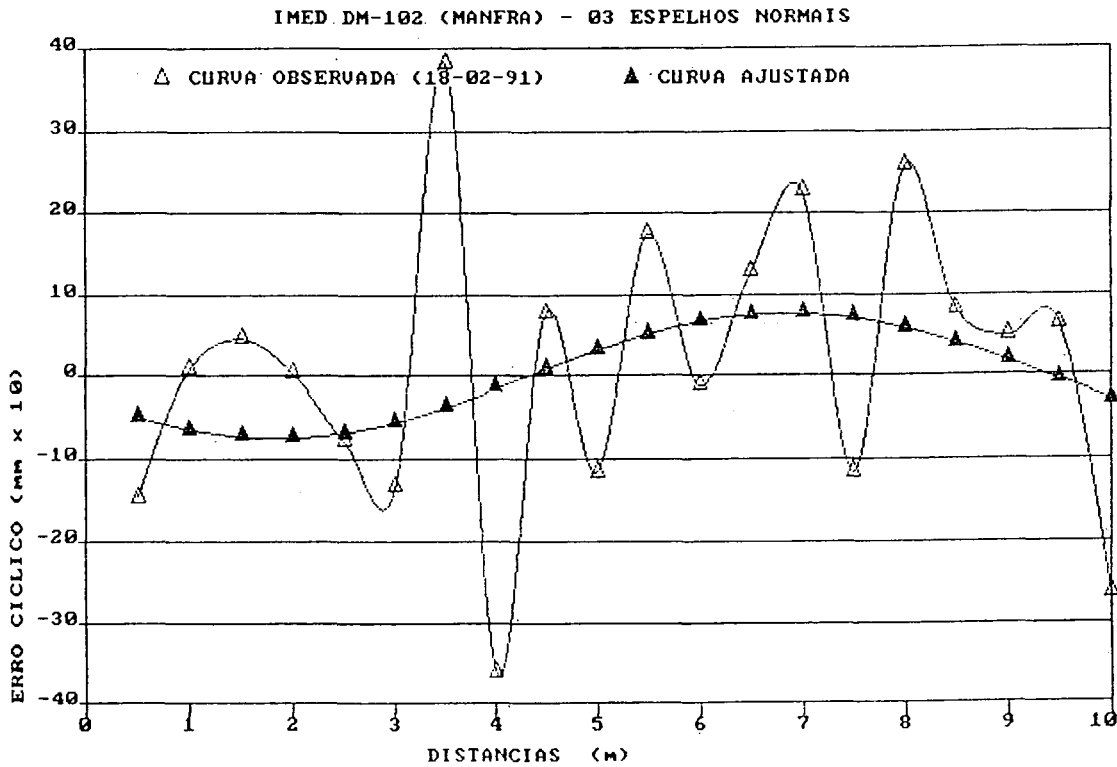
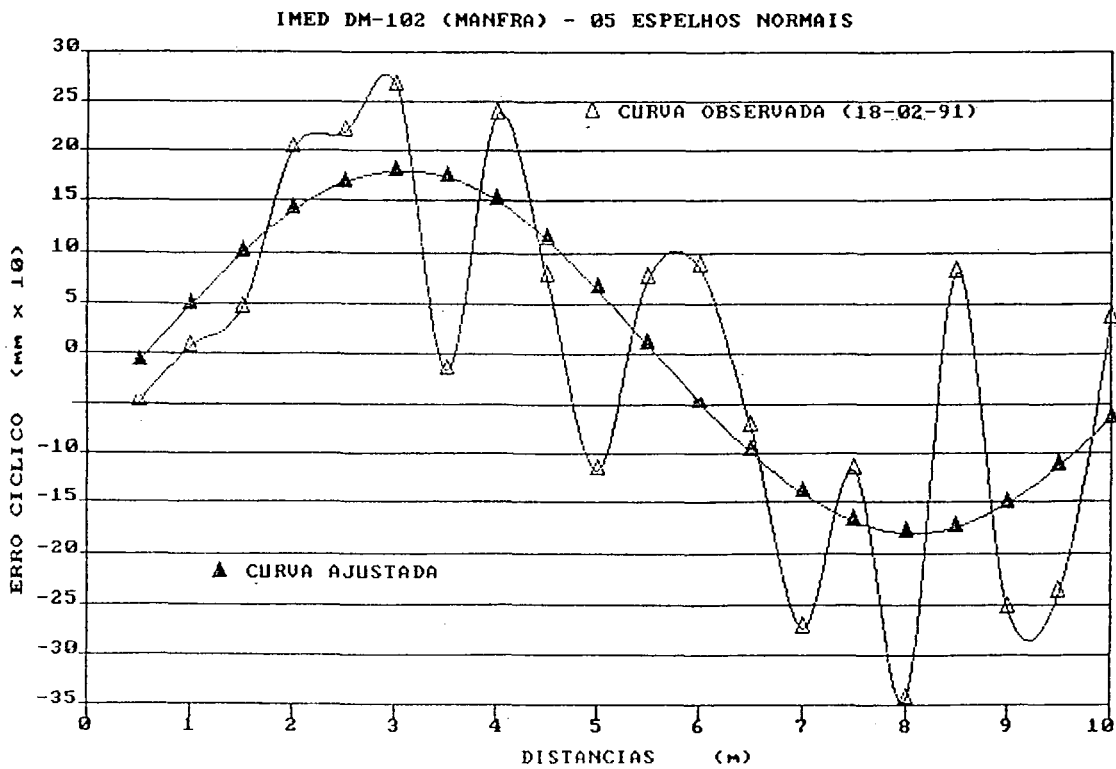


Figura 24 - Curva observada x curva ajustada - DM-102



## 7) DM-150 (KERN)

Amplitude: 0,377 mm

Fase : 4,752 m

Erro cíclico obtido com três espelhos normais:

$d_i$	$E_i$	$d_i$	$E_i$
0,5	-0,059	5,5	0,059
1,0	-0,171	6,0	0,171
1,5	-0,267	6,5	0,267
2,0	-0,336	7,0	0,336
2,5	-0,372	7,5	0,372
3,0	-0,372	8,0	0,372
3,5	-0,236	8,5	0,236
4,0	-0,267	9,0	0,267
4,5	-0,171	9,5	0,171
5,0	-0,059	10,0	0,059

Curva observada x curva ajustada (figura 25)

## 8) DM-150 (KERN)

Amplitude: 0,571 mm

Fase : 0,663 m

Erro cíclico obtido com cinco espelhos normais:

$d_i$	$E_i$	$d_i$	$E_i$
0,5	0,381	5,5	-0,381
1,0	0,494	6,0	-0,494
1,5	0,558	6,5	-0,558
2,0	0,568	7,0	-0,568
2,5	0,522	7,5	-0,522
3,0	0,426	8,0	-0,426
3,5	0,287	8,5	-0,287
4,0	0,121	9,0	-0,121
4,5	-0,058	9,5	0,057
5,0	-0,231	10,0	0,230

Curva observada x curva ajustada (figura 26)

Figura 25 - Curva observada x curva ajustada - DM-150

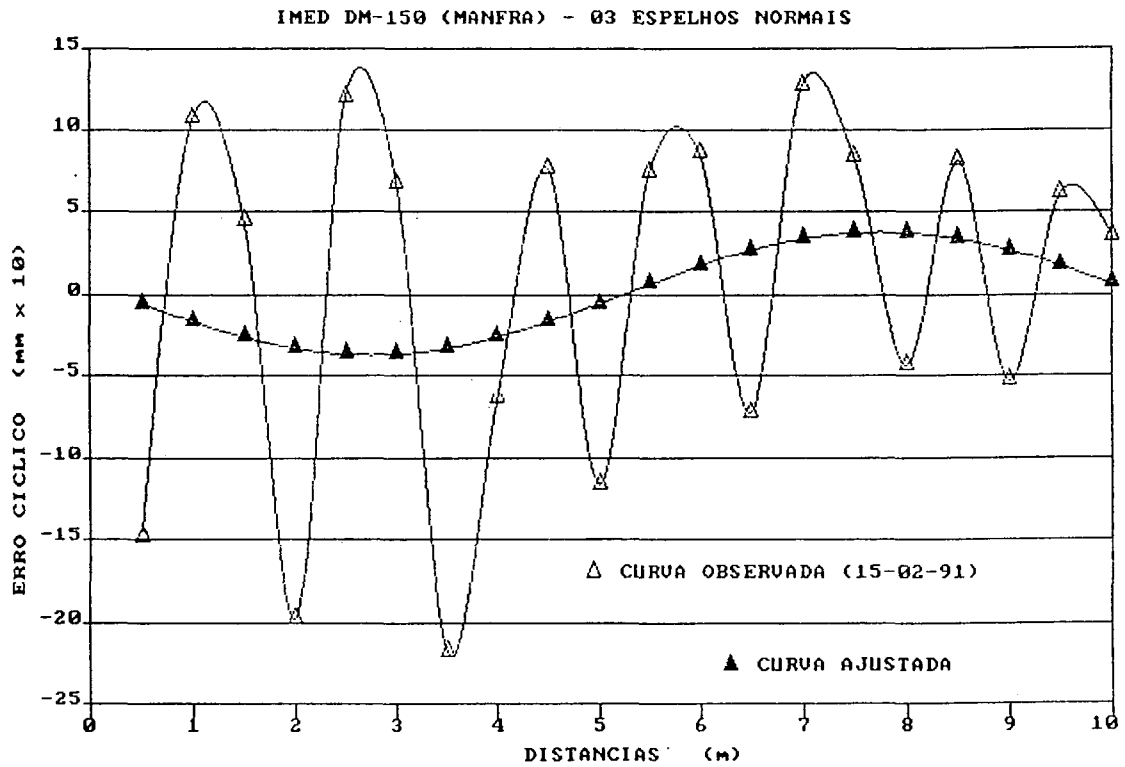
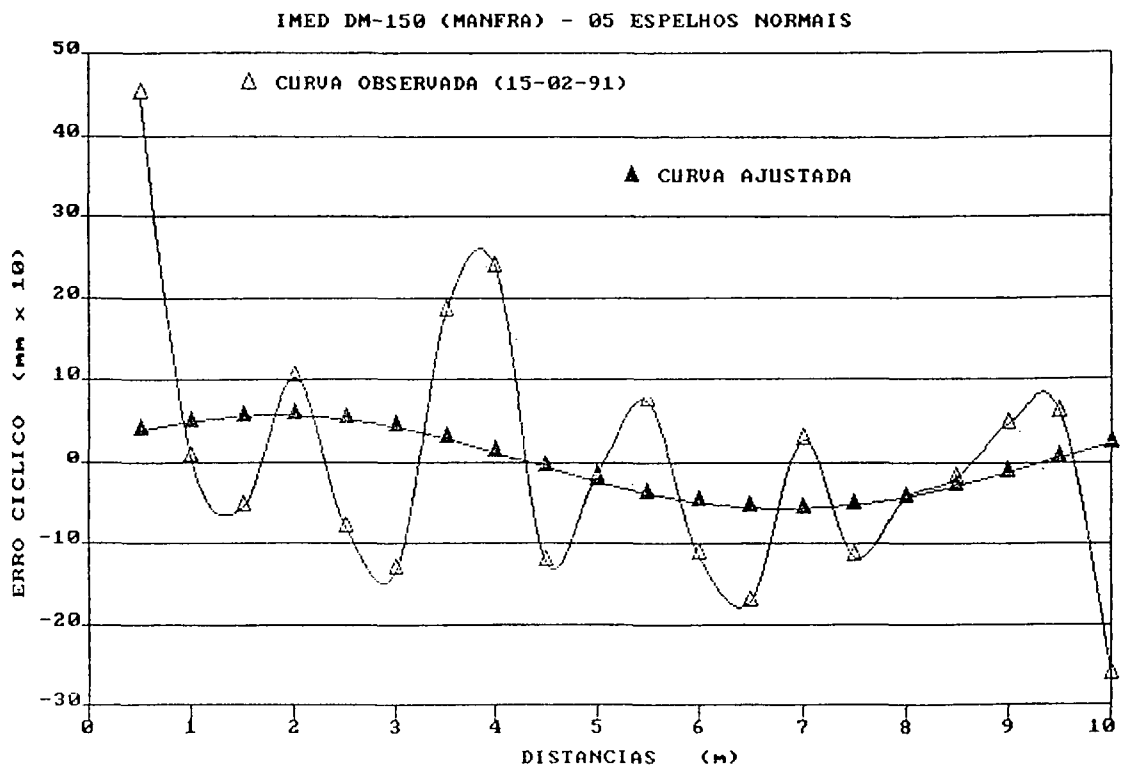


Figura 26 - Curva observada x curva ajustada - DM-150



## 9) DM-502 (KERN) (ENGEFOTO)

Amplitude: 2,399 mm

Fase : 4,228 m

Erro cíclico obtido com três espelhos normais:

$d_i$	$E_i$	$d_i$	$E_i$
0,5	0,409	5,5	-0,411
1,0	-0,341	6,0	0,340
1,5	-1,057	6,5	1,057
2,0	-1,671	7,0	1,670
2,5	-2,121	7,5	2,120
3,0	-2,363	8,0	2,363
3,5	-2,374	8,5	2,375
4,0	-2,153	9,0	2,154
4,5	-1,721	9,5	1,722
5,0	-1,120	10,0	1,122

Curva observada x curva ajustada (figura 27)

## 10) DM-502 (KERN) (ENGEFOTO)

Amplitude: 2,477 mm

Fase : 0,390 m

Erro cíclico obtido com cinco espelhos normais:

$d_i$	$E_i$	$d_i$	$E_i$
0,5	1,313	5,5	-1,311
1,0	1,897	6,0	-1,896
1,5	2,296	6,5	-2,296
2,0	2,471	7,0	-2,470
2,5	2,403	7,5	-2,403
3,0	2,101	8,0	-2,102
3,5	1,592	8,5	-1,594
4,0	0,929	9,0	-0,931
4,5	0,173	9,5	-0,175
5,0	-0,599	10,0	0,596

Curva observada x curva ajustada (figura 28)

Figura 27 - Curva observada x curva ajustada - DM-502-E

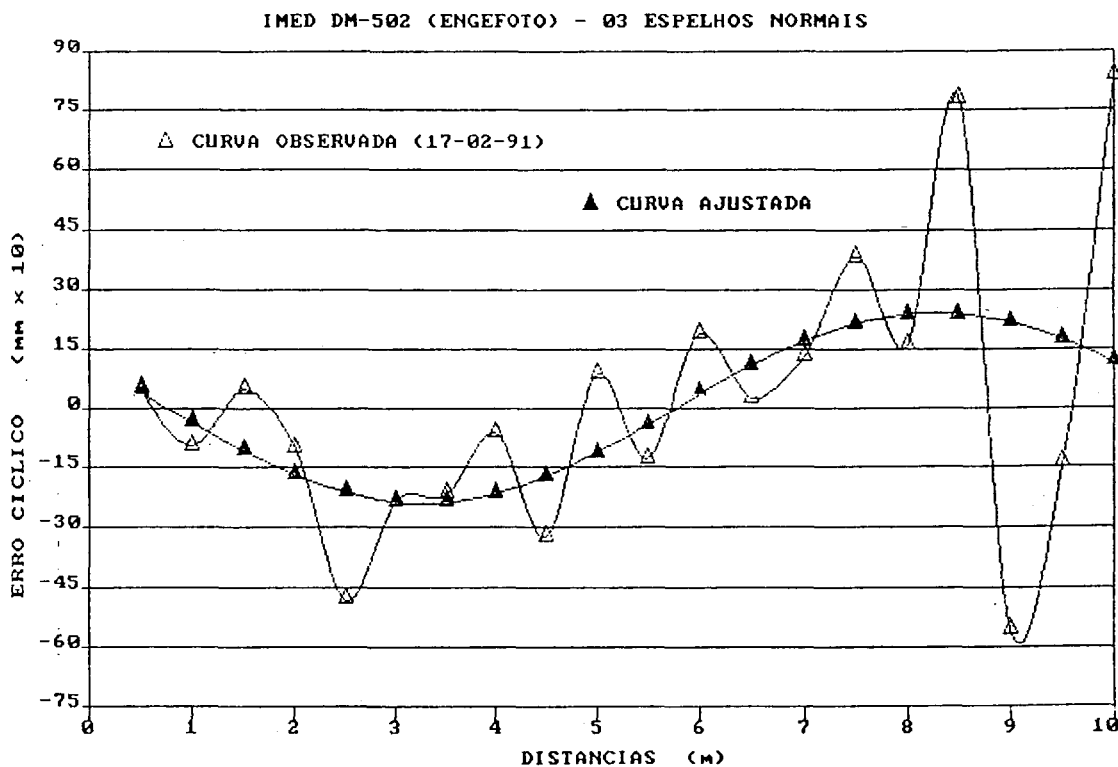
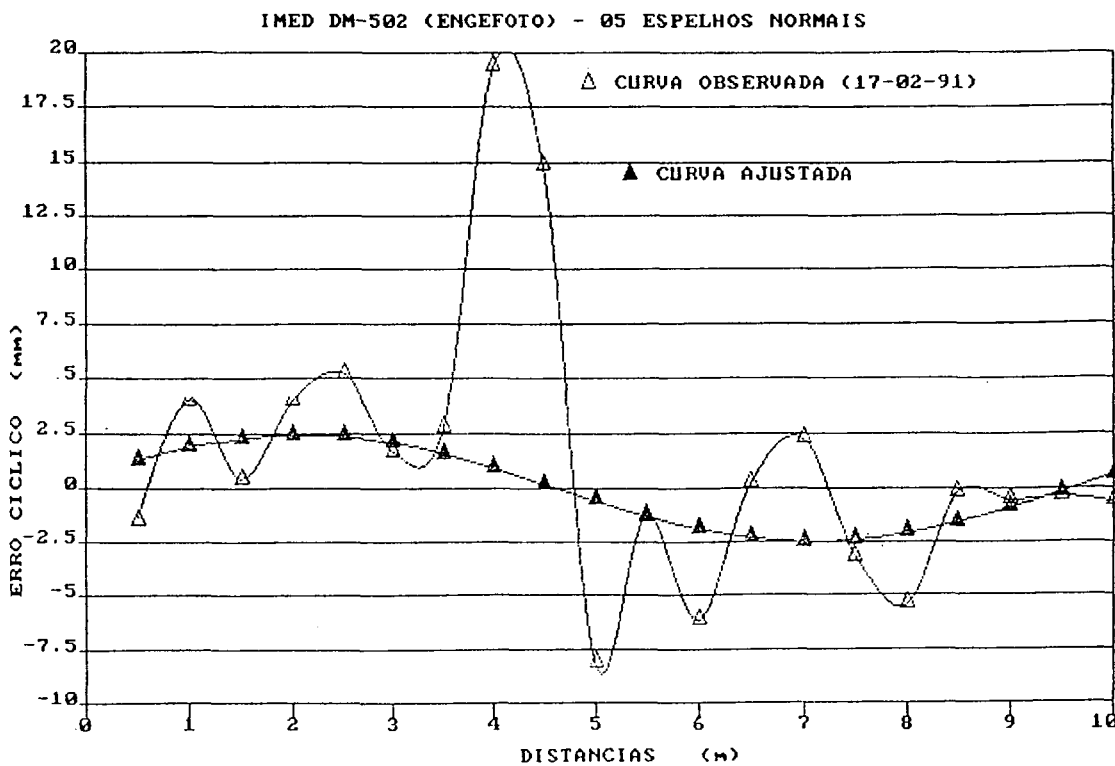


Figura 28 - Curva observada x curva ajustada - DM-502-E



## 11) DM-502 (KERN) (ITCF)

Amplitude: 0,681 mm

Fase : 10,592 m

Erro cíclico obtido com três espelhos normais:

$d_i$	$E_i$	$d_i$	$E_i$
0,5	-0,431	5,5	0,431
1,0	-0,573	6,0	0,573
1,5	-0,659	6,5	0,658
2,0	-0,680	7,0	0,680
2,5	-0,634	7,5	0,635
3,0	-0,527	8,0	0,528
3,5	-0,368	8,5	0,369
4,0	-0,173	9,0	0,174
4,5	0,039	9,5	-0,038
5,0	0,247	10,0	-0,246

Curva observada x curva ajustada (figura 29)

## 12) DM-502 (KERN) (ITCF)

Amplitude: 1,421 mm

Fase : 9,929 m

Erro cíclico obtido com cinco espelhos normais:

$d_i$	$E_i$	$d_i$	$E_i$
0,5	0,378	5,5	-0,377
1,0	0,782	6,0	-0,782
1,5	1,110	6,5	-1,110
2,0	1,330	7,0	-1,330
2,5	1,419	7,5	-1,419
3,0	1,370	8,0	-1,370
3,5	1,186	8,5	-1,187
4,0	0,887	9,0	-0,888
4,5	0,500	9,5	-0,501
5,0	0,065	10,0	-0,066

Curva observada x curva ajustada (figura 30)

Figura 29 - Curva observada x curva ajustada - DM-502-I

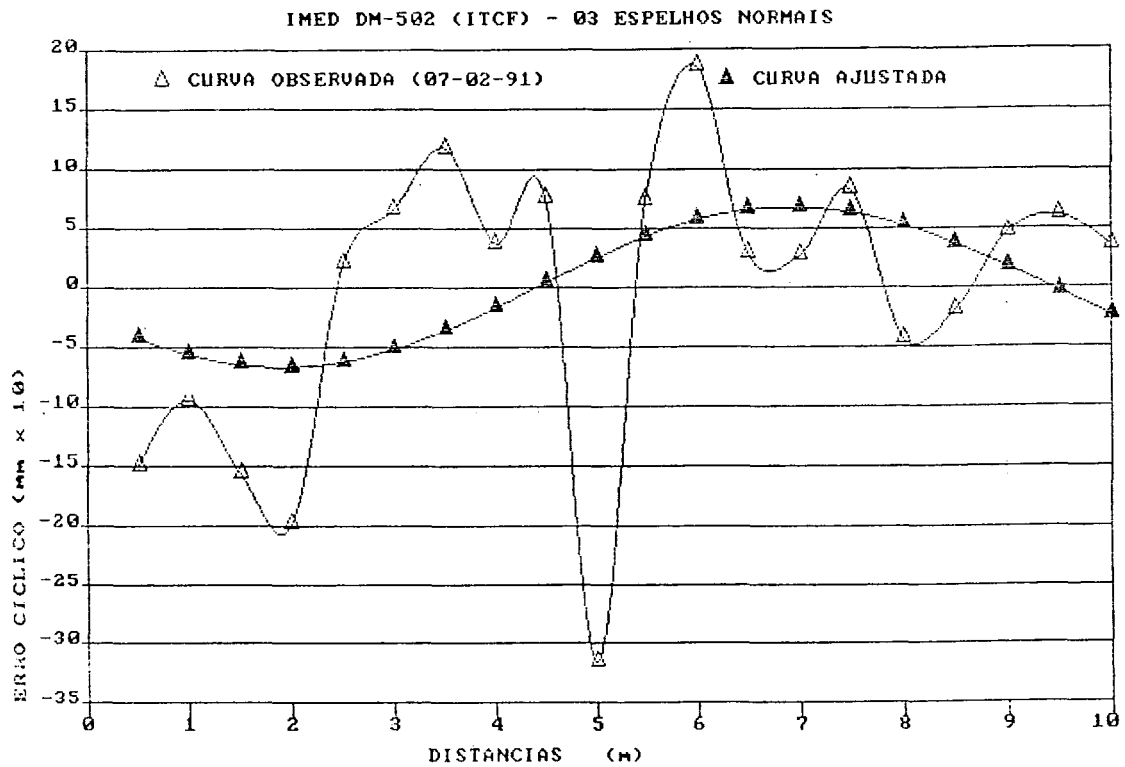
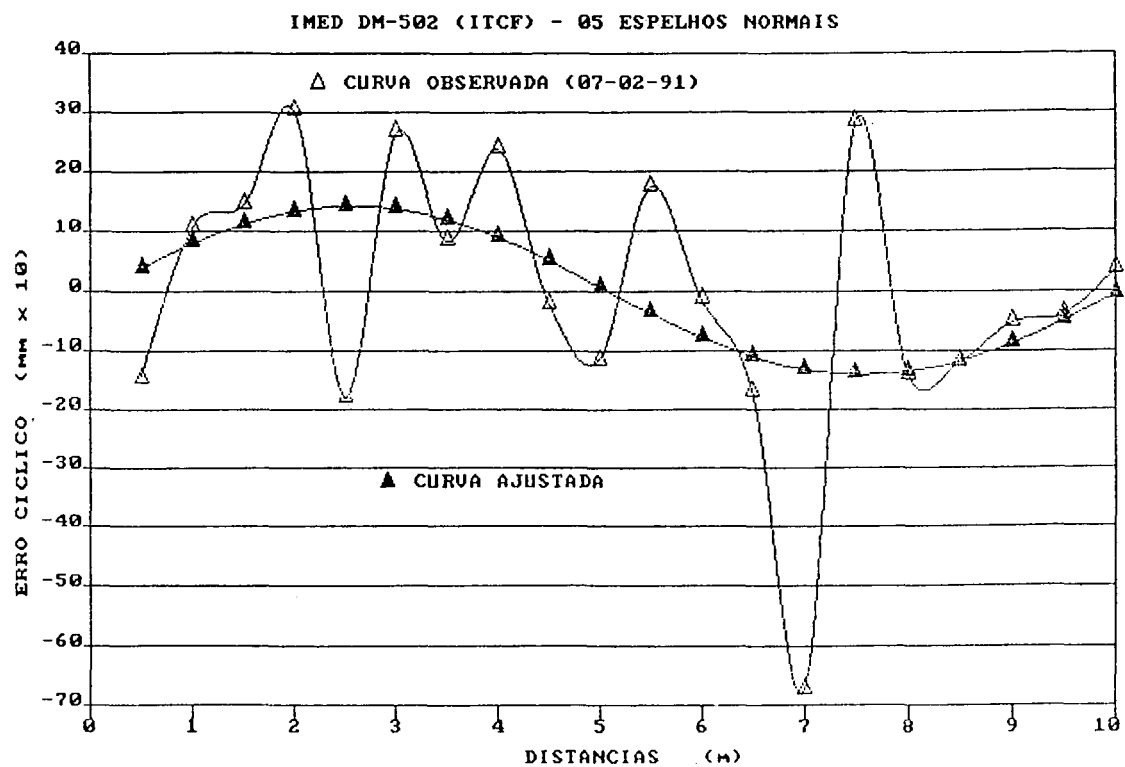


Figura 30 - Curva observada x curva ajustada - DM-502-I



## 13) DM-501 (KERN)

Amplitude: 3,215 mm

Fase : 3,763 m

Erro cíclico obtido com três espelhos normais:

$d_i$	$E_i$	$d_i$	$E_i$
0,5	1,437	5,5	-1,439
1,0	0,478	6,0	-0,480
1,5	-0,527	6,5	0,525
2,0	-1,481	7,0	1,479
2,5	-2,291	7,5	2,289
3,0	-2,875	8,0	2,874
3,5	-3,179	8,5	3,178
4,0	-3,171	9,0	3,172
4,5	-2,853	9,5	2,854
5,0	-2,256	10,0	2,258

Curva observada x curva ajustada (figura 31).

## 14) DM-501 (KERN)

Amplitude: 1,177 mm

Fase : 8,018 m

Erro cíclico obtido com cinco espelhos normais:

$d_i$	$E_i$	$d_i$	$E_i$
0,5	-0,944	5,5	0,945
1,0	-0,681	6,0	0,682
1,5	-0,352	6,5	0,352
2,0	0,013	7,0	-0,012
2,5	0,376	7,5	-0,375
3,0	0,702	8,0	-0,701
3,5	0,960	8,5	-0,959
4,0	1,123	9,0	-1,123
4,5	1,177	9,5	-1,177
5,0	1,115	10,0	-1,116

Curva observada x curva ajustada (figura 32)



Figura 31 - Curva observada x curva ajustada - DM-501

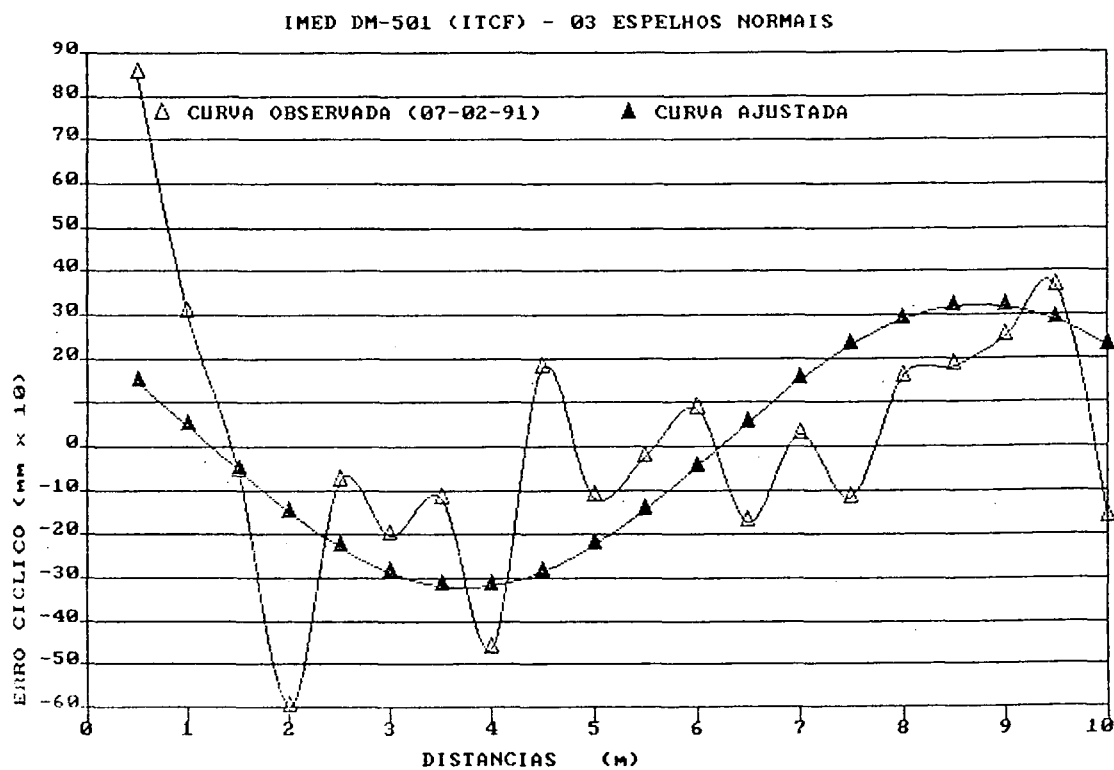
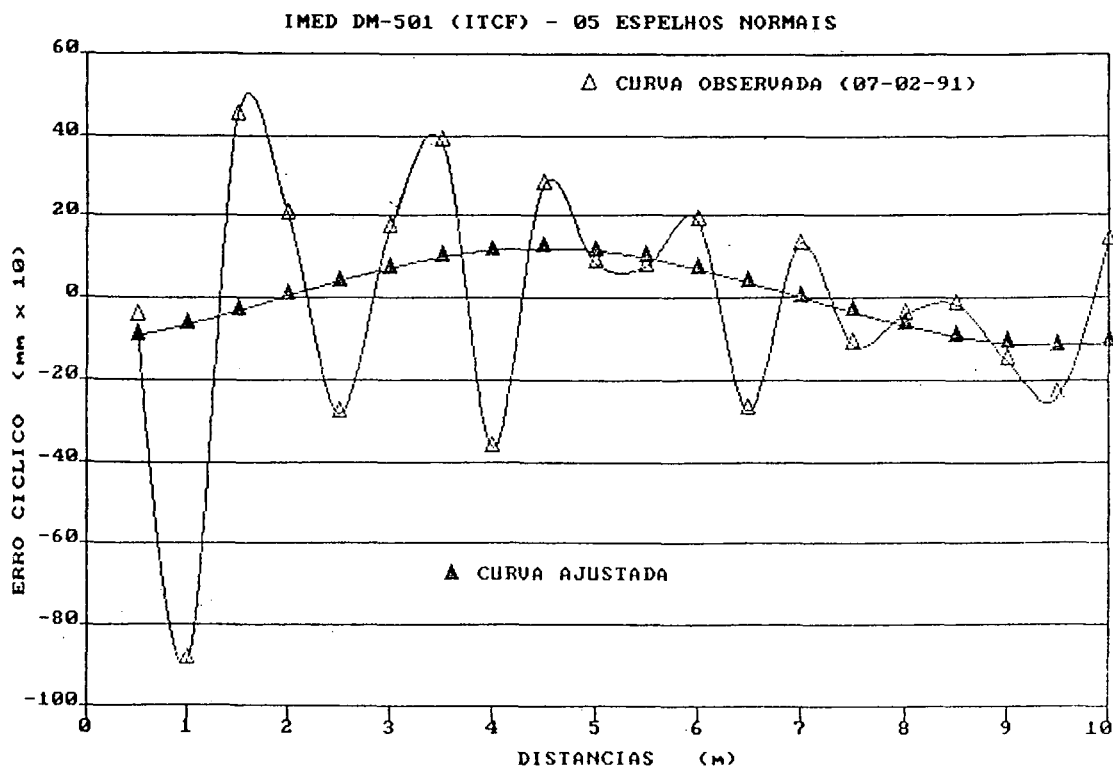


Figura 32 - Curva observada x curva ajustada - DM-501



### 6.3.1 GRÁFICOS DAS CORREÇÕES DEVIDO AO ERRO CÍCLICO

Os gráficos a seguir destinam-se a obtenção das correções a serem introduzidas às distâncias observadas, devido ao erro cíclico.

Procedimento para obtenção das correções:

- a) Entrar no gráfico com o valor da distância, apenas relativo ao metro;
- b) Efetuar interpolação simples, obtendo o valor da correção;
- c) O valor encontrado deverá ser acrescentado à distância com o SINAL TROCADO.

Figura 33 - Curva calibrada do erro cíclico - DM-S3L-

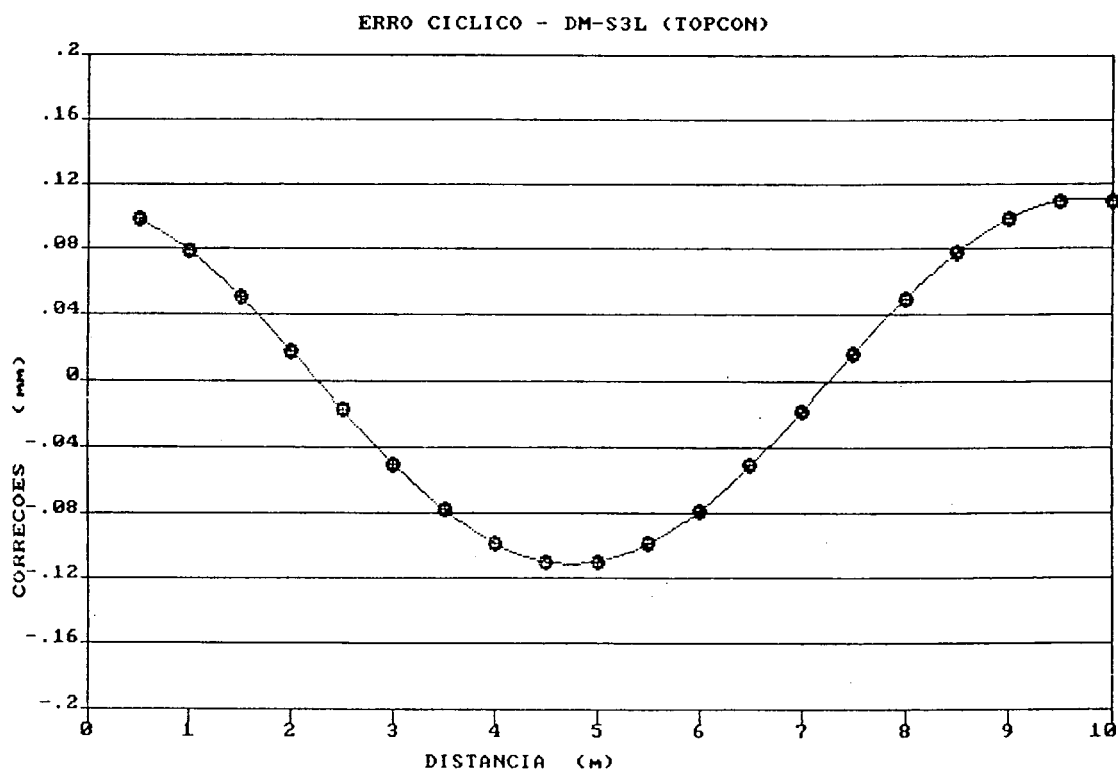


Figura 34 - Curva calibrada do erro cíclico - DM-102

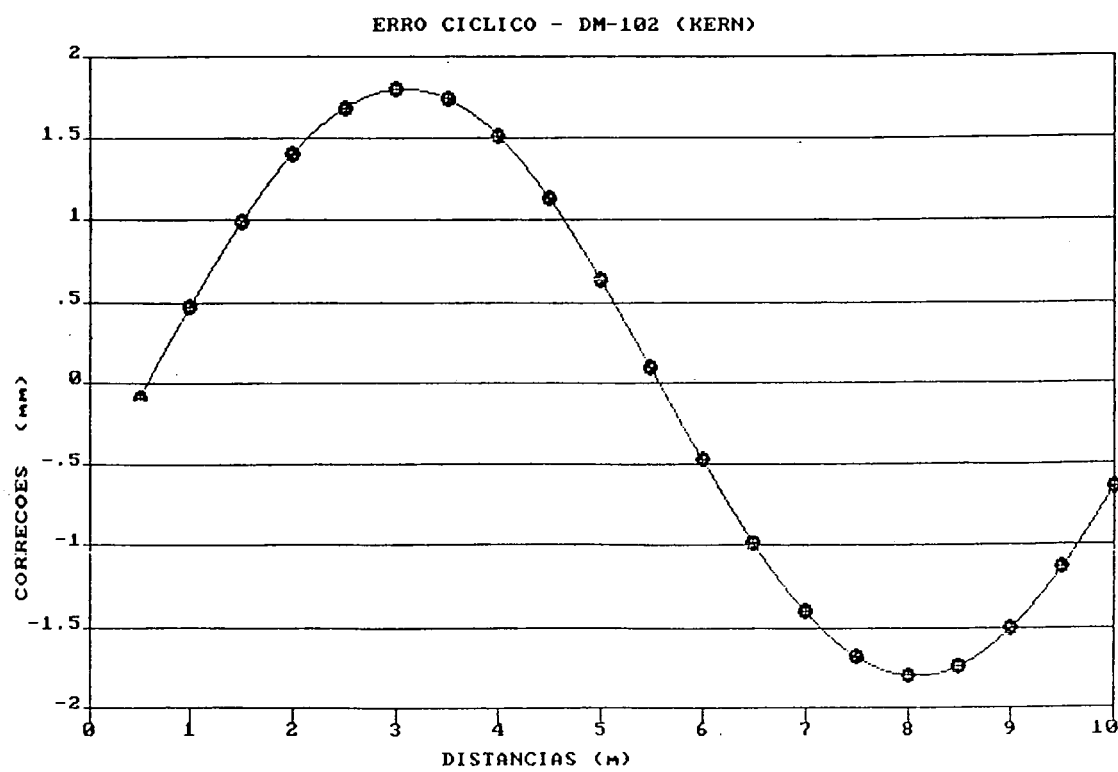


Figura 35 - Curva calibrada do erro cíclico - DM-150

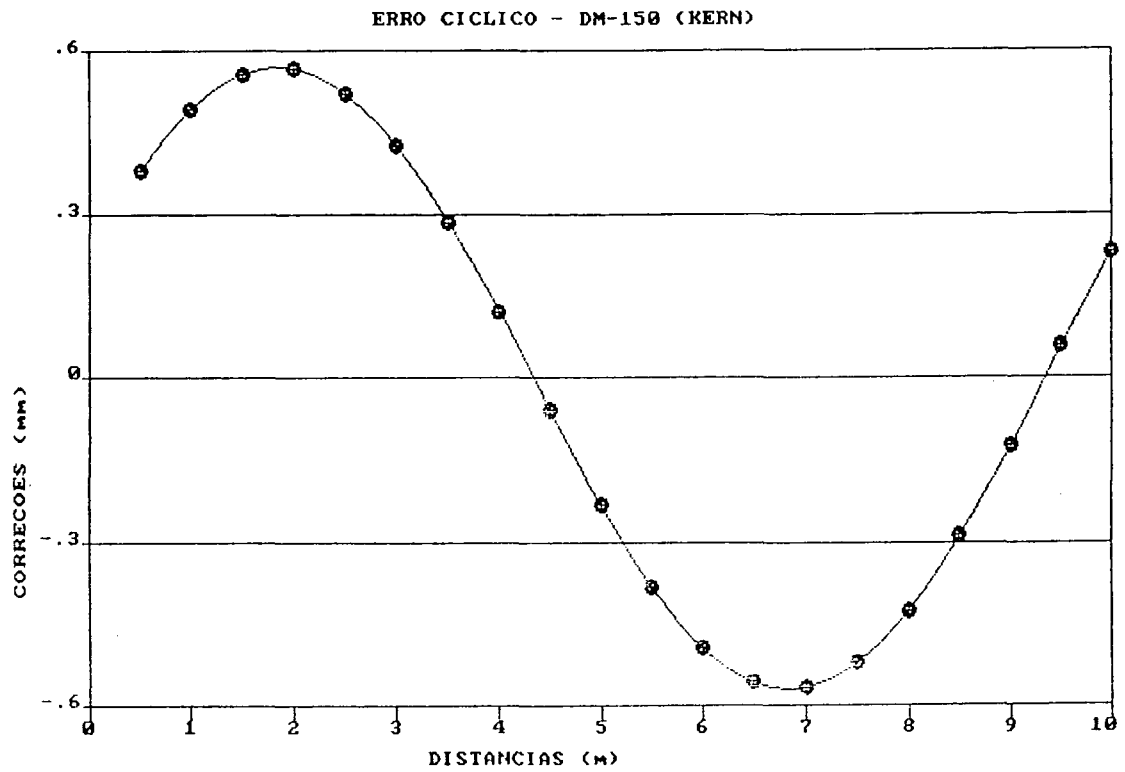


Figura 36 - Curva calibrada do erro cíclico - DM-502-E

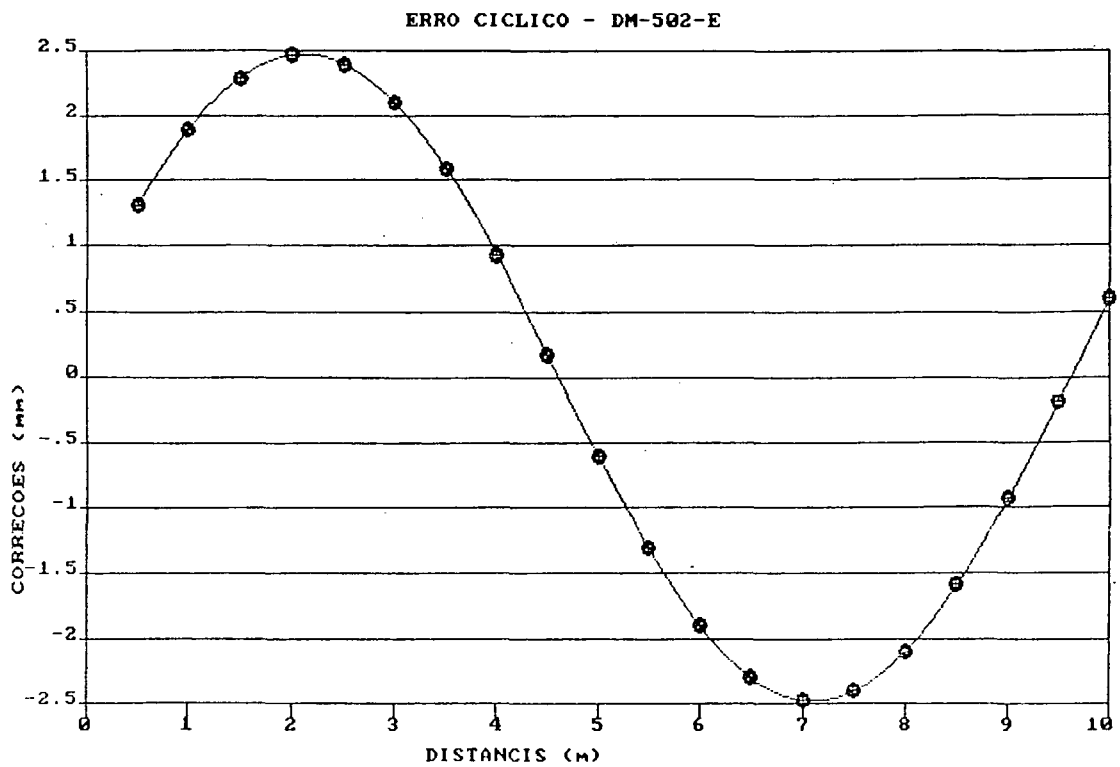


Figura 37 - Curva calibrada do erro cíclico - DM-502-I

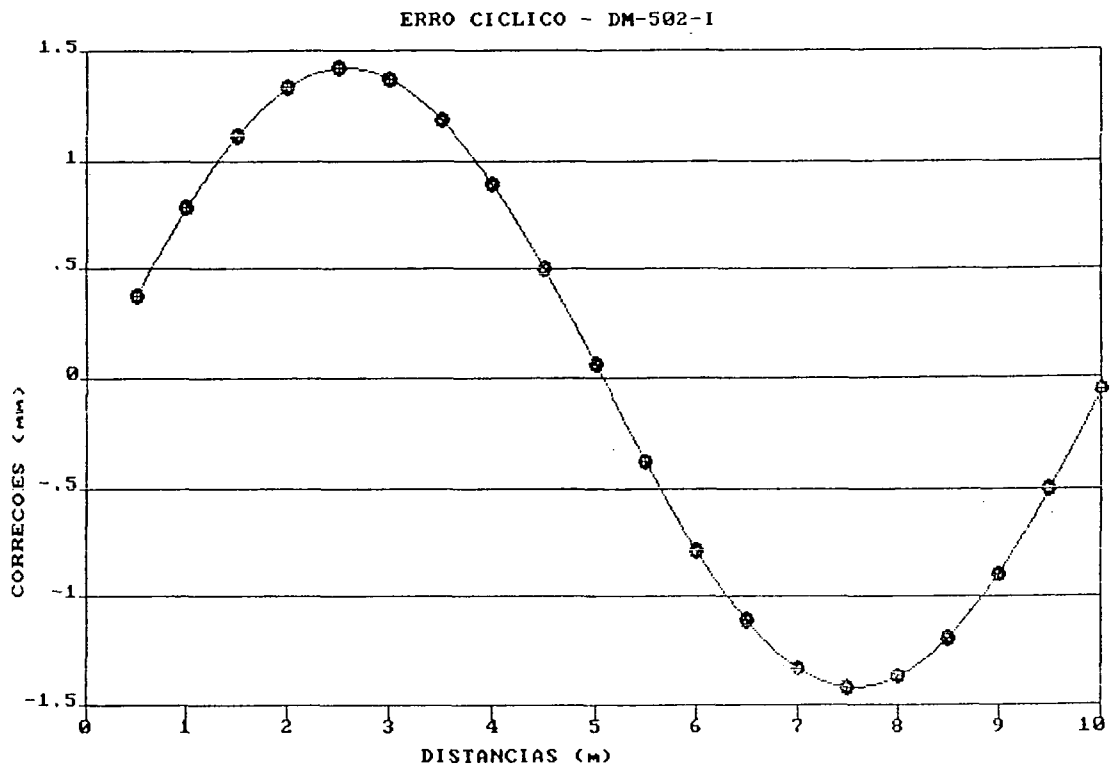
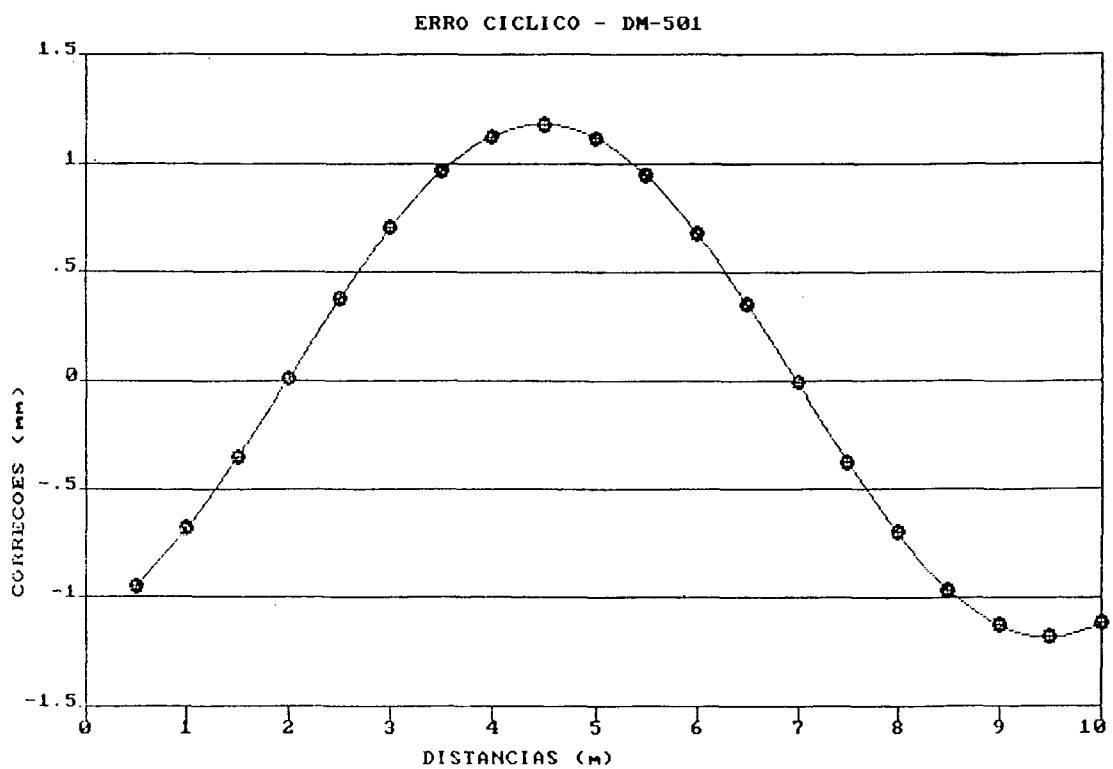


Figura 38 - Curva calibrada do erro cíclico - DM-501



#### 6.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O método das medidas diferenciais proposto em [17] para o cálculo dos elementos do erro cíclico, é um método que mostrou na prática ser muito simples e eficiente. Apresenta a vantagem de independer da distância  $D_0$  (seção 4.3), promove a eliminação da constante aditiva ( $Z_0$ ) através do artifício das duplas diferenças e reduz a influência do fator de escala ( $m$ ) a valores insignificantes. Com isso, a equação (4.5.1) ampara, dentre os erros sistemáticos, apenas o erro cíclico, obviamente em conjunto com os inevitáveis erros aleatórios. Assim sendo, a determinação do erro cíclico fica melhorada pelo simples fato de não haver correlação deste com os demais erros sistemáticos.

Analisando-se as curvas observadas x curvas ajustadas (figuras 19 a 32), verifica-se que em todos os testes efetuados é marcante a presença de erros aleatórios. As causas prováveis são: erros de pontaria, intensidade do sinal refletido, dupla reflexão, erros de centragem (refletor) e erros devido a fixação do refletor;

Os gráficos das figuras 19 a 22 referentes aos testes, efetuados com o IMED DM-S3L, mostram claramente que os valores observados apresentam um comportamento com tendência simétrica ao longo do meio comprimento de onda de modulação, indicando a inexistência de erro cíclico e confirmando as informações constantes na bibliografia, que:

- a) ao ser fabricado, o IMED possui um certo erro;
- b) dada a pequena amplitude, este erro cíclico é

negligenciado; isto pode ser verificado pelos valores obtidos e dispostos às páginas 95 e 97.

Os gráficos das figuras 23, 25, 26, 29, 30 e 32 já apresentam uma indicação da presença do erro cíclico, porém com pequenas amplitudes.

A presença marcante do erro cíclico é verificada nos gráficos das figuras 24, 27, 28 e 31.

Em nenhum dos testes, o erro cíclico extrapolou a precisão nominal do instrumento; apenas em um teste a amplitude do erro se aproximou da precisão nominal do instrumento testado:

DM-502 (KERN) (ENGEFOTO)

Precisão nominal:  $\pm(3 \text{ mm} + 5 \text{ ppm})$

Amplitude do erro cíclico:  $A = 2,477 \text{ mm}$

Com relação ao tipo de espelho utilizado, o único teste efetuado com espelho frontal parece indicar uma maior regularidade da curva do erro, além de mostrar que as distâncias obtidas com espelhos comuns são maiores que aquelas obtidas com espelhos frontais.

Isto mostra claramente que o sinal de medida, além de percorrer o trajeto normal também percorreu uma distância adicional relativa à espessura do vidro. Ficou comprovado também que o sinal de medida ao ser refletido pelo espelho foi afetado pelo fenômeno da dupla reflexão.

Este fator de erro provoca distorção do sinal de medida introduzindo erros na determinação das distâncias.

Porém, o maior fator de erro quando se utiliza

espelhos (comuns ou frontais) é a péssima qualidade dos vidros planos utilizados no espelhamento. A falta de planicidade foi detectada em maior ou menor escala em todos os vidros testados.

Não foram aplicadas correções atmosféricas às observações, haja visto que todos os testes foram conduzidos praticamente nas mesmas condições (tabelas 07 a 20).

Com relação à possível influência da variação da temperatura sobre a trena metálica utilizada, verificou-se resultados insignificantes tendo em vista a lenta variação de temperatura do local, durante a realização dos testes.



## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 7.1 CONCLUSÕES

1) A linha de Teste da UFPr implantada no Centro Politécnico, encontra-se totalmente instalada e aferida para trabalhos de calibração, no que se refere a determinação do erro cíclico;

2) Mesmo que a literatura sobre o assunto recomende a calibração do erro cíclico com distâncias não inferiores à 100 metros, na Linha de Teste da UFPr existe a possibilidade de se efetuar medições de distâncias inferiores, com a simples utilização de 01 ou 03 espelhos devidamente orientados;

3) Quanto à orientação dos espelhos, a experiência mostrou a necessidade de se dispor de um Laser com potência igual ou superior a 2mW, e cuja abertura do feixe não seja muito acentuada;

4) Observou-se que a influência do erro cíclico, para os instrumentos testados é pequena; porém, entre estes, um é novo, três foram revisados recentemente e dois possuem poucas horas de uso;

5) Verificou-se que o instrumento novo apresentou um erro cíclico desprezível, o que confirma as informações constantes na bibliografia;

6) A utilização da fita calibrada em substituição ao interferômetro é perfeitamente viável, haja visto que os intervalos de calibração ( $d_i$ ) são conhecidos com precisão do

micron.

7) A metodologia existente e recomendada na literatura para a determinação do erro cíclico, foi adaptada na Linha de Teste, em dois aspectos:

7.1) utilização de espelhos para obtenção de diferentes distâncias;

7.2) utilização de fita metálica graduada, devidamente calibrada, em substituição à utilização do interferômetro;

8) A linha de Teste mostrou-se prática e eficiente, indicando ser viável a sua utilização em trabalhos normais de calibração.

## 7.2 RECOMENDAÇÕES

1) Tendo em vista que os elementos de calibração podem sofrer variação com o uso e envelhecimento dos equipamentos, é importante a realização de calibrações periódicas nos IMED;

2) Que se melhorem os sistemas refletores implantados, no que diz respeito à falta de rigidez, uma vez que os mesmos mostraram-se eficientes na orientação dos espelhos, porém pouco práticos;

3) Que se procure conseguir espelhos frontais de qualidade, para se eliminar o fenômeno da dupla reflexão e distorções, certamente prejudiciais à medida da distância;

4) Que se melhore o sistema de fixação do primeiro

sistema refletor ( $E_1$ ), para facilitar o alinhamento com o Laser, quando se utilizam tipos diferentes de prisma refletor;

5) Em trabalhos normais e principalmente nos de calibração utilizar sempre o prisma refletor recomendado para cada modelo de IMED;

6) Em futuros trabalhos de calibração, é importante a verificação do nivelamento e alinhamento da Linha de Teste (trilho) para se assegurar um pleno retorno do sinal de medida.

A N E X O S

ANEXO 01

CÁLCULO DA UMIDADE RELATIVA

ANEXO 02

PARÂMETROS ATMOSFÉRICOS NA LINHA DE TESTE

ANEXO 03

VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NA LINHA DE TESTE

ANEXO 04

VARIAÇÃO DA UMIDADE RELATIVA NA LINHA DE TESTE

ANEXO 01

PROCEDIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA UMIDADE RELATIVA

Para o cálculo da umidade relativa procedeu-se da seguinte maneira:

1) Transformação dos valores da temperatura (bulbo seco e bulbo úmido) observados na escala Celcius ( $^{\circ}\text{C}$ ) para a escala Farenheit ( $^{\circ}\text{F}$ ):

$$^{\circ}\text{F} = (^{\circ}\text{C} + 17,8) \cdot 1,8 \text{ ou}$$

$$^{\circ}\text{F} = 32 + 9/5 \cdot ^{\circ}\text{C}$$

2) O valor da umidade relativa é interpolado na TABELA DE % DE UMIDADE RELATIVA |12| de dupla entrada, em função das temperaturas seca e úmida, na escala Farenheit.

Os valores encontrados estão relacionados na Tabela 21 a seguir.

ANEXO 02  
PARAMETROS ATMOSFÉRICOS COLETADOS DE  
SETEMBRO/90 A FEVEREIRO/91  
(MÉDIAS DIARIAS)



Tabela 21 - Parâmetros atmosféricos Linha de Teste

DATA	TEMP. ÚMIDA °C	TEMP. SECA °C	PRESSÃO mm Hg	UMIDADE (%) RELATIVA
24/09/90	14,2	18,2	691,8	65,5
26	14,3	18,4	691,6	65,5
27	14,6	18,5	692,6	65,5
28	14,8	18,8	691,5	66,0
01/10/90	16,8	18,8	686,8	80,0
02	16,6	18,8	690,0	80,0
04	16,7	19,6	690,1	75,5
05	17,6	19,8	688,1	80,0
09	18,6	20,2	687,5	90,0
10	18,8	20,6	686,0	85,5
11	19,3	20,6	684,8	90,0
12	19,5	20,3	686,1	90,0
17	16,8	20,2	688,8	71,0
18	17,5	20,3	687,1	76,0
19	17,8	20,2	686,7	80,0
22	16,6	20,3	688,4	67,5
23	15,9	20,3	688,5	63,0
24	16,8	20,6	690,4	67,5
25	16,8	20,6	690,5	67,5
26	16,8	20,4	690,5	67,5
29	18,2	21,1	686,8	76,5
30	18,2	21,2	687,0	76,5
31	19,2	21,6	686,1	81,5

Tabela 21 - Parâmetros atmosféricos Linha de Teste (Cont.)

DATA	TEMP. ÚMIDA °C	TEMP. SECA °C	PRESSÃO mm Hg	UMIDADE (%) RELATIVA
05/11/90	17,4	21,2	690,3	68,0
06	17,8	21,4	691,3	68,5
07	18,3	21,3	688,0	76,5
08	19,3	21,7	687,8	81,5
09	19,4	21,6	686,8	81,5
12	19,8	21,8	687,0	86,0
13	19,4	21,8	687,5	81,5
14	19,8	22,2	687,5	82,0
16	21,2	22,7	687,1	86,5
19	21,1	23,1	688,9	82,0
20	20,9	22,9	687,6	86,5
23	20,0	22,8	689,7	78,0
27	19,4	23,0	683,0	73,5
28	19,0	22,8	685,0	69,0
29	19,2	22,7	686,3	73,5
30	19,0	22,9	687,1	69,0
03/12/90	19,7	22,4	689,0	82,0
04	19,8	23,0	690,5	78,0
05	20,1	23,1	689,3	74,0
06	20,4	23,4	685,5	78,0
07	20,6	23,4	686,5	78,0
10	19,4	22,6	682,5	73,5
11	19,8	23,0	680,0	78,0

Tabela 21 - Parâmetros atmosféricos Linha de Teste (Cont.)

DATA	TEMP. ÚMIDA °C	TEMP. SECA °C	PRESSÃO mm Hg	UMIDADE (%) RELATIVA
12	19,8	22,9	684,7	78,0
13	20,5	22,9	681,1	82,3
14	19,4	22,2	686,5	77,5
17	19,7	23,3	688,4	74,0
18	21,0	23,2	684,5	82,0
20	20,1	23,2	684,5	74,0
21	20,6	23,4	686,3	78,0
02/01/91	20,2	23,4	686,5	74,0
03	20,0	23,1	686,4	74,0
04	20,5	23,4	686,4	78,0
05	19,1	23,4	688,3	65,0
07	19,5	23,2	687,9	69,5
08	19,6	23,4	687,5	69,5
09	20,2	23,7	687,5	70,0
10	20,6	23,8	683,0	74,0
15	21,0	23,8	681,5	78,0
16	20,8	23,8	682,5	78,0
17	19,0	23,6	688,0	62,0
18	18,5	23,5	691,5	61,5
19	18,6	23,4	692,5	65,0
21	19,4	23,7	686,3	66,0
22	20,6	23,9	685,8	74,0
23	20,6	24,2	689,5	70,0
28	19,2	23,4	684,5	69,5

Tabela 21 - Parâmetros atmosféricos Linha de Teste (Cont.)

DATA	TEMP. ÚMIDA °C	TEMP. SECA °C	PRESSÃO mm Hg	UMIDADE (%) RELATIVA
29	20,5	23,7	684,9	74,0
30	20,4	23,6	681,5	74,0
02/02/91	20,8	24,0	687,0	78,0
04	20,8	23,6	687,2	78,0
05	20,5	23,8	684,7	74,0
06	20,6	23,8	687,0	74,0
07	21,0	24,0	686,0	78,0
08	20,8	23,6	686,0	78,0
14	20,0	24,0	686,0	70,0
15	20,0	24,1	687,7	70,0
17	21,0	24,2	685,0	74,0
18	21,0	24,1	685,0	78,0
19	20,6	24,0	686,0	74,0
20	20,6	24,2	685,0	70,0

ANEXO 03

VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NA LINHA DE TESTE  
DURANTE A REALIZAÇÃO DOS TRABALHOS

Figura 39 - Variação da temperatura na Linha de Teste

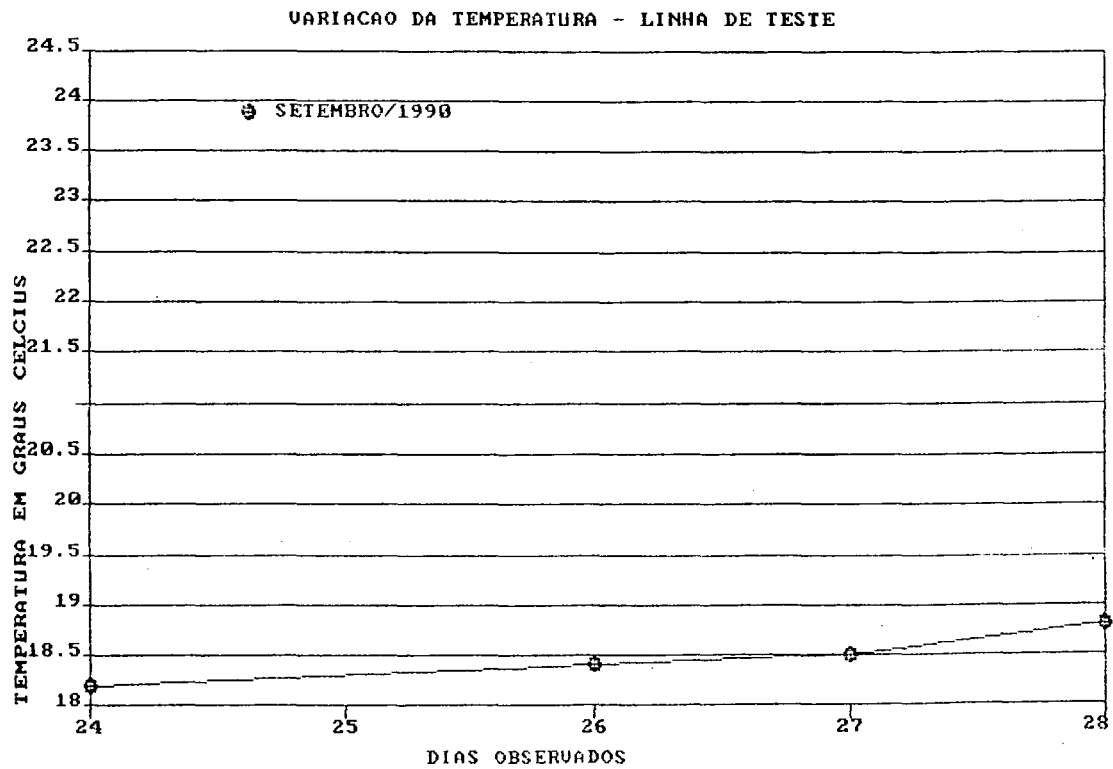


Figura 39 - Continuação ...

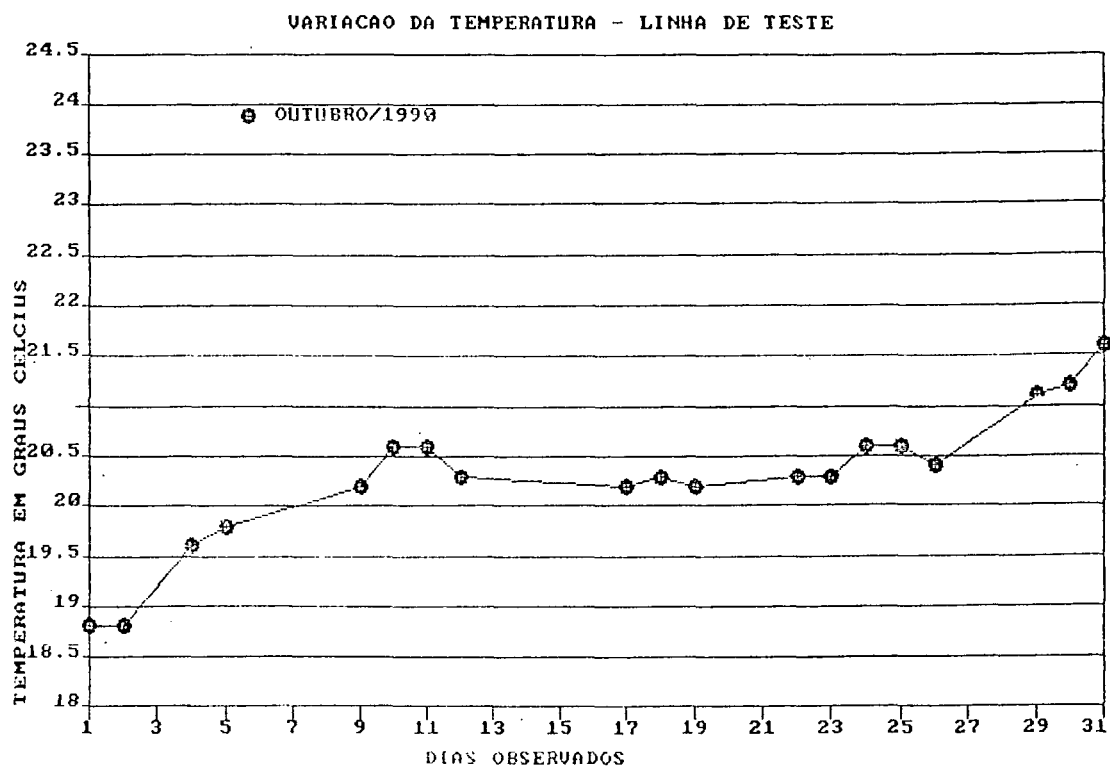


Figura 39 - Continuação ...

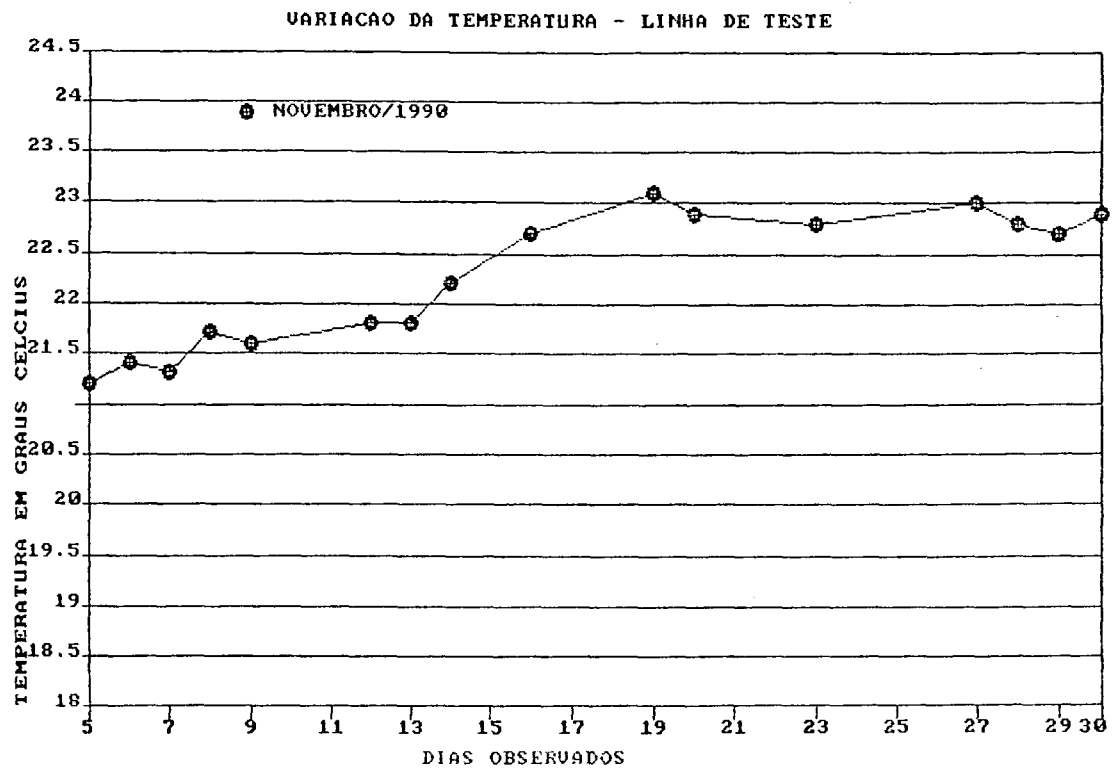


Figura 39 - Continuação ...

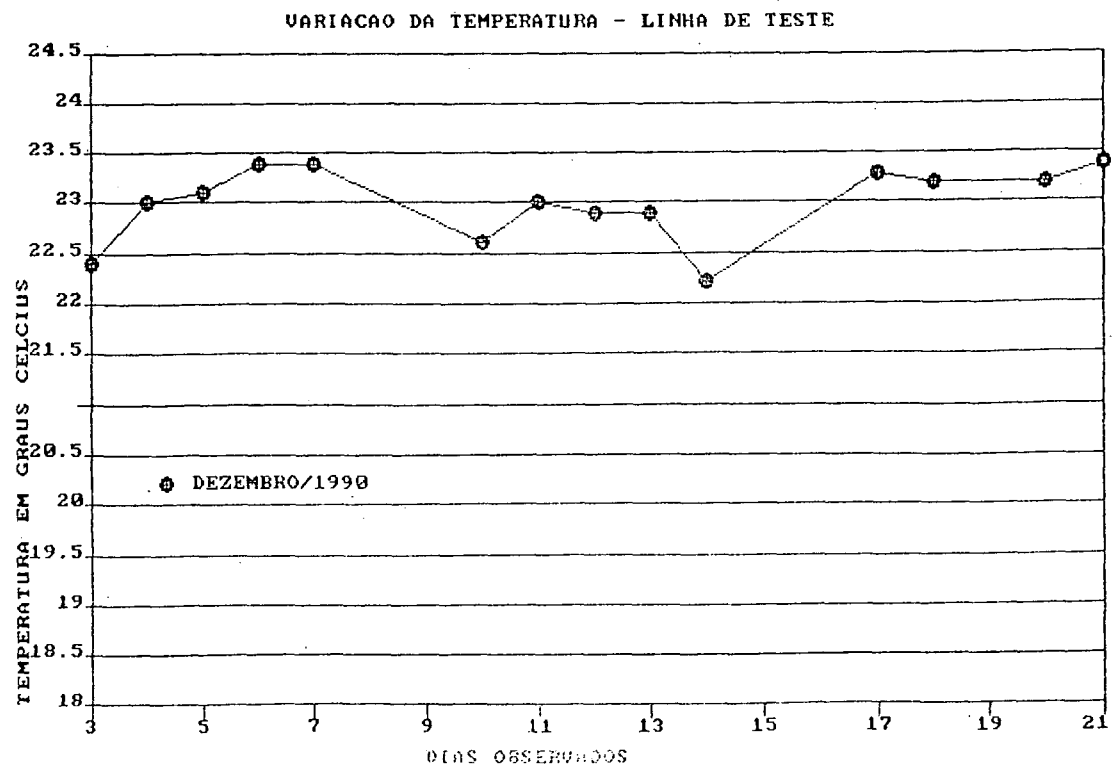


Figura 39 - Continuação ...

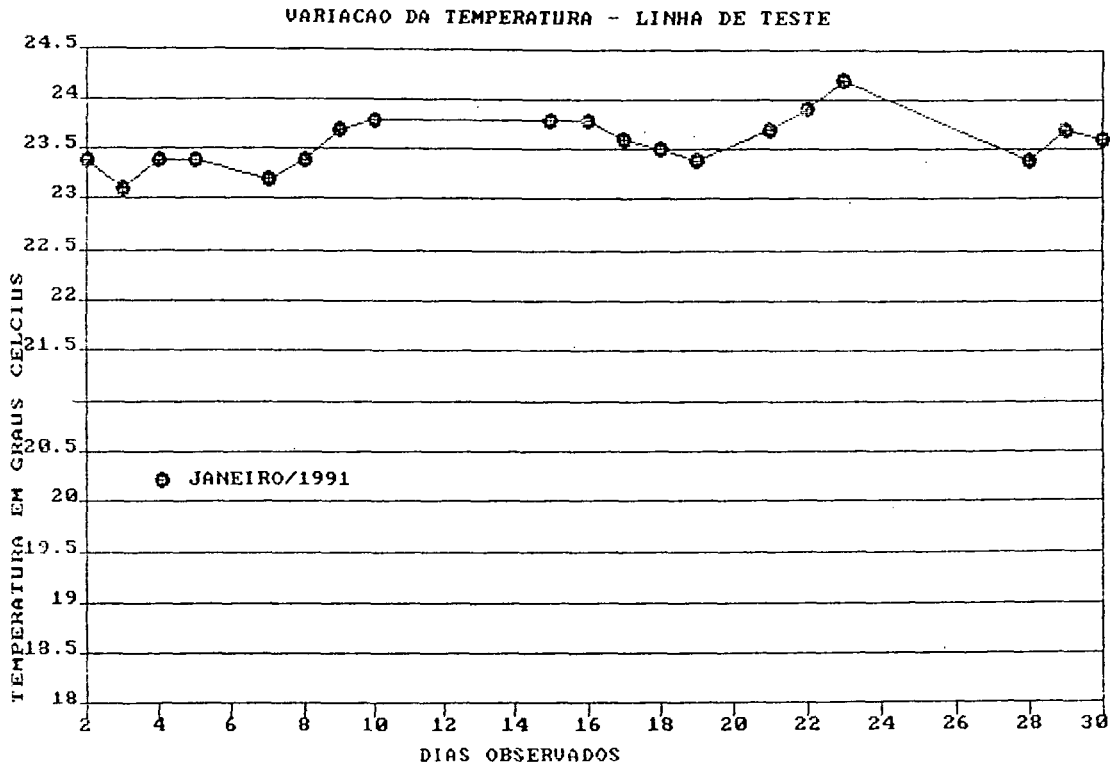
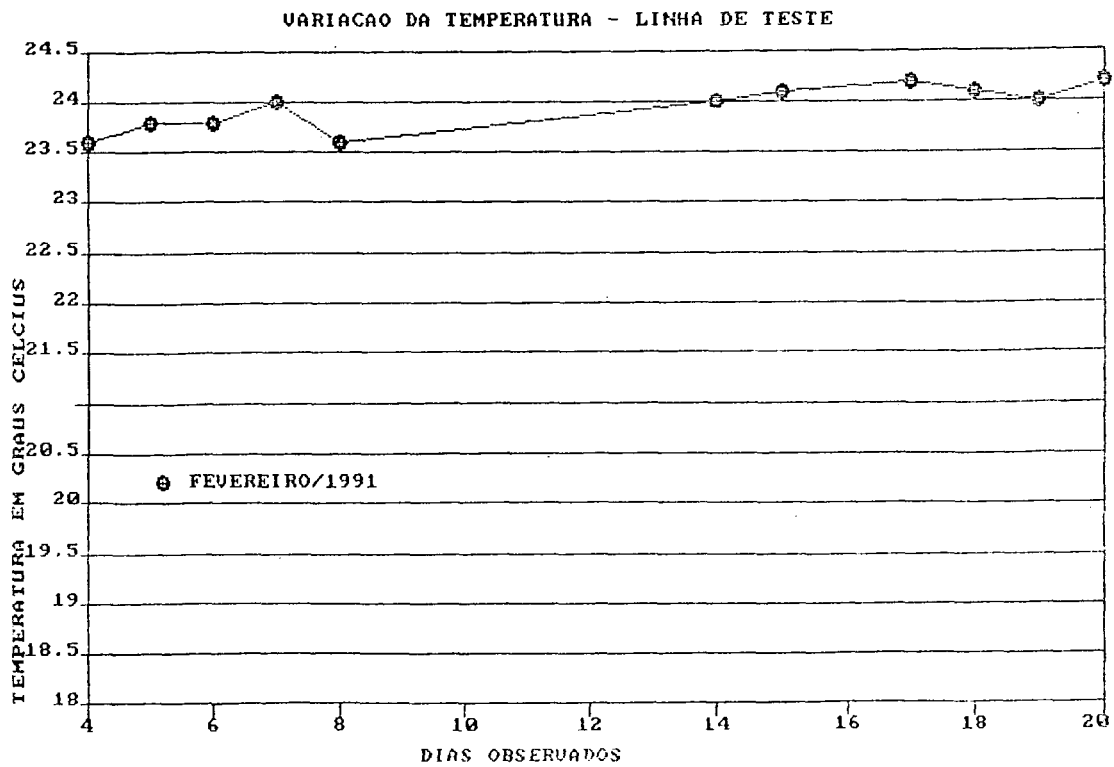


Figura 39 - Continuação ...





ANEXO 04  
UMIDADE RELATIVA DO AR DETECTADA DURANTE  
A EXECUÇÃO DOS TRABALHOS  
NA LINHA DE TESTE

Figura 40 - Umidade relativa detectada na Linha de Teste

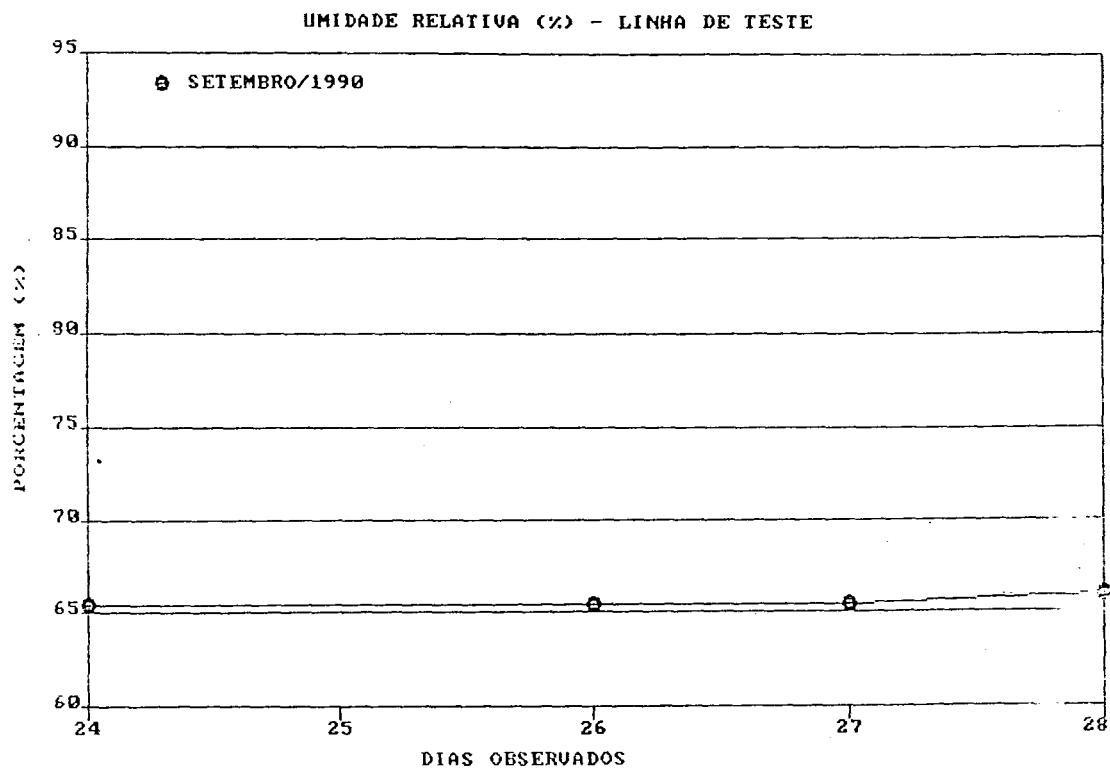


Figura 40 - Continuação ...

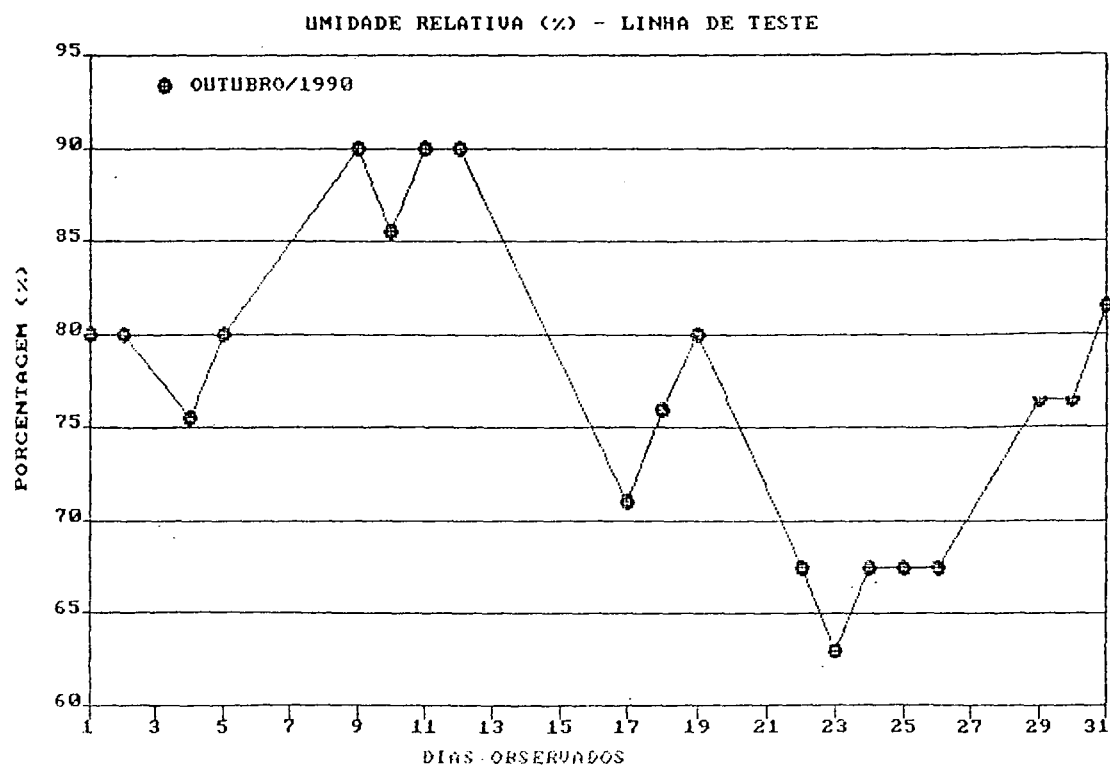


Figura 40 - Continuação ...

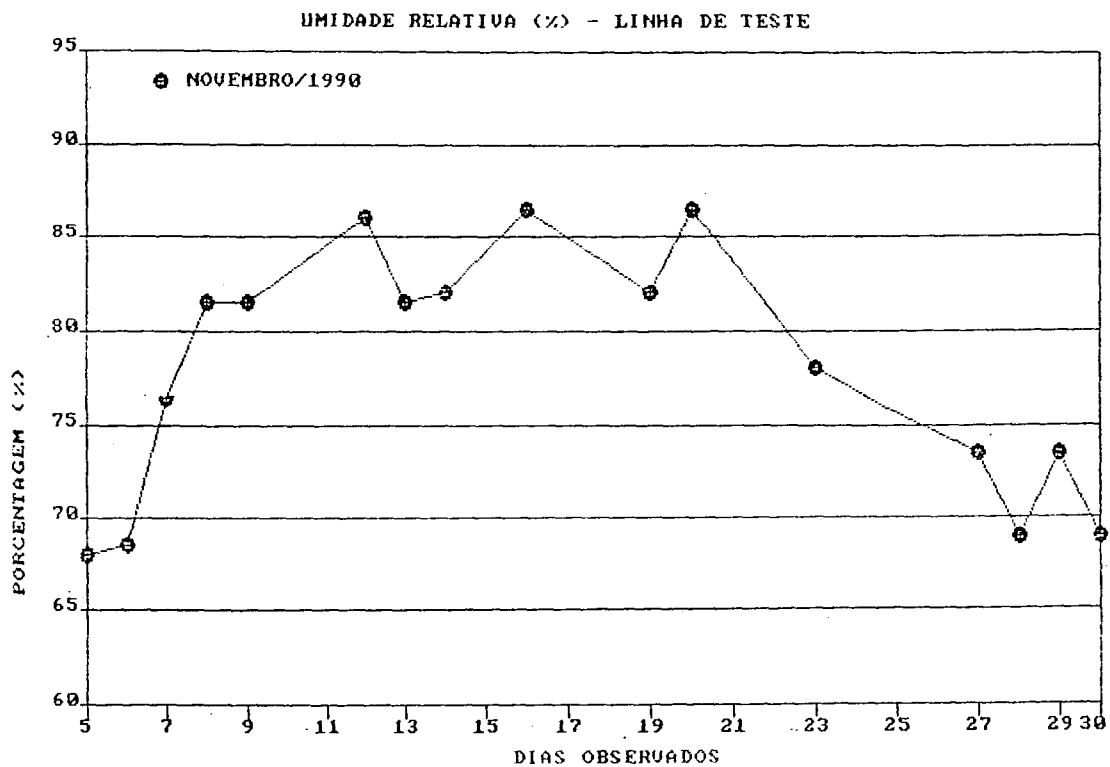


Figura 40 - Continuação ...

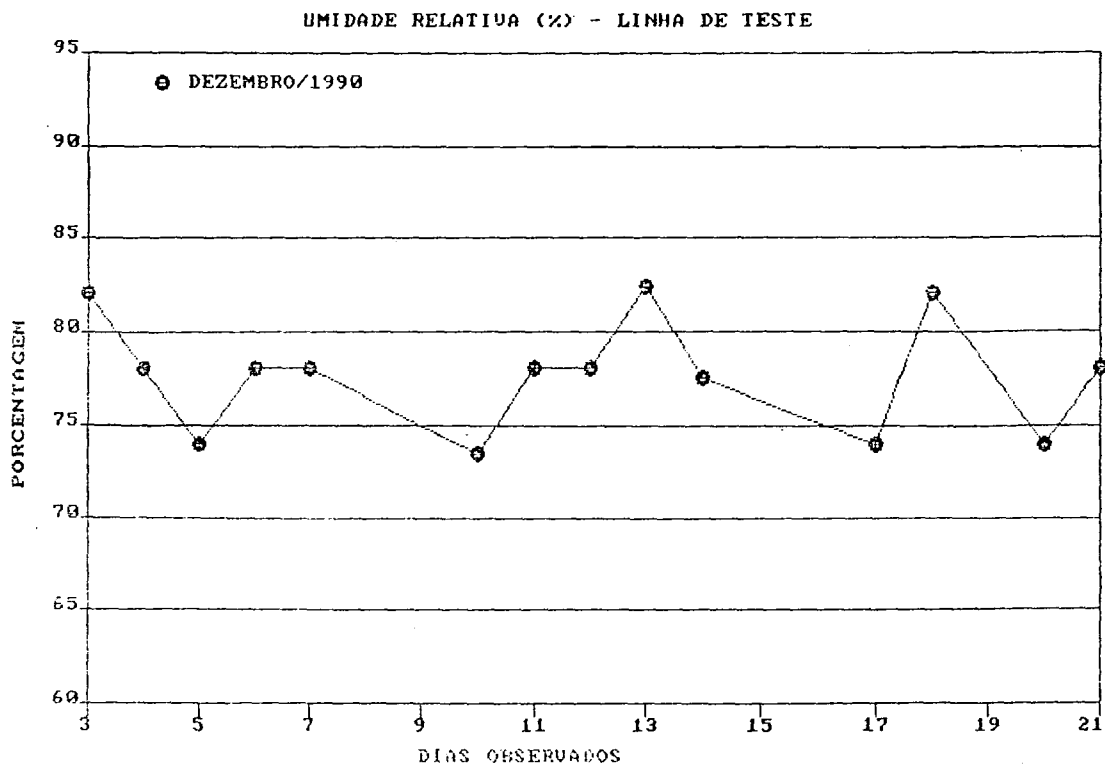


Figura 40 - Continuação ...

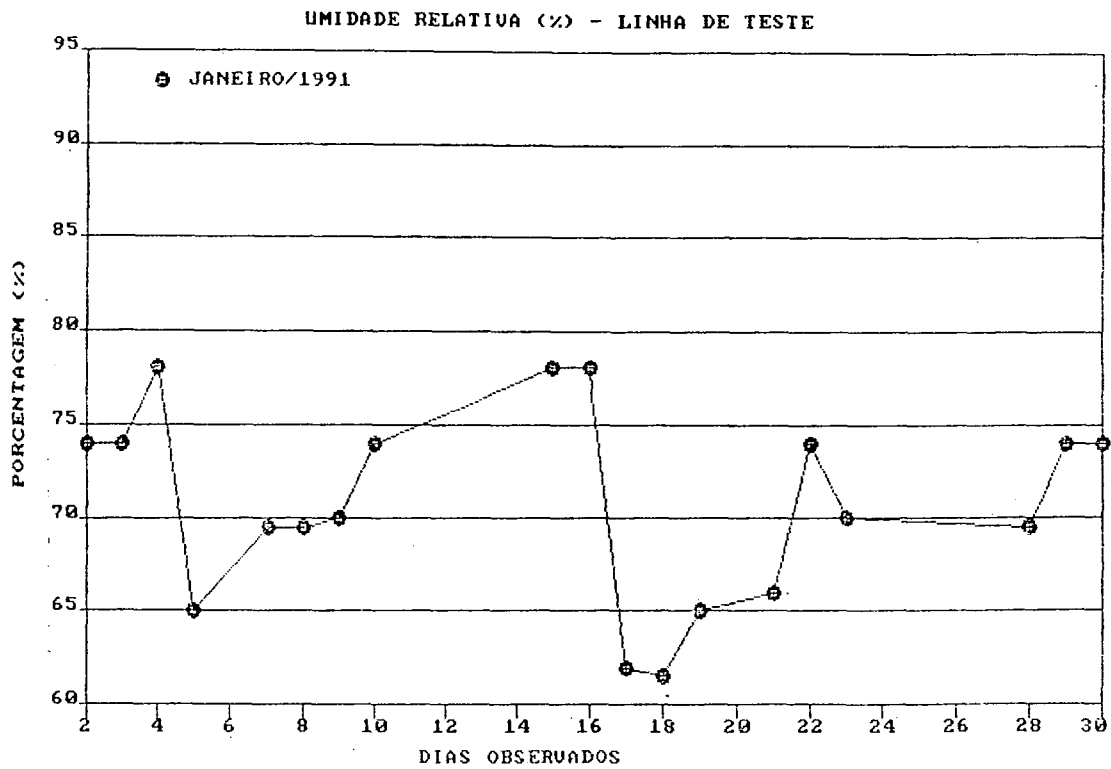
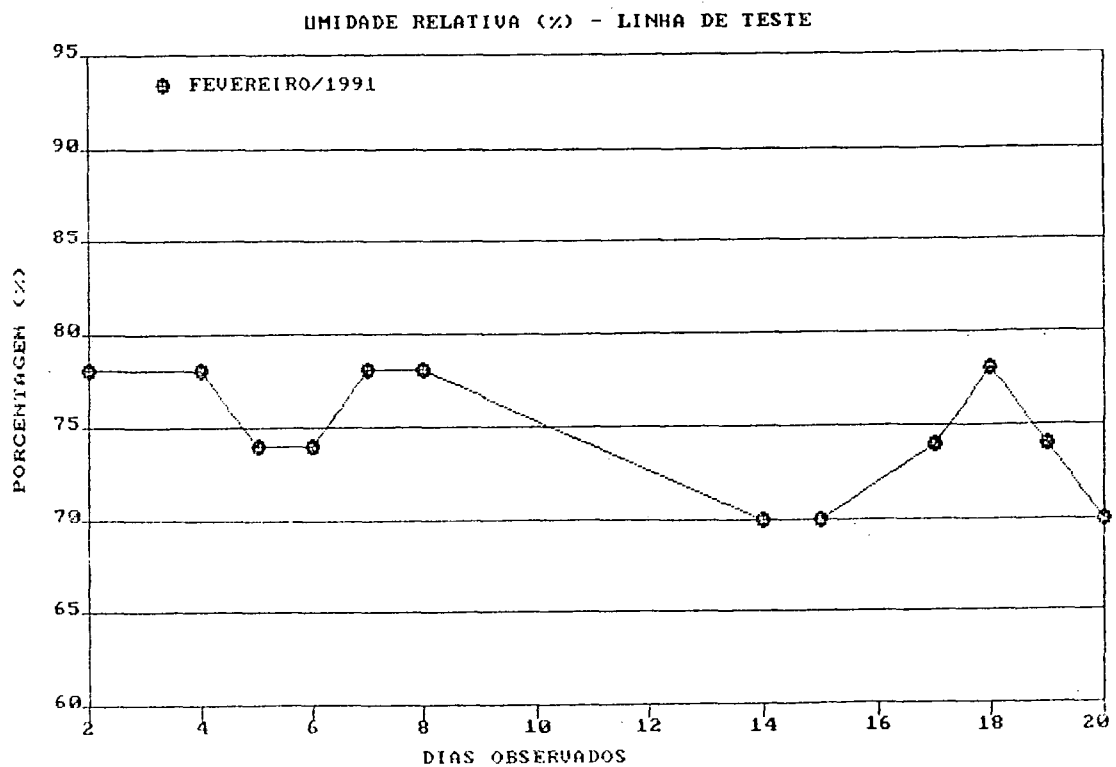


Figura 40 - Continuação ...



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- |01| ASHKENAZI, V. ; DEETH, C. P. ; DODSON, A. H. EDM accuracy and calibration. S.L., s. ed., 1979. 21p.
- |02| ASHKENAZI, V. The use of the laser interferometer for scale calibration of the Nottingham base line. Camberra, s. ed., 1979. 13p. (XVII General Assembly of the U.G.G.I.).
- |03| ASHKENAZI, V. ; DODSON, A.H. Measurement of Deformations by Surveying Techniques Compendium of Formulae. Calibration of Instruments. In: Seminar in the University of Nottingham, 9/10 January, 1978. 21p.
- |04| BOMFORD, G. Geodesy. 4ed. Oxford, University Press, 1983.
- |05| BRASIL. Portaria n.059 - EME, de 16 de agosto de 1984. Manual Técnico T34-801, Distanciômetros Eletrônicos, 1ed., 1984.
- |06| BURNSIDE, C.D. Electromagnetic distance measurement. Great Britain, Crosby Lockwood, 1971. 117p.
- |07| CHRZANOWSKI, A. Design and error analysis of surveying projects. Lecture notes. New Brunswick, n(47), p. ir., 1977.
- |08| COUCHMAN, H.D.A. Method of evaluating cyclic errors in EDM equipment. The Australian Surveyor, 26(2), p: 113-115, June 1974.
- |09| DOUBEK, A. Levantamentos Eletrônicos - 1a. parte. Curitiba, UFPR. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. 1974. 123p.
- |10| ----- Levantamentos Eletrônicos - 2a. Parte. Curitiba, UFPR. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. 1974. 102p.
- |11| ----- Uma base de Aferição. Curitiba, UFPR. Tese de Grau de Mestre em Ciências. 1974. 72p.
- |12| ----- Topografia 3. Altimetria. Curitiba, UFPR. Departamento de Geociências. Diretório Acadêmico do Setor de Tecnologia. Apostila. 1978. 80p.
- |13| EMENIKE, E.N. On the calibration of EDM instruments. Australian Surveyor, 31(3), p:175-185. September 1982.

- [14] GEMAEL, C. Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas. Curitiba, UFPR. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. 1984.
- [15] ----- Geodésia Geométrica. 1a. Parte. Curitiba, UFPR. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. 1987.
- [16] GRIPP, J. Jr. Calibração de Distanciômetros Eletrônicos com Medidas de Campo. Curitiba, 1986. 115p. Dissertação, Mestrado. Universidade Federal do Paraná.
- [17] HERREWEGEN, M. van den. Testing Electro-optical Distances on an Interferometric Base-Line. [s.l.:s.n.], [197-]. p:41-55.
- [18] HOUSE, S.L. Cyclic errors in EDM. Surveying and Mapping, 42(3), p:281-286. September 1982.
- [19] KIVIOJA, L.A. Reflector constant and refraction index for EDM corner reflectors. Surveying and Mapping, v.43, n.4, p:399-403. December 1983.
- [20] MOFFITT, F.H. Calibration of EDM's for precision measurement. Surveying and Mapping, v.35, n.2, p:147-154. June 1975.
- [21] NORTON, T.G. Analysis of EDM calibration measurements: program CALORY. Australian Surveyor, v.33, n.1, p:44-54. March 1986.
- [22] PHILIPP, P. Care and calibration of EDM equipment. Australian Surveyor, v.27, n.2, p:VIII-IX. June 1975.
- [23] RICHARDUS, P. Electroning surveying. Curitiba, UFPR. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas: Notas de Aula. 1971.
- [24] RUEGER, J.M. Computation of cyclic error of EDM instruments using pocket calculators. Australian Surveyor, 23(4), p:268-275. December 1978.
- [25] ----- Design and use of base line for the calibration of EDM instruments. In: AUSTRALIAN SURVEYOR CONGRESS, 20th. p:175-189. Darwin 1977.
- [26] ----- Remarks on the joint determination of zero error and cyclic error for EDM instruments calibration. Australian Surveyor, 28(2), p:96-103. June 1976.

- |27| ----- Measurement and computation of short periodic errors of EDM instruments. Surveying and Mapping, v.46, n.1, p:231-241. September 1986.
- |28| ----- Recent developments in electronic distance measurement. Australian Surveyor, v.30, n.3, p:170-176. September 1980.
- |29| SCHWENDENER, H. R. Electronic distance for short ranges: accuracy and checking procedures. Survey Review, 21(164), p:273-281. April 1972.
- |30| SOARES, A. Eletrônica. Curitiba, UFPR. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. 1972/73.
- |31| SPRENT, A.; ZWART, P. R. EDM calibration, a scenario. Australian Surveyor, 29(3), p:157-169. September 1978.
- |32| SPRENT, A. EDM calibration in Tasmania. Australian Surveyor, 30(4), p:213-227. December 1980.
- |33| WITTE, B. V.; SCHWARZ, W. Calibration on electro-optical range finders: experience gained and general remarks relative to calibration. Surveying and Mapping, v.42, n.2, p:151-162. June 1982.