

**JORGE PINTO GOMES**

**DETERMINAÇÃO DE DESNÍVEIS DE PRECISÃO UTILIZANDO  
ESTAÇÃO TOTAL**

**Dissertação apresentada como requisito  
parcial à obtenção do grau de Mestre em  
Ciências Geodésicas do Curso de Pós-  
Graduação em Ciências Geodésicas da  
Universidade Federal do Paraná**

**Orientador:  
Prof. Dr. Pedro Luis Faggion**

**CURITIBA**

**2006**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

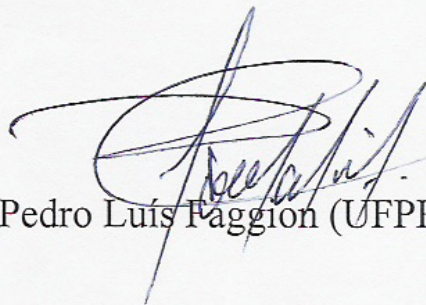
**“DETERMINAÇÃO DE DESNÍVEIS DE PRECISÃO  
UTILIZANDO ESTAÇÃO TOTAL”**

**POR**

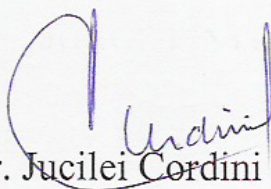
**JORGE PINTO GOMES**

Dissertação nº 189 aprovada como requisito parcial do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos professores:

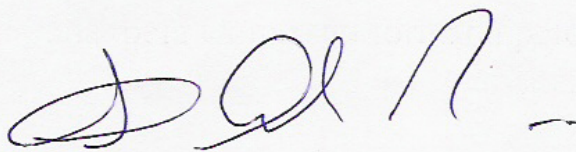
Curitiba, 23 de fevereiro de 2006.



Prof. Dr. Pedro Luis Faggion (UFPR) - Orientador e Presidente



Prof. Dr. Jucilei Cordini - Membro (UFSC)



Prof. Dr. Carlos Aurélio Nadal – Membro (UFPR)

A meus pais (in memorian)

A minha família: Denise, Juliana,  
Mariana e Jorge Henrique

## AGRADECIMENTOS

Ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, do Departamento de Geomática, do Setor de Ciências da Terra, pela nova oportunidade, em especial aos professores e funcionários que se dedicam ao engrandecimento do curso.

Ao Prof. Dr. Pedro Luis Faggion, pela orientação e, principalmente, pela atitude sempre positiva e motivadora.

Ao Prof. Dr. Luís Augusto Koenig Veiga, pelas discussões e fundamental indicação da literatura.

Ao Prof. MSc. Alex Soria Medina, pela valiosa colaboração nos experimentos.

Aos colegas Ernesto, Fabiani, Granemann, Karoline, Luisnei, Niarkios, Michele, Perozzo e Zocolotti pela prestimosa colaboração na obtenção dos dados.

Aos jovens Jorge Henrique (meu guri) e Ana Paula pela dedicada colaboração nos levantamentos de campo.

Ao convênio de cooperação técnica e pesquisa entre a ANEEL, COPEL, LACTEC, LAIG, pelos recursos oferecidos quando dos levantamentos em Salto Caxias.

A MANFRA, pela cessão, por empréstimo, dos prismas.

Aos amigos do "happy hour" por me ajudarem a manter a sanidade mental e procrastinar a decrepitude.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	x
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>01</b>
1.1 HIPÓTESE DE TRABALHO	02
1.2 OBJETIVOS	02
1.2.1 Objetivo Geral	02
1.2.2 Objetivos Específicos	02
1.3 JUSTIFICATIVA	03
1.4 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO	03
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>04</b>
2.1 LEVANTAMENTOS ALTIMÉTRICOS	04
2.1.1 Levantamentos Altimétricos com GPS	04
2.2 NIVELAMENTO GEOMÉTRICO	07
2.2.1 Fontes de Erros no Nivelamento Geométrico	09
2.2.2 Recomendações Usuais nas Operações de Nivelamento Geométrico	12
2.3 REDE ALTIMÉTRICA	13
2.4 REDE ALTIMÉTRICA DO SISTEMA GEODÉSICO BRASILEIRO	16
2.5 NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO	17
2.5.1 Equação Básica do Nivelamento Trigonométrico	18
2.5.2 Propagação dos Erros no Nivelamento Trigonométrico	19
2.5.3 Curvatura Terrestre e Efeito da Refração	20
2.5.3.1 Curvatura terrestre	20
2.5.3.2 Efeito da refração	21
2.5.4 Efeito Conjunto da Curvatura Terrestre e da Refração para Visadas Recíprocas e Simultâneas	22
2.5.5 Determinação do Coeficiente de Refração – k	23
2.6 ESTAÇÃO TOTAL	23

2.6.1 Erros Instrumentais	24
2.6.1.1 Erro de zênite instrumental	25
2.6.1.2 Erro de verticalidade do eixo principal	27
2.6.1.3 Erro de índice do compensador	28
2.6.1.4 Erros devidos a diferenças de temperaturas	28
2.6.2 Erro de Pontaria	29
2.6.3 Precisão Nominal da Estação Total	30
2.6.4 Precisão Esperada na Determinação da distância vertical ( $D_v$ ) em uma Série PD-PI	31
2.6.5 Precisão Esperada da Estação Total com mais de uma Série PD-PI	32
2.6.5.1 Precisão esperada na determinação da distância inclinada( $D'_v$ )	32
2.6.5.2 Precisão esperada na determinação do ângulo zenital (Z)	33
2.6.5.3 Precisão esperada na determinação da distância vertical ( $D_v$ )	33
2.6.6 Determinação do Número de Séries em Função da Precisão Estimada para o desnível ( $D_v$ )	34
2.7 MODELO DE TRANSFERÊNCIA DE TURBULÊNCIA NA DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA REFRAÇÃO NA MEDIÇÃO DO ÂNGULO ZENITAL	35
2.7.1 Relação Entre Curvatura e Gradiente de Temperatura (Dodson e Zaher, 1985)	36
2.7.2 Turbulência na Atmosfera	43
2.7.2.1 Temperatura Potencial - $\theta$	43
2.7.2.2 Fluxo de Troca De Calor – F	44
2.7.2.3 Altura de Obukhov – L	44
2.7.3 Estados de Turbulência na Atmosfera	45
2.7.3.1 Estado instável	45
2.7.3.2 Estado estável	46
2.7.3.3 Estado neutro	46
2.8 DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO DE REFRAÇÃO VERTICAL NOS ESTADOS DE TURBULÊNCIA	47
2.8.1 Estado de Turbulência Instável	47
2.8.2 Estado de Turbulência Estável	48
2.8.3 Atmosfera no Estado Neutro	49

<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	50
3.1	DETERMINAÇÃO DE DESNÍVEL COM ESTAÇÃO TOTAL	50
3.2	PRECISÃO ESPERADA NA DETERMINAÇÃO DO DESNÍVEL $\Delta H_{AB}$ PARA VISADAS DE IGUAL COMPRIMENTO	53
3.3	DETERMINAÇÃO DO EFEITO DA REFRAÇÃO NA DISTÂNCIA MEDIDA	54
<b>4</b>	<b>CALIBRAÇÃO DO CONJUNTO BASTÃO – PRISMA</b>	56
4.1	SISTEMA INTERFEROMÉTRICO DISPONÍVEL NO LAIG	56
<b>5</b>	<b>EXPERIMENTOS REALIZADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	61
5.1	RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO	61
5.2	VERIFICAÇÃO DA EXPESSURA DOS TRAÇOS DO BASTÃO	63
5.3	DEFINIÇÃO DOS LOCAIS DOS LEVANTAMENTOS	64
5.4	ESTAÇÕES TOTAIS UTILIZADAS NOS LEVANTAMENTOS	65
5.5	NIVELAMENTO GEOMÉTRICO NO CIRCUITO DO CENTRO POLITÉCNICO	66
5.6	RESULTADOS OBTIDOS COM O NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO	68
5.6.1	Método de Visadas Iguais	68
5.6.2	Resultados Obtidos com a Estação Total TC2002	68
5.6.3	Resultados Obtidos com a Estação Total ELTA S20	70
5.6.4	Resultados Obtidos com a Estação Total TC403L	72
5.6.5	Contra Nivelamento com a Estação Total ELTA S20	74
5.6.6	Levantamento com Visadas de Comprimentos Desiguais	76
5.7	LEVANTAMENTOS REALIZADOS NA BARRAGEM DE SALTO CAXIAS	77
5.7.1	Medição do Desnível RN-50A para RN-51, em agosto de 2004, dia de Elevada Insolação	78
5.7.2	Medição do Desnível RN-50A para RN-51, em junho de 2005, dia Nublado	81
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>	83
6.1	CONCLUSÕES	83
6.2	RECOMENDAÇÕES	84
	APÊNDICES	85
	REFERÊNCIAS	103



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – ALTITUDE GEOMÉTRICA E ORTOMÉTRICA	05
FIGURA 2.2 – MODELO GEOIDAL SIRGAS 2000	06
FIGURA 2.3 – NÍVEL E DETALHE DA MIRA	07
FIGURA 2.4 – NIVELAMENTO GEOMÉTRICO	08
FIGURA 2.5 – ESQUEMA DE DESNÍVEL EM MAIS DE UM LANCE	09
FIGURA 2.6 - SISTEMA DE EIXOS DOS NÍVEIS	10
FIGURA 2.7 - ERRO DE VERTICALIDADE	10
FIGURA 2.8 - ERRO DE COLIMAÇÃO (E)	11
FIGURA 2.9 – MIRA SOBRE A SAPATA	13
FIGURA 2.10 – REFERÊNCIA DE NÍVEL – RN	14
FIGURA 2.11 – CHAPA METÁLICA	14
FIGURA 2.12 – REDE ALTIMÉTRICA	15
FIGURA 2.13- REDE ALTIMÉTRICA BRASILEIRA	16
FIGURA 2.14 – OBTENÇÃO DO DESNÍVEL NO NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO	18
FIGURA 2.15 – REPRESENTAÇÃO DA CURVATURA E DA REFRAÇÃO	20
FIGURA 2.16 - PARTES PRINCIPAIS DE UMA ESTAÇÃO TOTAL	24
FIGURA 2.17 - ERRO DE ZÊNITE INSTRUMENTAL ( $z_0$ )	25
FIGURA 2.18 – LEITURA DO ÂNGULO ZENITAL EM PD E EM PI	26
FIGURA 2.19 - ERRO DE VERTICALIDADE DO EIXO PRINCIPAL	27
FIGURA 2.20 - ESQUEMA DE UM COMPENSADOR	28
FIGURA 2.21 - COMPORTAMENTO DO COMPENSADOR DURANTE EQUILÍBRIO TÉRMICO COM O AMBIENTE	29
FIGURA 2.22 – CAMINHAMENTO DE UMA ONDA ELETROMAGNÉTICA NA ATMOSFERA IDEAL	37
FIGURA 3.1 – SISTEMA DE EIXOS DA ESTAÇÃO TOTAL	50
FIGURA 3.2 - NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO MÉTODO DE VISADAS IGUAIS	51
FIGURA 4.1 – CONJUNTO BASTÃO-PRISMA APOIADO POR BIPÉ	56
FIGURA 4.2 - EMISSOR LASER E CONTADOR-MOSTRADOR	57
FIGURA 4.3 - INTERFERÔMETRO	58
FIGURA 4.4 – SISTEMA INTERFEROMÉTRICO	59

FIGURA 4.5 - CARRINHO E SEUS COMPONENTES	59
FIGURA 5.1 - ALTURA DO PRISMA	61
FIGURA 5.2 - FIXAÇÃO DA ALTURA DO BASTÃO	64
FIGURA 5.3 – LOCALIZAÇÃO DAS RRNN NO CENTRO POLITÉCNICO	65
FIGURA 5.4 – ESTAÇÕES TOTAIS UTILIZADAS NOS TRABALHOS	66
FIGURA 5.5 – NÍVEL: NA 3003, MIRA DE CÓDIGO DE BARRAS (DETALHE)	67
FIGURA 5.6 – RN-50A E RN-51 – BARRAGEM DE SALTO CAXIAS	78

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - EFEITO DA CURVATURA TERRESTRE ( $c$ ) E TOLERÂNCIA PARA O NIVELAMENTO GEOMÉTRICO DE PRECISÃO	21
TABELA 2.2 - CLASSIFICAÇÃO DAS ESTAÇÕES TOTAIS DE ACORDO COM A PRECISÃO INTERNA (ABNT-NBR-13.133)	30
TABELA 2.3 - PRECISÃO ESPERADA $\sigma_{Dv}$ (mm)	32
TABELA 2.4 – NÚMERO DE SÉRIES EM FUNÇÃO DA PRECISÃO NOMINAL E DO FECHAMENTO ESPERADO EM $3\text{mm}\sqrt{k}$	35
TABELA 2.5 – EFEITO DA REFRAÇÃO PARA $K=13$	49
TABELA 5.1 - MEDIDAS DO BASTÃO 1 (em milímetros)	62
TABELA 5.2 - MEDIDAS DO BASTÃO 2 (em milímetros)	62
TABELA 5.3 - EXPESSURA DOS TRAÇOS DO BASTÃO	63
TABELA 5.4 – PRECISÃO NOMINAL DAS ESTAÇÕES TOTAIS	66
TABELA 5.5 – RESUMO DO NIVELAMENTO GEOMÉTRICO	67
TABELA 5.6 – ALTITUDES DO CIRCUITO NIVELADO	67
TABELA 5.7 - DESNÍVEIS OBTIDOS COM A ESTAÇÃO TOTAL TC2002	68
TABELA 5.8 – PRECISÃO (mm) TC2002 X ESPECIFICAÇÕES - $N_s = 3$	70
TABELA 5.9 - DESNÍVEIS OBTIDOS COM A ESTAÇÃO TOTAL ELTA S20	71
TABELA 5.10 – PRECISÃO (mm) ELTA S20 X ESPECIFICAÇÕES - $N_s = 3$	72
TABELA 5.11 - DESNÍVEIS OBTIDOS COM A ESTAÇÃO TOTAL TC 403L	73
TABELA 5.12 – PRECISÃO (mm) TC 403L X ESPECIFICAÇÕES - $N_s = 6$	74
TABELA 5.13 – CONTRA-NIVELAMENTO COM A ESTAÇÃO TOTAL ELTA S20	75
TABELA 5.14 - DESNÍVEIS OBTIDOS COM A ESTAÇÃO TOTAL ELTA S200 EM COMPRIMENTOS DE VISADAS DESIGUAIS	76
TABELA 5.15 – DESNÍVEL RN-50A PARA RN-51 CALCULADO COM $K= 0,13$ E MODELO DE TURBULÊNCIA INSTÁVEL	78
TABELA 5.16 – DESNÍVEL RN-50A PARA RN-51 CALCULADO COM $K= 0,13$	81

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS
$\beta$	ângulo de refração vertical
c	efeito da curvatura terrestre
CN	contra-nivelamento
$C_p$	calor específico
CPGCG	CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS
$c_r$	efeito da refração
$\Delta D'$	correção atmosférica para a distância observada (ppm)
$\Delta H$	desnível entre dois pontos.
D	distância horizontal
$D'$	distância inclinada
DIN	DEUTSCHER INSTITUT FÜR NORMUNG
$D_v$	distância vertical
$\varepsilon$	erro de colimação
e	pressão parcial do vapor d'água (mb)
E	perda de calor devido à evaporação da água do solo
$E_c$	ponto interseção dos eixos da Estação Total
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
F	fluxo de troca de calor ( $w/m^2$ )
g	aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )
G	energia transferida ao solo
GPS	GLOBAL POSITIONING SYSTEM
H	altitude
h	altura
$h_s$	altura do alvo
$h_{av}$	altura do anemômetro
$h_i$	altura do instrumento
$h_r$	umidade relativa
IBGE	INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA
ISO	INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION
K	distância em quilômetros, média de N e CN

k	coeficiente de refração
L	altura de Obukhov
LAIG	LABORATÓRIO DE INSTRUMENTAÇÃO GEODÉSICA
LASER	light amplification by stimulated emission of radiation
L <sub>R</sub>	leitura de ré
L <sub>V</sub>	leitura de vante
M	ampliação do telescópio do instrumento
m	massa molecular do gás (kg.mol)
N	nivelamento
N <sub>a</sub>	índice de refatividade do ar
NAVSTAR	NAVigation System with Time And Ranging
NG	nivelamento geométrico
n <sub>i</sub>	índice de refração da camada i
N <sub>p</sub>	índice de refatividade nas condições padrão
N <sub>s</sub>	número de séries (PD-PI)
P	pressão (mb)
PD	posição direta de leitura
PI	posição inversa de leitura
ρ	densidade do gás
ℜ	constante universal dos gases [(kg.mol) <sup>-1</sup> T <sup>-1</sup> ]
R	raio da Terra
RN	referência de nível
RRNN	referências de nível
R <sub>s</sub>	radiação na superfície do solo
r <sub>s</sub>	rugosidade média da superfície do solo
σ	desvio padrão
σ <sup>2</sup>	variância
σ <sub>D'</sub>	precisão nominal linear
σ <sub>Z</sub>	precisão nominal angular (refere-se ao círculo vertical)
s	segundo
SGB	SISTEMA GEODÉSICO BRASILEIRO
SIRGAS	SISTEMA DE REFERÊNCIA GEOCÊNTRICO PARA AS AMÉRICAS
Θ	temperatura potencial
T	temperatura (°K)

t	temperatura seca (°C)
u	velocidade do vento na linha de visada (m/s)
u*	velocidade de atrito do ar (m/s)
UFPR	UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
V	volume de um grama-mol do gás
Vk	constante de Von Karmann
Z	ângulo zenital
z <sub>0</sub>	erro de zênite instrumental

## RESUMO

Os avanços da microeletrônica aplicada ao instrumental utilizado em Topografia e Geodésia permitiram o desenvolvimento de equipamentos precisos, leves e de manuseio prático, como as Estações Totais, que vieram a facilitar, sobremaneira, os trabalhos de levantamento de campo. Com tais características, surge uma questão: a obtenção de desníveis de precisão utilizando o método de nivelamento trigonométrico com Estação Total. Neste trabalho, pesquisou-se a acurácia na determinação de desníveis empregando-se Estações Totais classificadas pela ABNT como de baixa, média e de alta precisão, em comparação com os desníveis obtidos pelo método do nivelamento geométrico de precisão estabelecido segundo as Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos do IBGE. Pesquisou-se, também, o efeito da refração na observação do ângulo vertical, bem como os procedimentos a serem adotados para minimizar tal efeito.

**Palavras-chave:** Desníveis, nivelamento geométrico, nivelamento trigonométrico, refração.

## ABSTRACT

The advances of the microelectronics applied to the instruments used in Topography and Geodesy have led to the development of precise, light and easy handling equipments, as the Total Stations, which have enormously facilitated the field work. With such characteristics, an issue raises: the achievement of the precise difference in elevation when using the method of trigonometric leveling with Total Station. A research was carried out in order to find out the accuracy in the determination of elevation difference by trigonometric leveling using Total Stations classified by the ABNT as of low, medium and high precision - in comparison with the elevation difference obtained by the method of the differential leveling established in accordance with the General Specifications and Norms for Geodetic Surveys of the IBGE. Not only the effect of refraction in the vertical angle was researched but also the procedure to be adopted to minimize its effect.

**Keywords:** Difference in elevation, Differential leveling, Trigonometric leveling, refraction.



## 1 INTRODUÇÃO

O nivelamento geométrico é a metodologia tradicionalmente utilizada quando se trata da determinação de desníveis de precisão, segundo a Resolução da Presidência do IBGE nº 22, de 21/07/1983, ainda em vigor, que aprovou as Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos.

Com o desenvolvimento da microeletrônica aplicada ao instrumental utilizado em Topografia e Geodésia, surgiram as Estações Totais: equipamentos precisos, leves, de manuseio prático e que facilitam, sobremaneira, os trabalhos de levantamento de campo. Com tais características, surge uma questão até então pouco pesquisada: obtenção de desníveis de precisão utilizando o método de nivelamento trigonométrico.

Faggion et al. (2003), objetivando atingir precisão, com alto rendimento e baixo custo, propõem o emprego do nivelamento trigonométrico com a minimização dos efeitos provocados pelas principais fontes de erro inerentes ao método, que são: medidas da altura do instrumento e da altura do sinal, tendo em vista que os procedimentos para determinação dessas variáveis são de baixa precisão.

A proposta deste trabalho é, com base no procedimento supracitado, utilizar estações totais: de alta, média e baixa precisão (ABNT-NBR 13133, 1994) com o objetivo de verificar a acurácia alcançada, bem como realizar estudos sobre o efeito da refração atmosférica na determinação dos ângulos zenitais, uma das principais limitações do método.

Para viabilizar o experimento proposto, selecionou-se 6 referências de nível - RRNN – da rede implantada no Campus III (Centro Politécnico) da UFPR, com desníveis determinados pelo método do nivelamento geométrico, visadas iguais, utilizando-se o nível digital NA-3003. Essas RRNN são as referências para este trabalho, servindo de base de comparação para os desníveis a serem determinados com as Estações Totais, com o objetivo de testar a metodologia proposta.

Para realização dos estudos sobre o efeito da refração atmosférica na determinação dos ângulos zenitais, foram programados dois levantamentos em épocas de distintas condições meteorológicas, na barragem de Salto Caxias, localizada no Município de Capitão Leônidas Marques/PR.

## 1.1 HIPÓTESE DE TRABALHO

Se os efeitos da incerteza na determinação das alturas do instrumento (Estação Total) e do sinal (prisma) forem eliminados com a utilização de bastões de mesma altura, o efeito da curvatura terrestre determinado e, além disso, se for minimizada a influência da refração no ângulo zenital, então é factível a obtenção de acurácia na determinação de desníveis com o nivelamento trigonométrico.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Determinar desníveis de precisão utilizando o método do nivelamento trigonométrico com Estação Total.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver uma metodologia visando à obtenção de desníveis classificados como de precisão, segundo as Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos do IBGE, utilizando-se Estações Totais de diferentes precisões nominais.
- Comparar desníveis obtidos pelo método do nivelamento trigonométrico, utilizando estações totais, com desníveis obtidos por nivelamento geométrico;
- Avaliar as limitações do método quando se utiliza visadas de igual comprimento e quando se utiliza visadas com comprimentos desiguais;
- Realizar uma pré-análise para determinar a precisão dos desníveis a serem obtidos em função da precisão nominal das estações totais;
- Avaliar as limitações do método quanto ao comprimento da visada e quanto a variação do ângulo zenital;
- Avaliar a influência do erro sistemático causado pela refração na observação do ângulo zenital.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

Estabelecimento de uma metodologia alternativa na obtenção de desníveis de precisão com o emprego de Estações Totais existentes no mercado.

Atualmente as especificações e normas que regem os levantamentos no Brasil estabelecem que, na determinação de desníveis de precisão, deve ser utilizado o método do nivelamento geométrico, empregando-se equipamentos (níveis geodésicos, miras de invar) que só podem ser utilizados para esse fim. O Brasil, país de dimensões continentais, necessita de metodologias alternativas que viabilizem maior rendimento na densificação da rede altimétrica fundamental. A metodologia aqui proposta é ágil, envolve menos logística e tempo do que a metodologia que vem sendo aplicada até o momento.

### 1.4 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

No capítulo 2 é feita uma breve descrição do método do nivelamento geométrico, os erros inerentes ao método e as recomendações para obtenção de acurácia. Descreve-se também o método do nivelamento trigonométrico, o efeito da curvatura terrestre e o efeito da refração na medição do ângulo vertical. Apresentam-se, também, os erros inerentes à estação total, uma descrição da precisão nominal do equipamento e, com base na teoria de propagação dos erros aleatórios, demonstra-se a precisão esperada em função da distância e do ângulo zenital medidos. Finalmente apresentam-se estudos de modelos de transferência de turbulência, desenvolvidos na área da micrometeorologia, que objetivam descrever os processos que governam o gradiente de temperatura na baixa atmosfera e sua relação com a refração do ângulo zenital.

No capítulo 3 descreve-se a metodologia empregada para a obtenção dos desníveis e do efeito da refração na distância medida.

No capítulo 4 apresenta-se a calibração do conjunto bastão – prisma, utilizando-se um interferômetro a LASER, disponível no Laboratório de Instrumentação Geodésica, da UFPR.

No capítulo 5 são apresentados os experimentos realizados e os resultados obtidos.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões e recomendações.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O propósito do nivelamento, em sua definição mais simples, é determinar desníveis de pontos selecionados. Há vários métodos para a obtenção de desníveis e que envolvem o emprego de vários tipos de instrumentação: barométrico, geométrico e trigonométrico.

### 2.1 LEVANTAMENTOS ALTIMÉTRICOS

Segundo IBGE (2005) a determinação de desníveis de precisão desenvolve-se na forma de circuitos, servindo por ramais às cidades, vilas e povoados às margens das mesmas e distantes até 20 km. Os demais levantamentos estarão referenciados ao de alta precisão. Os métodos utilizados para realizar os levantamentos podem ser assim classificados (IBGE, 2000):

- Nivelamento Geométrico: É o método usado nos levantamentos altimétricos de alta precisão que se desenvolvem ao longo de rodovias e ferrovias. No Sistema Geodésico Brasileiro - SGB, os pontos cujas altitudes foram determinadas a partir de nivelamento geométrico são denominados referências de nível (RRNN).
- Nivelamento Trigonométrico: Baseia-se em relações trigonométricas. É menos preciso que o geométrico, fornece apoio altimétrico para os trabalhos topográficos.
- Nivelamento Barométrico: Baseia-se na relação inversamente proporcional entre pressão atmosférica e altitude. É o de menor precisão, usado em regiões onde é impossível utilizar-se os métodos acima.

#### 2.1.1 Levantamentos Altimétricos com GPS

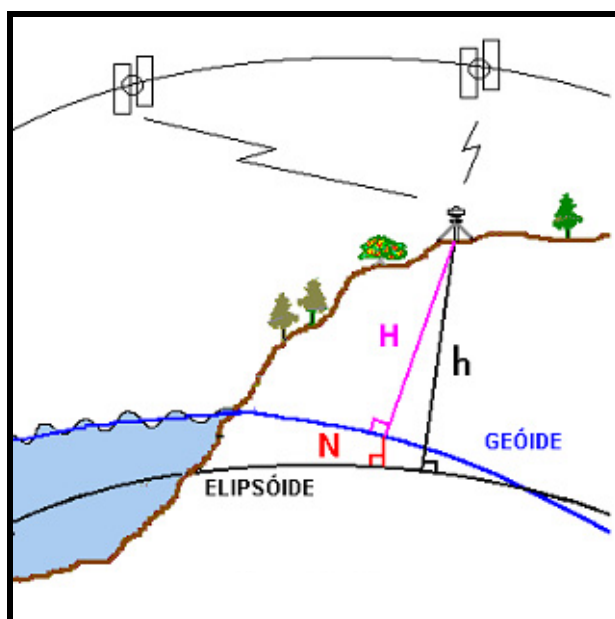
O NAVSTAR GPS – NAVigation System with Time And Ranging Global Positioning System - como outras técnicas de geodésia espacial, fornece coordenadas X, Y e Z que podem ser transformadas em coordenadas elipsoidais: latitude, longitude e altitude geométrica – distância do ponto ao elipsóide contada ao longo da normal. Essa componente vertical é particularmente sensível à

configuração geométrica dos satélites GPS e aos efeitos da refração atmosférica (SEEBER, 2003).

A altitude geométrica é afetada pelo modo (técnica) de levantamento e pela observável utilizada no levantamento GPS. Utilizando-se de técnicas de levantamentos e de combinações de procedimentos de processamentos, a precisão da altitude geométrica esperada é de 1,5 a 2 vezes menos acurada que as componentes horizontais (FEATHERSTONE ET AL, 1998) apud (ARANA, 2005).

A altitude proporcionada pelo GPS (geométrica) tem apenas um significado matemático. Na maioria dos trabalhos de posicionamento, obras de engenharia, levantamentos geodésicos e topográficos, são utilizadas as altitudes ortométricas - referenciadas ao geóide, por possuírem um significado físico. Surge então a necessidade de transformar a altitude geométrica, obtida do GPS, em altitude ortométrica. Esta transformação, do ponto de vista matemático, constitui-se numa operação simples, envolvendo a altitude geométrica ( $h$ ) e a altura geoidal ( $N$ ) no ponto (ARANA, 2005). Conforme pode ser visto na figura 2.1, a altitude ortométrica ( $H$ ) e a geométrica ( $h$ ) estão relacionadas por:  $H \cong h - N$

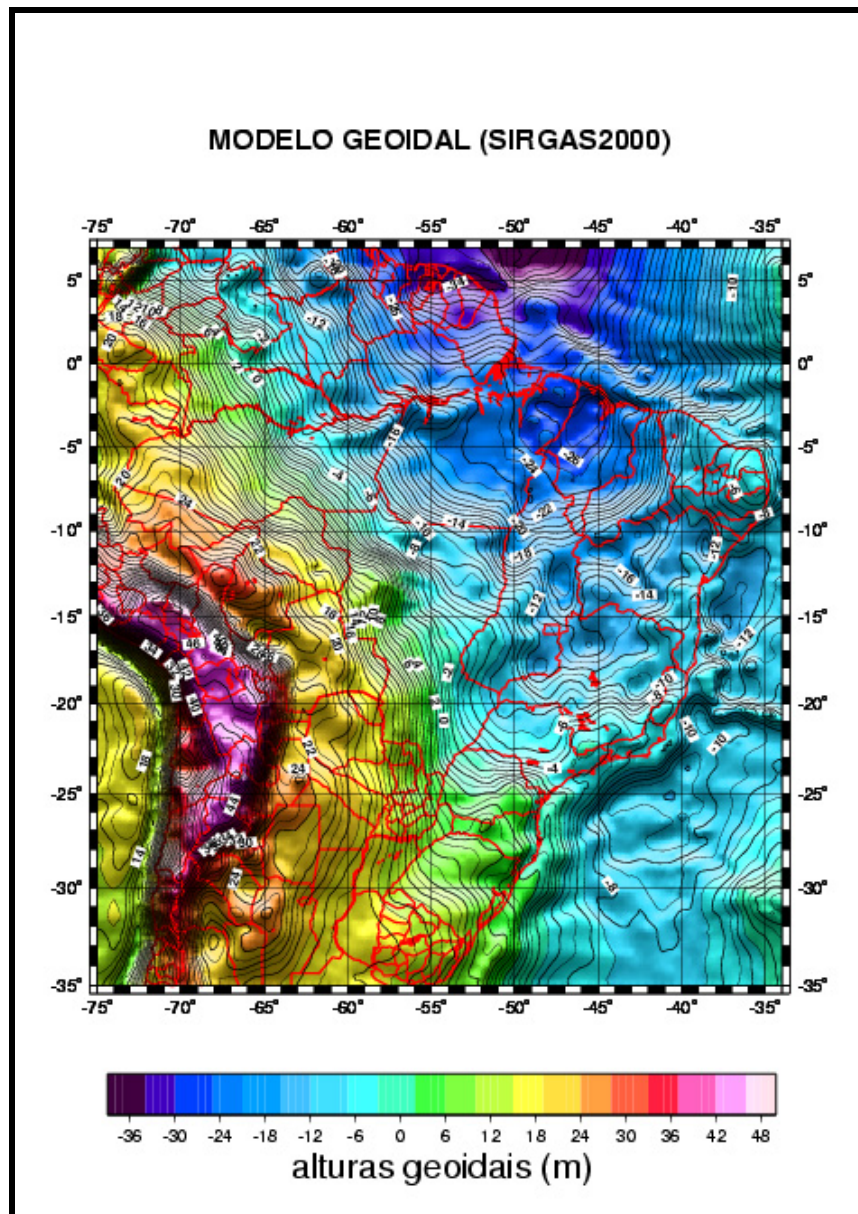
FIGURA 2.1 – ALTITUDE GEOMÉTRICA E ORTOMÉTRICA



FONTE: IBGE (2005)

O IBGE, por intermédio da Coordenação de Geodésia, e a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo- EPUSP, geraram um Modelo de Ondulação Geoidal com uma resolução de 10' de arco e desenvolveram o Sistema de Interpolação de Ondulação Geoidal - MAPGEO2004. Através desse sistema, os usuários podem obter a ondulação geoidal (N) em um ponto, e/ou conjunto de pontos, referida aos sistemas SIRGAS2000 (Figura 2.2) e SAD69.

FIGURA 2.2 – MODELO GEOIDAL SIRGAS 2000



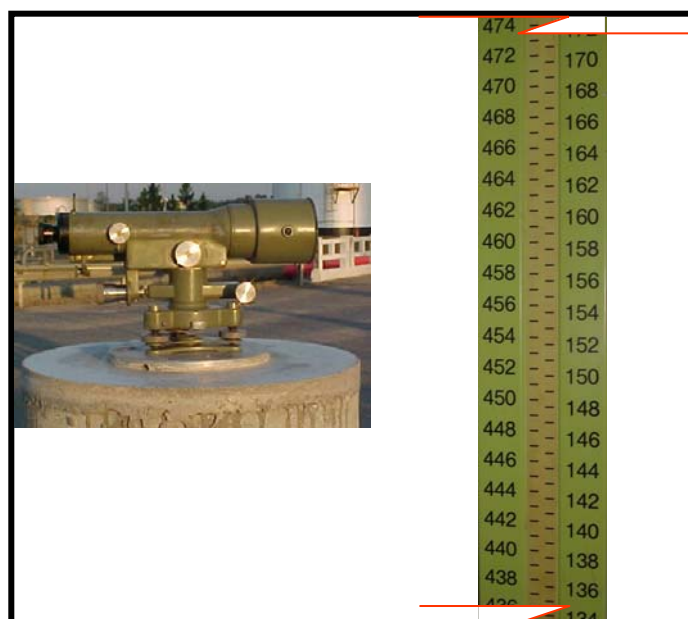
O erro médio padrão associado ao modelo MAPGEO2004 foi de +/- 0,5 metro, determinado a partir das comparações de altitudes GPS com altitudes de referências de nível (altitudes obtidas através de nivelamento geométrico) do IBGE. Isso significa que no Brasil, poderão ocorrer erros maiores que 0,5 metro, em regiões onde existe carência de informações para subsidiar a elaboração do modelo, como por exemplo, a Região Amazônica (IBGE, 2005).

A determinação da altitude a partir de  $H \cong h - N$  é adequado para diversas aplicações onde o nível de precisão requerido é próximo ao proporcionado pelo modelo geoidal. No entanto, a determinação de altitudes ortométricas via GPS, visando substituir o nivelamento geométrico de precisão, ainda é um objetivo de longa duração (MONICO, 2000). Informações adicionais quanto a determinação de altitudes com GPS o leitor interessado pode encontrar em Arana (2005).e Castro (2002).

## 2.2 NIVELAMENTO GEOMÉTRICO

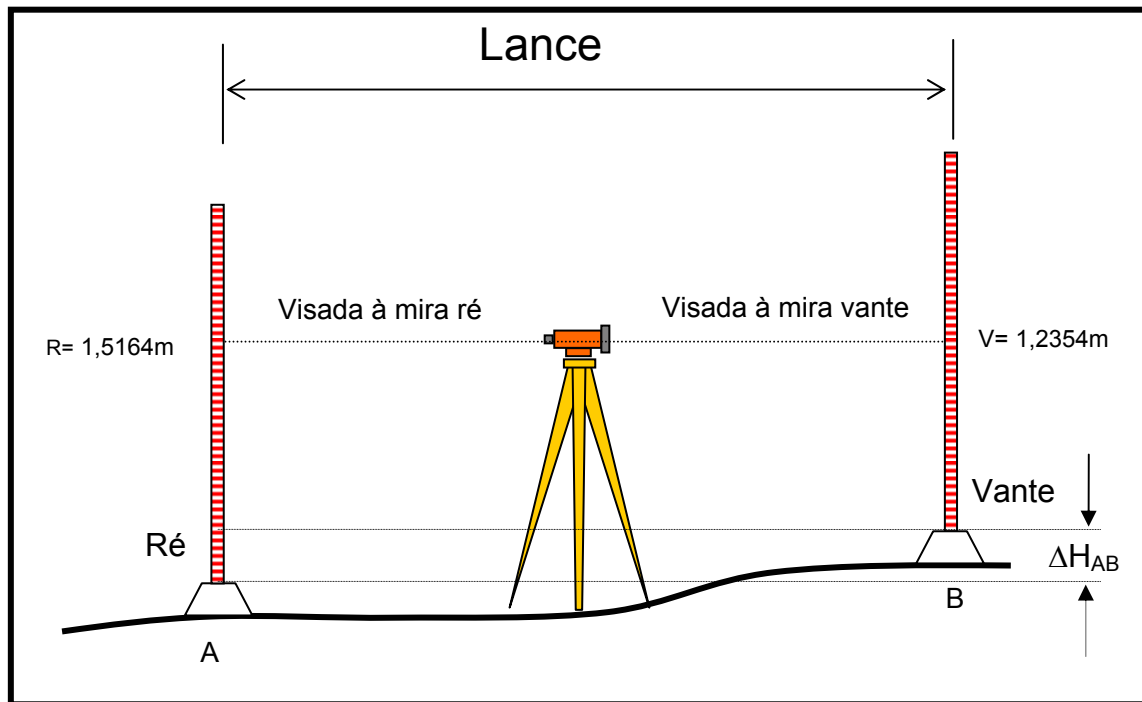
É o método de determinação de desníveis mediante visadas horizontais, obtidas com o instrumento de medição - nível topográfico, dirigidas a miras graduadas verticais (Figura 2.3).

FIGURA 2.3 - NÍVEL E DETALHE DA MIRA



Os pontos a serem nivelados são ocupados pelas miras verticais, com o nível estacionado em posição eqüidistante entre os pontos (Figura 2.4).

FIGURA 2.4 – NIVELAMENTO GEOMÉTRICO



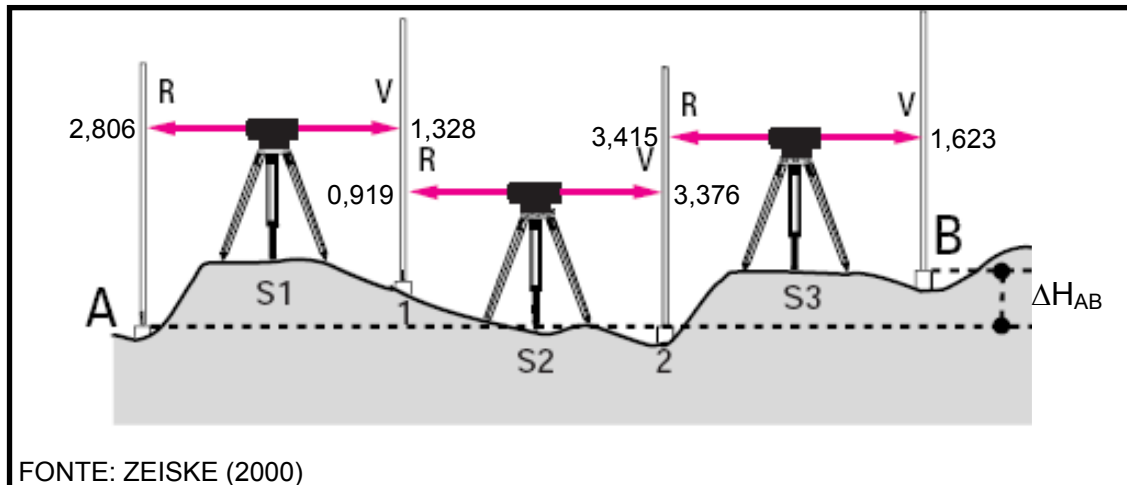
O zero da graduação da mira está em seu ponto inferior, portanto a diferença de nível, ou desnível, obtém-se subtraindo a leitura da mira de ré pela leitura da mira de vante.

$$\Delta H = R - V = 1,5164\text{m} - 1,2354\text{m} = 0,2810\text{m}$$

A Figura 2.5 mostra um esquema simplificado de determinação de desnível, em mais de um lance, com nivelamento geométrico. Na figura estão registradas as leituras de ré e vante de cada mira.



FIGURA 2.5 – ESQUEMA DE DESNÍVEL EM MAIS DE UM LANCE



A soma algébrica dos desníveis parciais, entre pontos consecutivos, resulta no desnível  $\Delta H_{AB}$  entre os pontos A e B (Quadro 2.1).

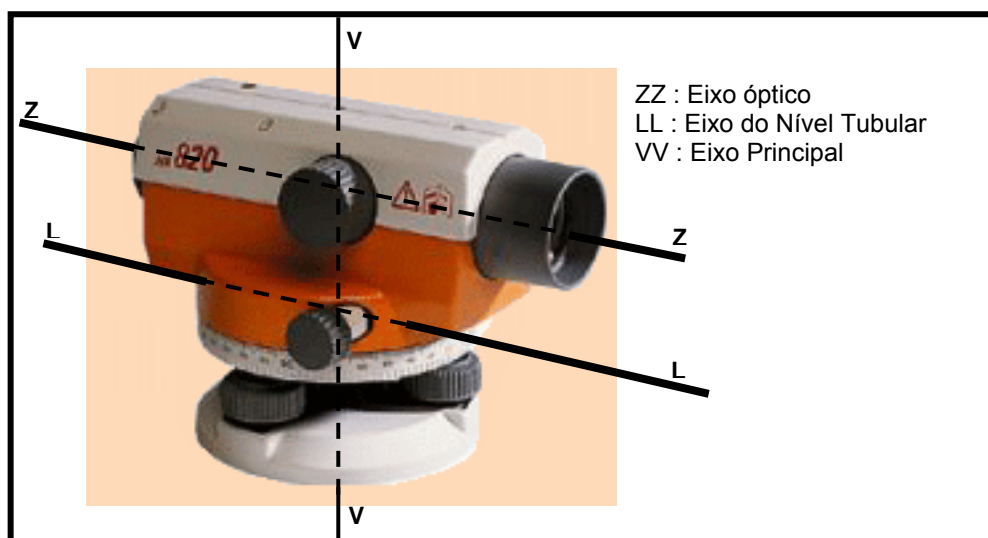
QUADRO 2.1 – CÁLCULO DO DESNÍVEL

ESTAÇÃO	RÉ	VANTE	$\Delta H$ do LANCE
S1	2,806	1,328	1,478
S2	0,919	3,376	-2,457
S3	3,415	1,623	1,792
SOMA	7,140	6,327	<b><math>\Delta H_{AB} = 0,813</math></b>

### 2.2.1 Fontes de Erros no Nivelamento Geométrico.

Os erros instrumentais de um nível, estão relacionados com seu sistema de eixos (Figura 2.6). O eixo do nível tubular (LL) refere-se aos níveis mecânicos, os níveis automáticos utilizam um sistema de pêndulo.

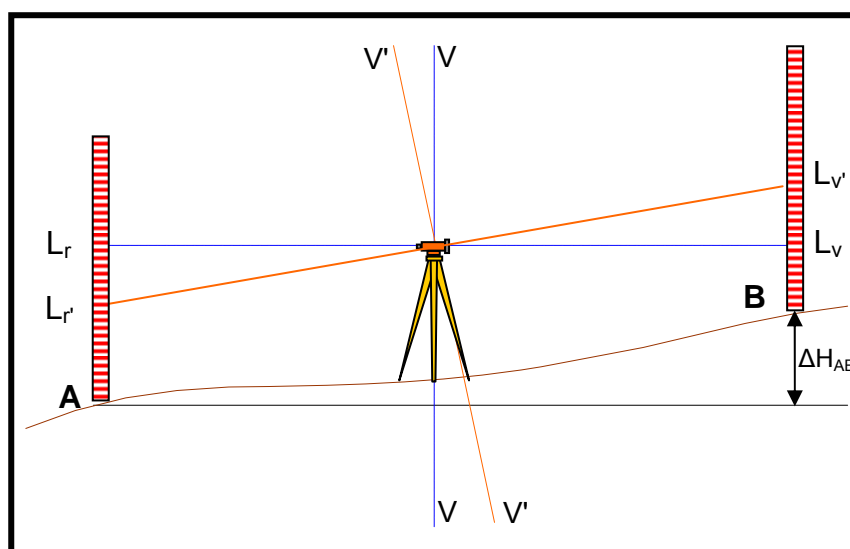
FIGURA 2.6 - SISTEMA DE EIXOS DOS NÍVEIS



FONTE: VEIGA; FAGGION, (2004)

- Erro de verticalidade do eixo principal (Figura 2.7): ocorre quando o nível tubular não está perfeitamente horizontalizado, então o eixo principal do instrumento não coincide com a vertical. Este erro impossibilita a obtenção da linha horizontal de visada.

FIGURA 2.7 - ERRO DE VERTICALIDADE



onde:  $V'V'$  = eixo principal do nível

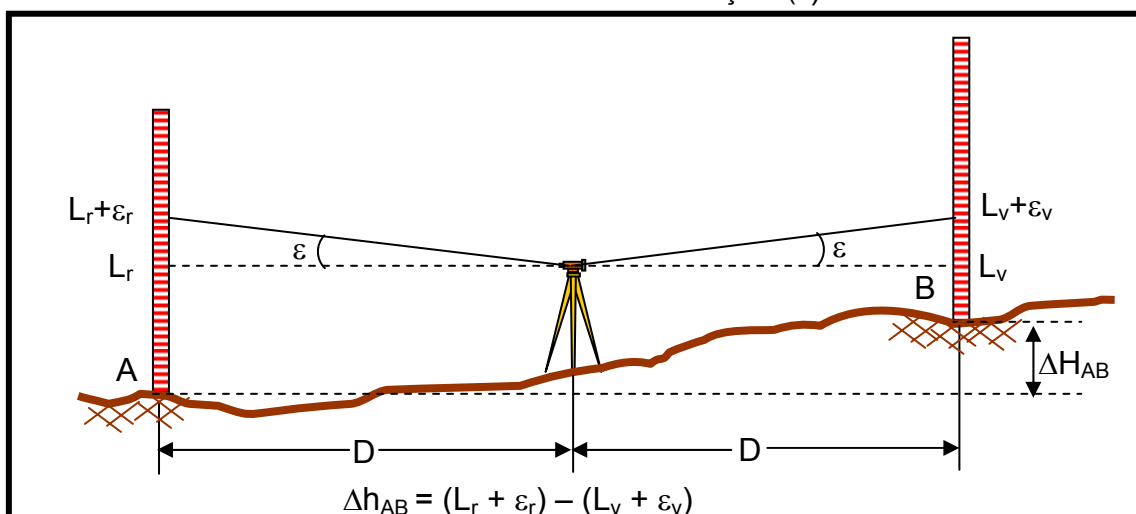
$VV$  = vertical do lugar

$L_r$  e  $L_v$  = leituras de ré e vante, respectivamente, eivadas do erro de verticalidade.

$L_r$  e  $L_v$  = leituras de ré e vante, respectivamente, isentas do erro de verticalidade.

- Erro de colimação: ocorre quando a linha de visada não está paralela ao eixo óptico (Figura 2.8).

FIGURA 2.8 - ERRO DE COLIMAÇÃO ( $\varepsilon$ )



onde:  $L_r$  e  $L_v$  = leituras em ré e vante, respectivamente

$\varepsilon_r$  e  $\varepsilon_v$  = erro de colimação em ré e vante, respectivamente.

Como o erro de colimação é proporcional à distância e o nivelamento geométrico de precisão utiliza visadas iguais (distância da visada de ré igual a de vante), obtém-se:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_v$$

$$\Delta h_{AB} = L_r + \cancel{\varepsilon_r} - (L_v + \cancel{\varepsilon_v})$$

$$\Delta h_{AB} = L_r - L_v$$

- Erro de verticalidade da mira: ocorre quando o nível esférico, localizado na parte posterior da mira, não permite a coincidência da mira com a vertical. Verificação e correção encontram-se em Faggion (1993) e Alencar (1985).
- Erro de graduação da mira: ocorre na gravação da fita de ínvar quando de sua fabricação, ou devido discrepâncias em seu comprimento causadas pelo tempo e pelo uso. As miras de ínvar devem ser calibradas periodicamente e emitidos certificados de calibração (FAGGION, 1993).
- Erro de índice da mira: ocorre no processo de colocação da escala de ínvar no corpo da mira. Não se pode garantir que o zero da escala coincida rigorosamente com a base da mira (D' ALGE, 1986).

Considerações sobre efeitos da refração no nivelamento geométrico, reverberação, curvatura dos geopes e campos magnéticos, podem ser encontradas em D' Alge (1986).

### 2.2.2 Recomendações Usuais nas Operações de Nivelamento Geométrico

As seguintes recomendações são apresentadas em IBGE (2000) que objetivam minimizar os erros sistemáticos, comuns nas operações de nivelamento geométrico:

- Comprimento das visadas de ré e vante devem ser aproximadamente iguais, de modo a minimizar os efeitos de curvatura da Terra, da refração atmosférica e do não paralelismo do eixo óptico com o eixo do nível tubular – erro de colimação (Figura 2.8).
- Para se evitar os efeitos da reverberação, as leituras mínimas nas miras deverão situar-se acima de 50 cm (tolerando-se valores menores para visadas curtas).
- As miras deverão ser utilizadas aos pares, tomando-se o cuidado de alterná-las a ré a vante, de modo que a mira posicionada no ponto de partida (lida a ré) seja posicionada no ponto de chegada (lida a vante). Com isso elimina-se o erro de índice das miras.

- As miras devem ser colocadas sobre as chapas ou pinos e, no caminhamento, sobre sapatas (Figura 2.9) nunca diretamente sobre o solo.
- Para evitar os efeitos do movimento da mira, causado pelo vento, as leituras devem ser realizadas no limite máximo de 2,5 metros

FIGURA 2.9 – MIRA SOBRE A SAPATA



Aos leitores interessados no assunto, encontrarão em Alencar (1985), IBGE (2000) e D' Alge (1986) completa descrição do método de nivelamento geométrico.

### 2.3 REDE ALTIMÉTRICA

É formada por estações altimétricas, denominadas referências de nível – RNNN (Figura 2.10) materializadas no terreno. A materialização se dá por marcos de concreto, com profundidade máxima de 80 cm abaixo do solo e altura máxima de 20 cm acima do solo, encimados por chapas metálicas circulares e convexas fixadas em seu topo (figura 2.11). Ou então por chapas cravadas em superfícies estáveis, como afloramentos rochosos, calçadas com espessura adequada, sapatas de sustentação de grandes estruturas de engenharia etc. (IBGE, 2000).

FIGURA 2.10 – REFERÊNCIA DE NÍVEL - RN



FIGURA 2.11 – CHAPA METÁLICA - REFERÊNCIA DE NÍVEL – RN 2053-D

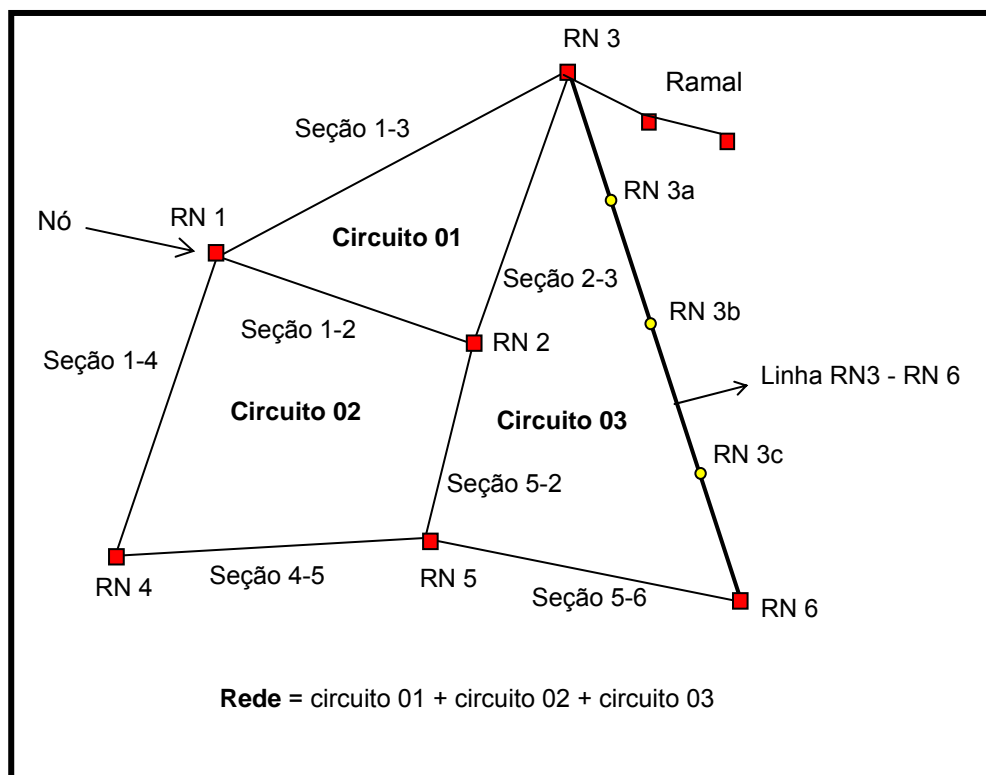


As redes altimétricas são estabelecidas por intermédio do nivelamento geométrico que se desenvolve em forma de circuitos (Figura 2.12). Os elementos de um circuito são (IBGE, 2000):

- seção: trecho nivelado entre RRNN consecutivas.
- nó: Referência de nível - RN - pertencente a três ou mais seções (exceto RN de ramal).
- linha: seqüência de seções entre dois nós.
- circuito: perímetro fechado definido por uma seqüência de linhas.

- ramal: seqüência de seções que não caracteriza uma linha, pois não há possibilidade de verificação do erro de fechamento.

FIGURA 2.12 – REDE ALTIMÉTRICA



Outros elementos referentes aos levantamentos de campo:

- estações intermediárias: pontos ocupados pelas miras, definidos pelas sapatas ou pino removíveis, durante o levantamento de uma seção.
- linha de visada: percurso óptico entre o nível e a mira.
- posição do nível: ponto onde se instala o instrumento nivelador entre as miras.
- Lance: intervalo entre miras a ré e a vante.

A qualidade dos trabalhos deverá ser controlada pela diferença entre o nivelamento (N) e o contra-nivelamento (CN) de cada seção, observando-se os seguintes limites (IBGE, 1983):

- |                      |  |
|----------------------|--|
| $3\text{mm}\sqrt{K}$ | para os levantamentos de alta precisão.          |
| $6\text{mm}\sqrt{K}$ | para os de precisão em áreas mais desenvolvidas. |
| $8\text{mm}\sqrt{K}$ | para áreas menos desenvolvidas.                  |

Onde:

$K$  = comprimento da seção em quilômetros (valor médio de  $N$  e  $CN$ ).

## 2.4 REDE ALTIMÉTRICA DO SISTEMA GEODÉSICO BRASILEIRO

Os trabalhos de Nivelamento Geométrico de Alta Precisão no Brasil (IBGE, 2005) iniciaram-se no Distrito de Cocal, Município de Urussanga, Santa Catarina, em 13 de Outubro de 1945, dando partida ao estabelecimento da Rede Altimétrica (Figura 2.13) do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), onde está localizada a Referência de Nível RN 1-A.

FIGURA 2.13- REDE ALTIMÉTRICA BRASILEIRA.



FONTE: IBGE (2000)



A conexão com a Estação Maregráfica de Torres, Rio Grande do Sul em dezembro de 1946, permitiu o cálculo das altitudes das Referências de Nível já implantadas. Iniciava-se, assim, a implantação de uma estrutura altimétrica fundamental, destinada a apoiar o mapeamento e servir de suporte às grandes obras de engenharia, sendo de vital importância para projetos de saneamento básico, irrigação, estradas e telecomunicações.

Em 1958, o Datum de Torres foi substituído pelo Datum de Imbituba, definido pela estação maregráfica do porto da cidade de mesmo nome, em Santa Catarina. Tal substituição ensejou uma sensível melhoria de definição do sistema de altitudes, uma vez que a estação de Imbituba contava na época com nove anos de observações, bem mais que o alcançado pela estação de Torres.

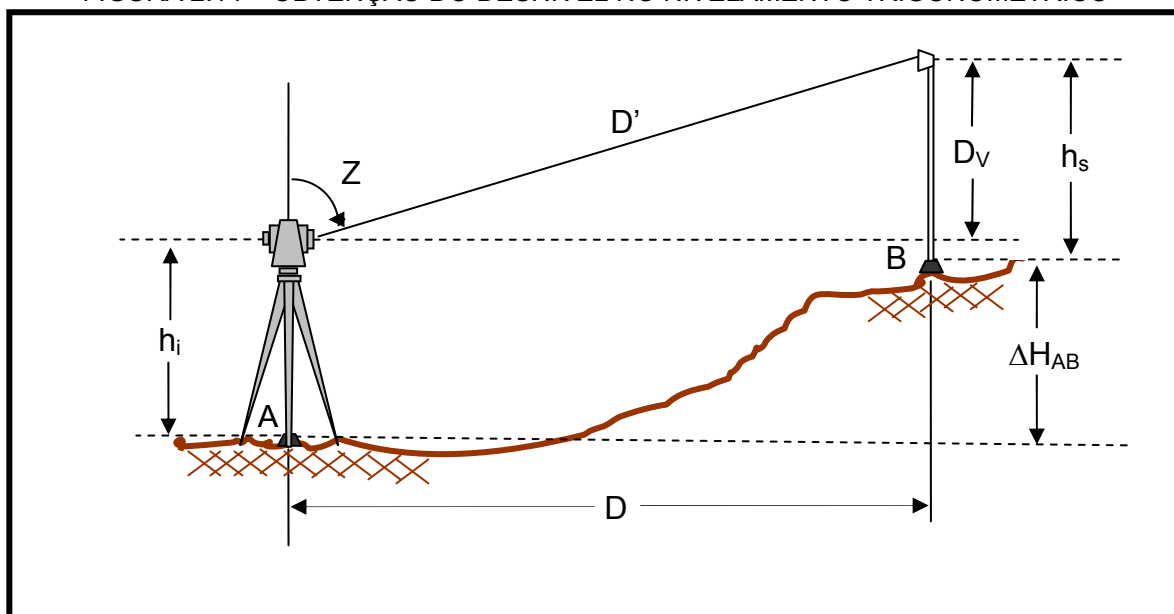
Internacionalmente os sistemas de referência altimétricos nacionais são definidos classicamente por intermédio de estações maregráficas e realizados pelas redes observadas por nivelamento geométrico. Com o desenvolvimento do projeto Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas - SIRGAS - que compreende as atividades necessárias à adoção no continente de um sistema de referência de precisão compatível com as técnicas atuais de posicionamento, notadamente as associadas ao Sistema de Posicionamento Global (GPS), que, no futuro, estas redes sejam observadas por GPS e referidas diretamente ao geóide. Permitirá, além de garantir a homogeneização de resultados internamente ao continente, uma integração consistente com as redes dos demais continentes, contribuindo cada vez mais para o desenvolvimento de uma geodésia de caráter "global".

Aos leitores interessados no assunto, a complementação deste conteúdo pode ser encontrada em IBGE (2005).

## 2.5 NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO

Neste método a diferença de nível entre pontos é obtida por intermédio da resolução de triângulos retângulos, fundamentada na relação trigonométrica entre ângulos e distâncias. Na Figura 2.14 tem-se um exemplo de determinação de desnível com nivelamento trigonométrico.

FIGURA 2.14 – OBTENÇÃO DO DESNÍVEL NO NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO



Sendo:

$Z$  = ângulo zenital

$D'$  = distância inclinada do instrumento ao alvo

$D$  = distância horizontal

$h_i$  = altura do instrumento

$h_s$  = altura do alvo

$\Delta H_{AB}$  = desnível de A para B

$D_v$  = distância vertical

### 2.5.1 Equação Básica do Nivelamento Trigonométrico

Para se determinar o desnível de A para B, por trigonometria (KAHMEN; FAIG, 1988), a distância  $D'$ , o ângulo zenital  $Z$ , a altura do instrumento  $h_i$  e a altura do alvo  $h_s$  têm que ser medidos. As medições de  $Z$  e  $D'$  são de fácil determinação com uma Estação Total e estão referenciadas ao mesmo ponto: a interseção dos eixos: secundário, óptico e vertical.

Da figura 2.14, verifica-se que:

$$h_i + Dv = \Delta H + h_s \rightarrow \Delta H = h_i + Dv - h_s$$

$$\text{sendo: } Dv = D' \cos Z. \quad (2.0)$$

Substituindo a segunda na primeira:

$$\Delta H = D' \cdot \cos Z + h_i - h_s \quad (2.1)$$

Essa equação só é válida em pequenas distâncias, considerando o plano como referência, não se levando em conta a curvatura da Terra, nem o efeito da refração no ângulo zenital. Para lances longos, visadas com distâncias maiores de 100m entre a estação total e o alvo, devem ser considerados os efeitos supracitados (GEMAEL, 1987).

### 2.5.2 Propagação dos Erros no Nivelamento Trigonométrico

Da teoria de propagação dos erros acidentais (CHRZANOWSKI, 1977), ou propagação de covariâncias (GEMAEL, 1994), para variáveis independentes (não correlacionadas) que é o caso das medidas:  $D'$ ,  $Z$ ,  $h_i$  e  $h_s$  e admitindo-se somente erros acidentais, a variância de  $\Delta H$  ( $\sigma_{\Delta H}^2$ ) é:

$$\sigma_{\Delta H}^2 = \left( \frac{\partial \Delta H}{\partial D'} \right)^2 \sigma_{D'}^2 + \left( \frac{\partial \Delta H}{\partial Z} \right)^2 \sigma_Z^2 + \left( \frac{\partial \Delta H}{\partial h_i} \right)^2 \sigma_{h_i}^2 + \left( \frac{\partial \Delta H}{\partial h_s} \right)^2 \sigma_{h_s}^2 \quad (2.2)$$

onde:

$\sigma_{D'}^2$ ,  $\sigma_Z^2$ ,  $\sigma_{h_i}^2$ ,  $\sigma_{h_s}^2$  são as variâncias de  $D'$ ,  $Z$ ,  $h_i$  e  $h_s$ , respectivamente

Aplicando-se (2.2) em (2.1):

$$\sigma_{\Delta H}^2 = \cos^2 Z \sigma_{D'}^2 + D'^2 \sin^2 Z \sigma_Z^2 + \sigma_{h_i}^2 + \sigma_{h_s}^2 \quad (2.3)$$

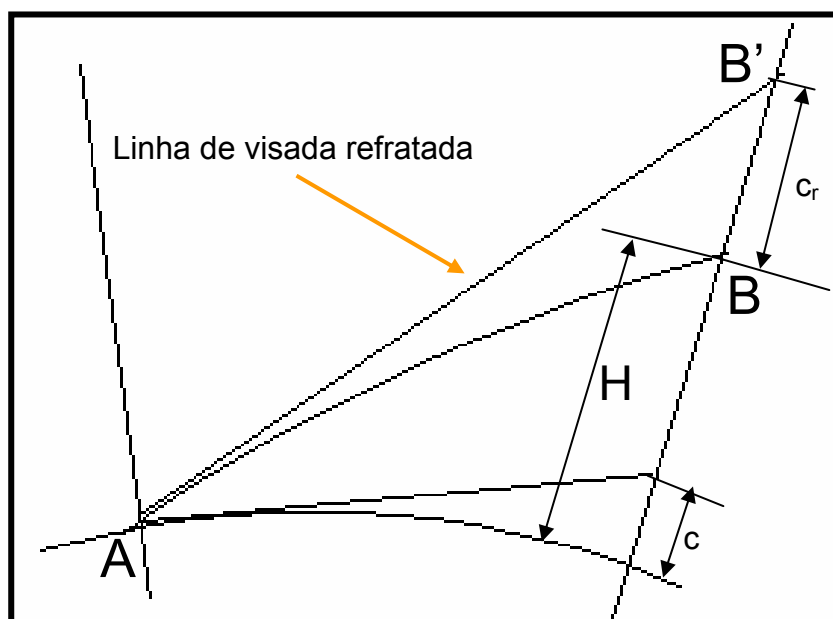
Na equação (2.3) têm-se as componentes da variância do desnível.

## 2.5.3 Curvatura Terrestre e Efeito da Refração

### 2.5.3.1 Curvatura terrestre

O efeito da curvatura ( $c$ ) (Figura 2.15) é determinado pela equação 2.4 (KAHMEN; FAIG, 1988), demonstrada em Jordan (1974).

FIGURA 2.15 - REPRESENTAÇÃO DA CURVATURA E DA REFRAÇÃO



ADAPTADO DE JORDAN(1974)

$$c = \frac{D^2}{2R} \quad (2.4)$$

onde:

D= distância horizontal entre os pontos

R= raio médio da Terra

c= efeito da curvatura terrestre

$c_r$ = efeito da refração

H= altitude de B

A TABELA 2.1 mostra o efeito da curvatura terrestre para algumas distâncias e compara com a tolerância admitida para o nivelamento de precisão e de alta precisão (IBGE, 1983), tomando  $R= 6.371$  km.

TABELA 2.1 - EFEITO DA CURVATURA TERRESTRE (c) E TOLERÂNCIA PARA O NIVELAMENTO GEOMÉTRICO DE PRECISÃO

<i>distância (m)</i>	100	200	300	400	500	1000
c (mm)	0,8	3,1	7,1	12,6	19,6	78,5
3mm√K	0,9	1,3	1,6	1,9	2,1	3,0
6mm√K	1,9	2,7	3,3	3,8	4,2	6,0
8mm√K	2,5	3,6	4,4	5,1	5,7	8,0

Para se verificar a que distâncias a curvatura supera as tolerâncias especificadas pelo IBGE para o nivelamento geométrico, faz-se  $K=D$  e calcula-se  $D$  nas equações abaixo:

$$c = \frac{D^2}{2R} > 3\text{mm}\sqrt{D} \quad \therefore D > 113,5\text{m}$$

$$c = \frac{D^2}{2R} > 6\text{mm}\sqrt{D} \quad \therefore D > 180,1\text{m}$$

$$c = \frac{D^2}{2R} > 8\text{mm}\sqrt{D} \quad \therefore D > 218,2\text{m}$$

Obtém-se, então, as distâncias limites onde, a partir daí, o efeito da curvatura da Terra é superior a tolerância mínima para cada classe de precisão do nivelamento.

### 2.5.3.2 Efeito da refração

O efeito da refração ( $c_r$ ) (Figura 2.13), é dado pela equação (KAHMEN; FAIG 1988), também demonstrada em Jordan (1974).

$$c_r = \frac{kD^2}{2R} \quad (2.5)$$

onde:

D = distância entre os pontos

R = raio da Terra

k = coeficiente de refração. No Brasil adota-se o valor de 0,13  
(Brasil, 1975)

Aplicando os efeitos da curvatura e refração na equação (2.1), obtém-se:

$$\Delta H = D' \cos Z + h_i - h_s + c - c_r \quad (2.6)$$

$$\Delta H = D' \cos Z + h_i - h_s + \frac{D^2}{2R} - \frac{kD^2}{2R}$$

$$\Delta H = D' \cos Z + h_i - h_s + \frac{D^2}{2R} (1 - k) \quad (2.7)$$

#### 2.5.4 Efeito Conjunto da Curvatura Terrestre e da Refração para Visadas Recíprocas e Simultâneas

Quando se realiza determinação de desnível utilizando o método de visadas recíprocas e simultâneas, o desnível é obtido pela média dos desníveis calculados de A para B, e de B para A, utilizando-se sempre o sinal do desnível obtido de A para B; ou seja, no sentido do caminhamento.

Aplicando-se esse conceito na equação 2.6, e considerando  $h_i = h_s$  e os ângulos zenitais  $Z_1$  e  $Z_2$ , obtém-se:

$$\Delta H_{AB} = D' \cos Z_1 + c - c_r \quad (2.8)$$

$$-\Delta H_{BA} = D' \cos Z_2 + c - c_r \quad (2.9)$$

subtraindo a equação (2.8) da equação (2.9):

$$2\Delta H = D' (\cos Z_1 - \cos Z_2) \quad \therefore$$

$$\Delta H = \frac{D'}{2} (\cos Z_1 - \cos Z_2) \quad (2.10)$$

A equação (2.10) permite o cálculo de  $\Delta H$ , para visadas recíprocas e simultâneas na medição dos ângulos zenitais, eliminando-se algebricamente os efeitos da refração e da curvatura terrestre.

#### 2.5.5 Determinação do Coeficiente de Refração – k

Conhecendo a distância entre dois pontos, bem como o desnível com precisão, e isolando-se k na equação (2.7), obtém-se:

$$k = \frac{2R}{D^2} (D' \cos Z - \Delta H + h_i - h_s) + 1 \quad (2.11)$$

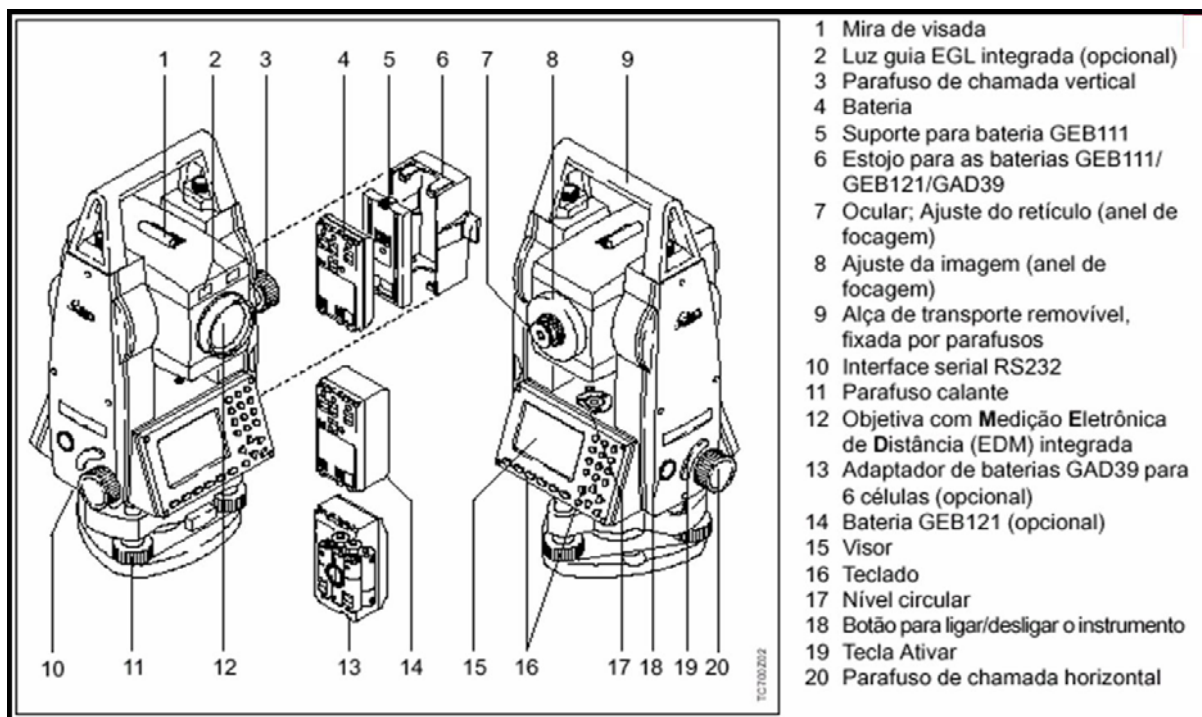
Outro modo de determinar k, consiste em observar ângulos zenitais recíprocos e simultâneos entre dois pontos com distância conhecida. A equação a seguir permite o cálculo de k (KAHMEN; FAIG, 1988):

$$k = 1 - \frac{Z_1 + Z_2 - 180}{180/\pi} \cdot \frac{R}{D} \quad (2.12)$$

## 2.6 ESTAÇÃO TOTAL

A Estação Total conjuga em um único equipamento: teodolito eletrônico, distanciômetro e microcomputador (Figura 2.16 ).

FIGURA 2.16 - PARTES PRINCIPAIS DE UMA ESTAÇÃO TOTAL



FONTE: LEICA TC 403L (1998)

A capacidade de armazenar os dados observados (o que elimina os erros de anotação) e a possibilidade de efetuar cálculos *in loco*, otimizam, sobremaneira, os trabalhos de campo. Contudo, para levantamentos que exigem acurácia, algumas questões têm que ser levadas em conta (DZIERZEGA; SCHERRER, 2003), a saber:

- Precisão nominal da Estação Total,
- diferença entre a leitura em uma posição e em duas posições (posição direta – PD, posição inversa – PI)
- influência dos erros instrumentais e como determiná-los
- influência da temperatura ambiente nas observações.

### 2.6.1 Erros Instrumentais

As observações com Estação Total constantes deste trabalho resumem-se a determinações de distâncias e ângulos zenitais, portanto serão apresentados apenas os erros inerentes a tais observações.

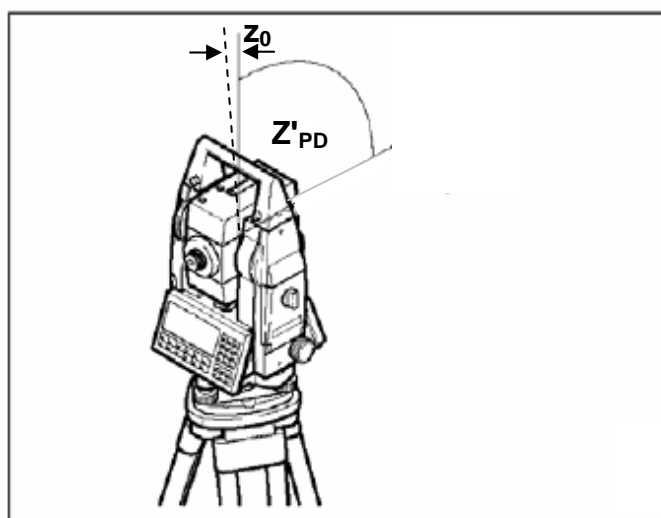


Os chamados erros instrumentais originam-se da fase de fabricação do equipamento. Alguns erros têm origem no longo tempo de uso e na falta de manutenção do equipamento. Informações mais completas sobre erros instrumentais podem ser encontradas, entre outros, em Kahmen; Faig (1988) e Medina (1998).

#### 2.6.1.1 Erro de zênite instrumental

Esse erro ocorre (Figura 2.17) quando, na medição do ângulo zenital, o zero da escala não coincide com o zênite .

FIGURA 2.17 - ERRO DE ZÊNITE INSTRUMENTAL ( $z_0$ )



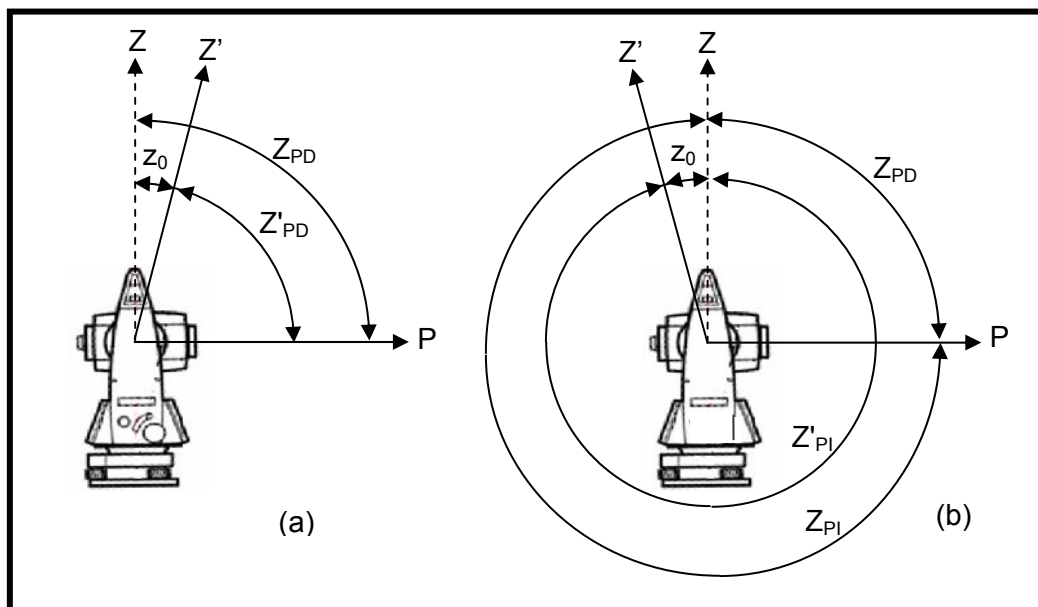
FONTE: ADAPTADO DE ZEISKE (2000)

Na medida do ângulo zenital é importante a realização das observações em posição direta e invertida da luneta para minimizar os efeitos do erro de zênite instrumental. Outra possibilidade de evitar a influência deste erro é determinar seu valor para posterior correção em todas as medições de distância zenital realizadas em somente uma posição da luneta.

A determinação do valor desse erro pode ser efetuada em laboratório ou em campo, procedendo-se da seguinte maneira:

- Com o teodolito na posição direta - PD, realiza-se a leitura do ângulo zenital ( $Z'_{PD}$ ) em um ponto (P) definido (Figura 2.18).

FIGURA 2.18 – LEITURAS DO ÂNGULO ZENITAL EM PD E EM PI



Da Figura 2.18 (a), obtém-se que:

$$Z_{PD} = Z'_{PD} + z_0 \quad (2.13)$$

Onde:

$Z_{PD}$  = Distância zenital em posição direta, isenta de erro;

$Z'_{PD}$  = Distância zenital em posição direta;

$z_0$  = Erro de zênite instrumental

- Repete-se a pontaria no ponto (P) na posição inversa (PI), procedendo-se a leitura do ângulo vertical ( $Z'_{PI}$ ) (Figura 2.18 (b)).

$$Z_{PD} = 360^\circ - Z'_{PI} - z_0 \quad (2.14)$$

Onde:

$Z_{PI}$  = Distância zenital em posição invertida, isenta de erro;

$Z'_{PI}$  = Distância zenital em posição invertida;

- Para obter o valor do erro de zênite instrumental, procede-se a subtração da equação (2.14) pela equação (2.13).

$$z_0 = \frac{360^\circ - Z'_{PI} - Z'_{PD}}{2} \quad (2.15)$$

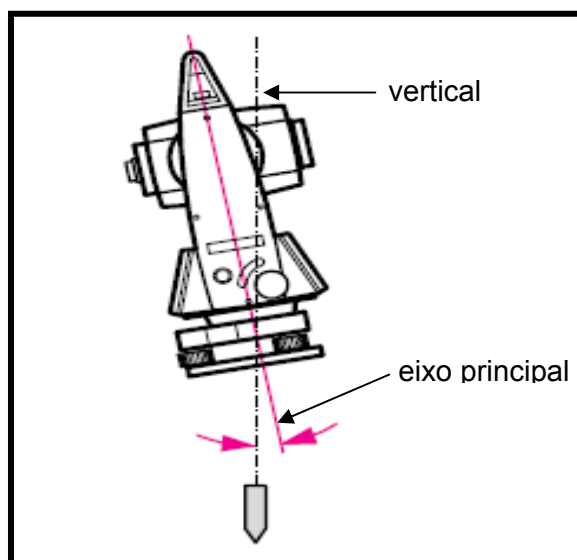
- Já para a determinação da distância zenital isenta do erro, procede-se a soma da equações (2.13) com a equação (2.14).

$$Z = \frac{Z'_{PD} - Z'_{PI}}{2} + 180 \quad (2.16)$$

#### 2.6.1.2 Erro de verticalidade do eixo principal

Ocorre quando o eixo principal não coincide com a vertical (Figura 2.19). Não se trata de um erro instrumental, e sim da operação de nivelamento do instrumento que, se necessário, os níveis de calagem devem ser retificados. Tal erro não é minimizado com leituras em PD e PI (KAHMEN; FAIG, 1988).

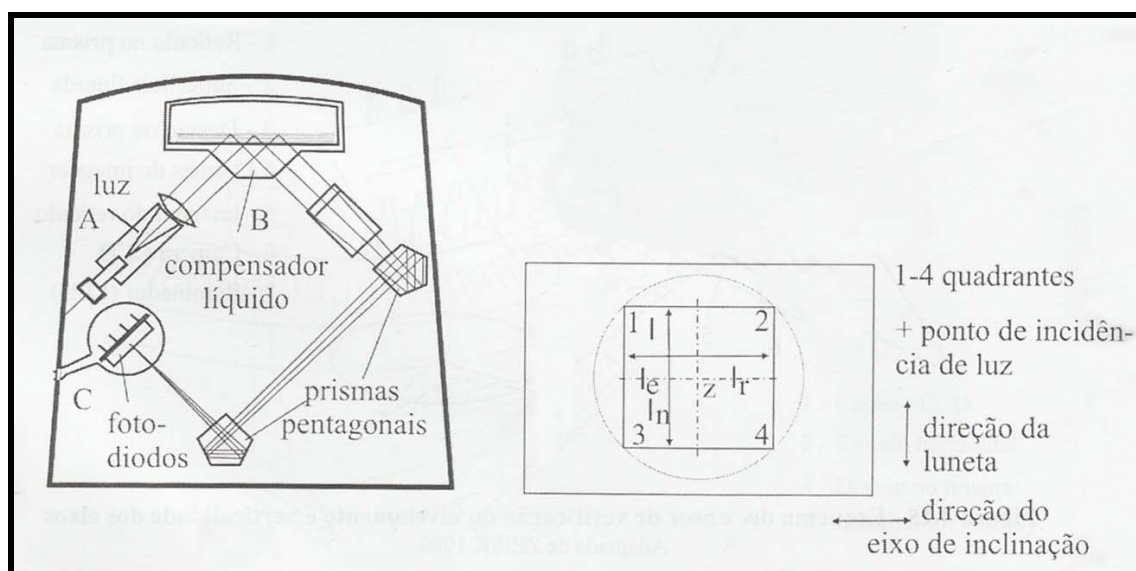
FIGURA 2.19 - ERRO DE VERTICALIDADE DO EIXO PRINCIPAL



FONTE: ZEISKE (2000)

As Estações Totais dispõem de compensadores eletrônicos que permitem a correção automática desse erro. Segundo Cintra (1995) apud Erba et Al (2005), o sistema é baseado na reflexão de uma luz sobre uma superfície líquida que permanece sempre horizontal e por isso pode ser usada como referencial. A luz gerada em **A** (Figura 2.20) é refletida na superfície líquida **B** e, após atravessar alguns componentes ópticos, atinge um fotodiodo **C**. O valor da corrente induzida neste permite determinar a posição da luz em relação ao ponto zero – **z**, o que permite determinar a inclinação longitudinal (direção da luneta) e a inclinação lateral (direção do eixo secundário). Dessa forma, leituras de ângulos verticais e direções horizontais são corrigidas automaticamente do erro de verticalidade.

FIGURA 2.20 - ESQUEMA DE UM COMPENSADOR



FONTE: (KENNIE; PETRIE, 1993) APUD (ERBA et Al., 2005)

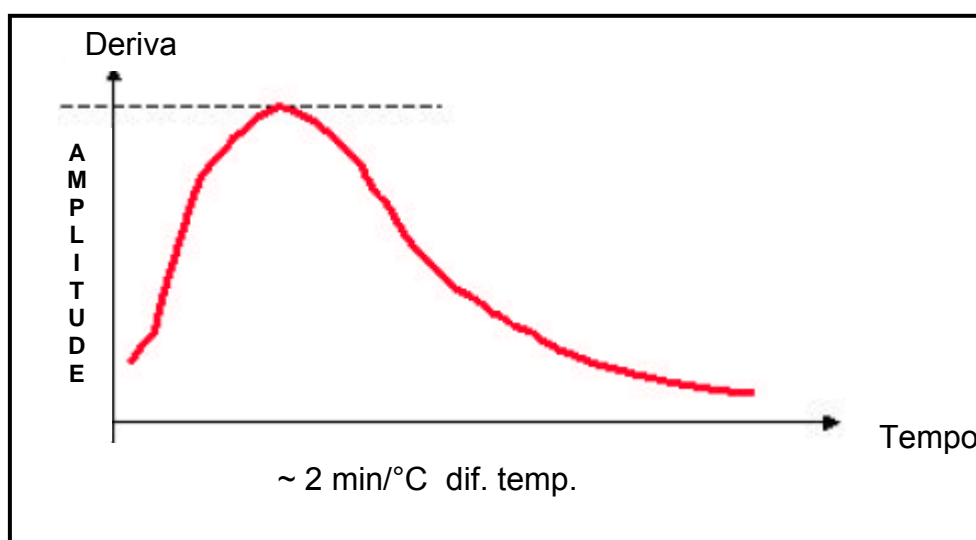
### 2.6.1.3 Erro de índice do compensador

Este erro ocorre quando o ponto zero do compensador não coincide com a vertical. Para minimizá-lo basta calcular a média das leituras na posição direta e na posição inversa da luneta (PD e PI).

### 2.6.1.4 Erros devidos a diferenças de temperaturas

Diferenças de temperatura entre o instrumento e o ambiente de trabalho resultam em mudanças na característica do instrumento, em particular do compensador. Logo, faz-se necessário o equilíbrio térmico entre o instrumento e o ambiente antes do início das medições (DZIERZEGA; SCHERRER, 2003). O tempo necessário para esse equilíbrio é de aproximadamente 2 minutos por grau centígrado de diferença (Figura 2.21).

FIGURA 2.21 - COMPORTAMENTO DO COMPENSADOR DURANTE EQUILÍBRIO TÉRMICO COM O AMBIENTE



FONTE: DZIERZEGA (2003).

### 2.6.2 Erro de Pontaria

Ocorre principalmente em face à limitação da resolução ótica do instrumento, das limitações visuais do observador, bem como das variações das condições atmosféricas.

Este erro é responsável pela não obtenção, em repetidas observações, do mesmo valor medido.

A grandeza deste erro está diretamente relacionada a ampliação do telescópio do instrumento (KUANG, 1996). Sob condições médias de visibilidade e de turbulência térmica, e com um alvo bem definido, o erro de pontaria, para uma única visada de comprimento de poucas centenas de metros, é estimado por (CHRZANOWSKI, 1977):

$$\sigma_p = \frac{30''}{M} \quad \text{a} \quad \sigma_p = \frac{60''}{M} \quad (2.17)$$

onde:

M= ampliação do telescópio do instrumento

Sob baixa visibilidade ou elevada turbulência térmica, o erro de pontaria certamente será maior.

A expressão supracitada não leva em conta a prática e a habilidade individual de cada operador. Contudo, há que se levar em conta o efeito da equação pessoal na estimativa do erro de pontaria. Aos leitores interessados: mais informações acerca do assunto podem ser encontradas em Medina et al (1999).

### 2.6.3 Precisão Nominal da Estação Total

A especificação da precisão nominal angular de um instrumento é fornecida pelo fabricante. Refere-se ao desvio padrão de uma *direção* para uma série de PD e PI. Em geral o fabricante indica o método utilizado, DIN ou ISO, para a determinação do desvio padrão (precisão nominal).

A tabela 2.2 apresenta a classificação das Estações Totais de acordo com a NBR-13.133 (ABNT, 1994).

TABELA 2.2 - CLASSIFICAÇÃO DAS ESTAÇÕES TOTAIS DE ACORDO COM A PRECISÃO INTERNA.

CLASSES DE ESTAÇÕES TOTAIS	DESVIO PADRÃO PRECISÃO ANGULAR	DESVIO PADRÃO PRECISÃO LINEAR
PRECISÃO BAIXA	$\leq \pm 30''$	$\pm (5\text{mm} + 10\text{ppm})$
PRECISÃO MÉDIA	$\leq \pm 07''$	$\pm (5\text{mm} + 5\text{ppm})$
PRECISÃO ALTA	$\leq \pm 02''$	$\pm (3\text{mm} + 3\text{ppm})$

Para a determinação da precisão esperada de um ângulo horizontal deve-se aplicar a teoria da propagação dos erros aleatórios (CHRZARNOWSKI,1977). Por exemplo: para um instrumento de precisão nominal 5" e observadas duas direções, a precisão do ângulo entre as direções é de:  $\sqrt{2} 5" = 7"$ .

Já a precisão de um levantamento depende da forma com que se utiliza o equipamento (PROFESSIONAL SURVEYOR MAGAZINE, 2002). Se em uma posição – PD, se em duas – PD-PI, se em um número maior de séries de PD-PI.

#### 2.6.4 Precisão Esperada na Determinação da distância vertical ( $D_v$ ) em uma Série PD-PI

A equação (2.0) permite o cálculo da distância medida ( $D_v$ ) com uma Estação Total, entre  $E_c$  e o prisma, sendo observados: o ângulo zenital ( $Z$ ) e a distância inclinada ( $D'$ ).

$$D_v = D' \cos Z \quad (2.0)$$

Aplicando-se a teoria da propagação dos erros, obtém-se:

$$\sigma_{D_v}^2 = \left( \frac{\partial D_v}{\partial D'} \right)^2 \sigma_{D'}^2 + \left( \frac{\partial D_v}{\partial Z} \right)^2 \sigma_Z^2$$

$$\sigma_{D_v} = \sqrt{\cos^2 Z \sigma_{D'}^2 + D'^2 \sin^2 Z \sigma_Z^2} \quad (2.18)$$

onde:

$Z$ = Ângulo zenital

$D'$ = distância inclinada

$\sigma_{D'}$ = precisão nominal linear da Estação Total

$\sigma_Z$ = precisão nominal angular da Estação Total

A Tabela 2.3 apresenta a precisão esperada -  $\sigma_{D_v}$  (mm), na determinação da distância vertical (  $D_v$  ), utilizando uma Estação Total, variando Z(graus) e D'(metros), com precisão nominal  $\pm 3''$  e  $\pm(2\text{mm} + 2\text{ppm})$ :

TABELA 2.3 - PRECISÃO ESPERADA  $\sigma_{D_v}$  (mm)

D\Z	89	88	87	86	85	84	83	82	81	80	79	78	77	76	75
10	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5
20	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6
30	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7
40	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8
50	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9
60	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0
70	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
80	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
90	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4
100	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
110	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
120	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
130	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9
140	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
150	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
160	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
170	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,4	2,4
180	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
190	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
200	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9

FONTE: KOSLOWSKI (1998)

## 2.6.5 Precisão Esperada da Estação Total com mais de uma Série PD-PI

### 2.6.5.1 Precisão esperada na determinação da distância inclinada ( $D'_v$ )

Para  $N_s$  séries medidas de distâncias inclinadas com a Estação Total, considerando-se apenas uma medição de  $D'$  por série, em PD ou em PI, obtém-se para a média:

$$D' = \frac{1}{N_s} (D'_1 + D'_2 + \dots + D'_{N_s})$$



Aplicando-se a teoria de propagação dos erros, vem:

$$\sigma_{D'}^2 = \frac{1}{N_s^2} \sigma_{D'_1}^2 + \frac{1}{N_s^2} \sigma_{D'_2}^2 + \dots + \frac{1}{N_s^2} \sigma_{D'_{N_s}}^2$$

Como :  $\sigma_{D'_1}^2 = \sigma_{D'_2}^2 = \dots = \sigma_{D'_n}^2 = \sigma_{D'}^2$ , então a precisão esperada na determinação da distância., é dada por:

$$\begin{aligned} \sigma_{D'}^2 &= \frac{1}{N_s^2} \sigma_{D'}^2 \quad \therefore \\ \sigma_{D'} &= \frac{\sigma_{D'}}{\sqrt{N_s}} \end{aligned} \quad (2.19)$$

onde:  $\sigma_{D'}$ = precisão nominal linear da Estação Total, fornecida pelo fabricante.

$N_s$  = número de séries PD-PI

#### 2.6.5.2 Precisão esperada na determinação do ângulo zenital (Z)

De forma análoga, demonstra-se que, para o ângulo zenital medido com mais de uma série de observações, o desvio padrão ( $\sigma_{\bar{z}}$ ) é dado por:

$$\sigma_{\bar{z}} = \frac{\sigma_z}{\sqrt{N_s}} \quad (2.20)$$

onde:  $\sigma_z$ = precisão nominal angular da Estação Total, fornecida pelo fabricante.

$N_s$  = número de séries PD-PI

#### 2.6.5.3 Precisão esperada na determinação da distância vertical ( $D_v$ )

Substituído as equações (2.19) e (2.20) na equação (2.18), vem:

$$\sigma_{D_v} = \sqrt{\cos^2 Z \left( \frac{\sigma_{D'}}{\sqrt{N_s}} \right)^2 + D'^2 \sin^2 Z \left( \frac{\sigma_Z}{\sqrt{N_s}} \right)^2} \quad \therefore$$

$$\sigma_{D_v} = \frac{1}{\sqrt{N_s}} \sqrt{\cos^2 Z \sigma_{D'}^2 + D'^2 \sin^2 Z \sigma_Z^2} \quad (2.21)$$

A equação 2.21 permite calcular a precisão esperada na determinação da distância vertical ( $D_v$ ) com mais de uma série PD-PI.

#### 2.6.6 Determinação do Número de Séries em Função da Precisão Estimada para o desnível ( $D_v$ )

Isolando-se o número de séries ( $N_s$ ) na equação 2.21, obtém-se:

$$N_s = \frac{\cos^2 Z \sigma_{D'}^2 + D'^2 \sin^2 Z \sigma_Z^2}{\sigma_{D_v}^2} \quad (2.22)$$

A equação (2.22) permite, com base na teoria de propagação dos erros aleatórios, calcular o número mínimo de séries para se obter a precisão desejada  $\sigma_{D_v}$  para a distância ( $D_v$ ).

Tomando  $3\text{mm}\sqrt{k}$  como limite para uma seção de nivelamento de alta precisão, e substituindo na equação (2.22), vem:

$$N_s = \frac{\cos^2 Z \sigma_{D'}^2 + D'^2 \sin^2 Z \sigma_Z^2}{(3\sqrt{K})^2}$$

onde:  $K$ = distância da visada em quilômetros

A Tabela 2.4 mostra o número mínimo de séries para, segundo a teoria de propagação de erros, obter-se a precisão de  $3\text{mm}\sqrt{k}$  na distância vertical ( $D_v$ ), utilizando uma Estação Total de precisão nominal:  $\pm 3''$  e  $\pm(2\text{mm} + 2\text{ppm})$ .

TABELA 2.4 – NÚMERO DE SÉRIES EM FUNÇÃO DA PRECISÃO NOMINAL E DO FECHAMENTO ESPERADO EM  $3\text{mm}\sqrt{k}$

<b>D' \ Z</b>	<b>89</b>	<b>88</b>	<b>87</b>	<b>86</b>	<b>85</b>	<b>84</b>	<b>83</b>	<b>82</b>	<b>81</b>	<b>80</b>	<b>79</b>	<b>78</b>	<b>77</b>	<b>76</b>	<b>75</b>
<b>10</b>	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	4
<b>20</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2
<b>30</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2
<b>40</b>	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
<b>50</b>	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
<b>60</b>	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
<b>70</b>	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3
<b>80</b>	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
<b>90</b>	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
<b>100</b>	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
<b>110</b>	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
<b>120</b>	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
<b>130</b>	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
<b>140</b>	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
<b>150</b>	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
<b>160</b>	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

## 2.7 MODELO DE TRANSFERÊNCIA DE TURBULÊNCIA NA DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA REFRAÇÃO NA MEDIÇÃO DO ÂNGULO ZENITAL.

A refração atmosférica é a maior fonte de erros na determinação dos ângulos zenitais. Muitos trabalhos de pesquisa têm sido desenvolvidos com o objetivo de determinar a influência da refração nos MEDs – Medidores Eletrônicos de Distâncias, entretanto há pouca referência na literatura quando se trata dessa influência na obtenção do ângulo zenital.

O efeito da refração no ângulo zenital é usualmente calculado a partir de um modelo adiabático da atmosfera real. Modelo este que representa o estado da atmosfera numa média para todas as latitudes e estações do ano. Esse modelo apresenta valores fixos da temperatura e pressão do ar ao nível do mar e perfis verticais fixos de temperatura e pressão.

Nas determinações de desníveis utilizando nivelamento trigonométrico aplica-se a subtração da equação (2.4) pela equação (2.5), para correção simultânea da curvatura da Terra e da refração atmosférica.

$$C = \frac{D^2}{2R}(1-k) \quad (2.23)$$

onde: D= distância reduzida ao horizonte

R= raio da Terra  $\cong$  6400 km

k= coeficiente de refração.

Nos trabalhos desenvolvidos na micrometeorologia, ramo da meteorologia que trata das interações superfície-atmosfera, estabilidade atmosférica e fluxos de calor e massas, modelos de transferência de turbulência têm sido pesquisados para descrever os processos que governam o gradiente de temperatura na baixa atmosfera.

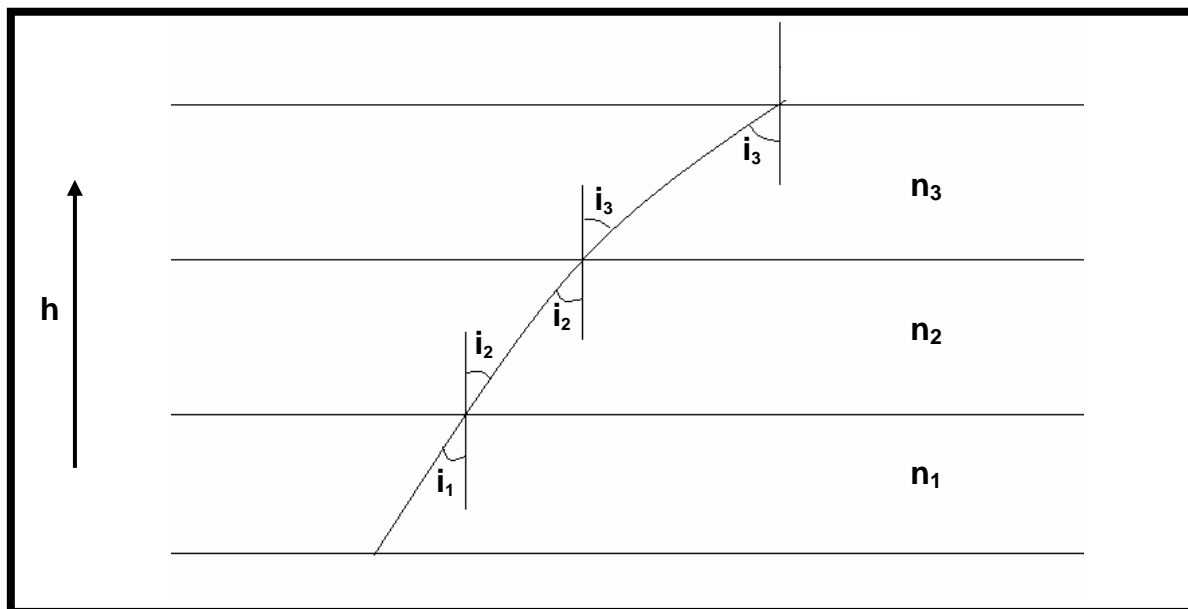
A seguir são apresentados modelos de turbulência (DODSON; ZAHER, 1985) para determinação da influência da refração nos ângulos zenitais em medições próximas ao solo.

### 2.7.1 Relação Entre Curvatura e Gradiente de Temperatura (DODSON; ZAHER, 1985)

Em uma atmosfera idealizada, somente sob ação da gravidade, o caminhamento da onda luminosa apresenta uma curvatura convexa quando ocorre variação crescente do ângulo  $i_j$  na direção da vertical ascendente (Figura 2.22):

$$i_3 > i_2 > i_1 \quad (2.24)$$

FIGURA 2.22 – CAMINHAMENTO DE UMA ONDA ELETROMAGNÉTICA NA ATMOSFERA IDEAL



FONTE: DODSON E ZAHER (1985)

A Lei básica da refração – Lei de Snell, é dada pela seguinte igualdade:

$$n_j \cdot \text{sen } i_j = \text{const.}$$

Onde:

$n$  = índice de refração da camada  $j$ .

Então, de acordo com a expressão (2.24), e da igualdade supracitada, chega-se a seguinte relação:

$$n_3 < n_2 < n_1 \quad (2.25)$$

onde:  $n_i$  representa o índice de refração da camada  $i$ .

Da relação (2.25) tem-se que o gradiente vertical do índice de refração  $\frac{\partial n}{\partial h}$  é negativo.

$$\frac{\partial n}{\partial h} < 0$$

Esse gradiente determina a direção do raio de curvatura do caminhar da onda luminosa (convexa ou côncava), bem como sua amplitude.

A lei de Lorentz-Lorentz fornece a relação entre o índice de refração e a densidade do ar por onde atravessa a linha de visada:

$$\frac{n^2 - 1}{(n^2 + 2)\rho} = \text{constante} \quad (2.26)$$

onde:

$n$  = índice de refração do ar.

$\rho$  = densidade do ar.

O índice de refração do ar é muito próximo da unidade, então pode-se substituir pela soma da unidade com uma pequena fração decimal ( $n = 1 + \varepsilon$ ). Substituindo esse termo na equação 2.26 e desprezando-se os termos em 2ª ordem de  $\varepsilon$ , obtém-se:

$$\frac{\varepsilon}{\left(\frac{3}{2} + \varepsilon\right)\rho} \cong \frac{n-1}{\frac{3}{2}\rho} = \text{const.} \quad (2.27)$$

Logo, a variação do índice de refração é proporcional a variação da pressão. Então, derivando a Equação (2.27) em relação à altura, obtém-se que :

$$\frac{dn}{dh} \approx \frac{d\rho}{dh} \quad (2.28)$$

Isto implica que a curvatura da linha de visada é dependente do gradiente vertical da densidade do ar.

A Lei Universal dos Gases é definida por:

$$PV = \Re T \quad (2.29)$$

onde:

$P$  = pressão do gás (mb).

$T$  = temperatura absoluta do gás ( $^{\circ}\text{K}$ ).

$V$  = volume de 1 grama-mol do gás.

$\mathfrak{R}$  = constante Universal dos Gases.

E a relação entre a densidade do gás e a massa molecular é dada pela equação:

$$P = \rho \frac{\mathfrak{R}T}{m} \quad (2.30)$$

onde:

$\rho$  = densidade do gás.

$m$  = massa molecular do gás.

Sabe-se também que o gradiente da pressão atmosférica está relacionado com aceleração da gravidade da Terra por:

$$\frac{dP}{dh} = -\rho g \quad (2.31)$$

Diferenciando a Equação (2.30), em relação a  $h$ , tem-se:

$$\frac{\partial P}{\partial h} = \frac{\mathfrak{R} \rho}{m} \frac{\partial T}{\partial h} + \frac{RT}{m} \frac{\partial \rho}{\partial h} = -\rho g \quad (2.32)$$

Substituindo a Equação (2.30) na Equação (2.32) e simplificando:

$$\frac{\partial \rho}{\partial h} = -\frac{Pm}{\mathfrak{R}T^2} \left( \frac{g}{\mathfrak{R}} + \frac{\partial T}{\partial h} \right) \quad (2.33)$$

Substituindo a equação (2.33) na equação (2.28):

$$\frac{dn}{dh} = -\frac{Pm}{\mathfrak{R}T^2} \left( \frac{gm}{\mathfrak{R}} + \frac{\partial T}{\partial h} \right) \quad (2.34)$$

Com isso obtém-se que o gradiente do índice de refração é proporcional ao gradiente da temperatura do ar.

Observa-se que (equação 2.34) o gradiente do índice de refração  $\frac{dn}{dh}$  será negativo – portanto curvatura convexa - quando o termo (Figura 2.21):

$$\left( \frac{gm}{\mathfrak{R}} + \frac{\partial T}{\partial h} \right) > 0 \quad \text{ou} \quad \frac{\partial T}{\partial h} > -\frac{gm}{\mathfrak{R}} \quad (2.35)$$

Assumindo-se valores representativos próximos a superfície da Terra para  $m$ ,  $g$  e  $\mathfrak{R}$ :

$$m = 28,96 \text{ kg mol}$$

$$g = 9,807 \text{ m/s}^2$$

$$\mathfrak{R} = 8314,4 \text{ kJ(kg.mol)}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}$$

E substituindo na equação (2.35), obtém-se:

$$\frac{\partial T}{\partial h} > -0,0342^\circ\text{C/m} \Rightarrow \text{curvatura convexa}$$

$$\frac{\partial T}{\partial h} < -0,0342^\circ\text{C/m} \Rightarrow \text{curvatura côncava}$$

Para gradientes de temperatura maiores que  $-0,0342^\circ\text{C/m}$  a curvatura da linha de visada é convexa (Figura 2.22), e côncava para valores inferiores.

Essa demonstração é confirmada ao se aplicar a equação de Barrel e Sears, que fornece o índice de refração do espectro visível no ar. Esta equação se vale da atmosfera padrão - um modelo da atmosfera real - que representa o estado da atmosfera numa média para todas as latitudes e estações do ano, com valores fixos da temperatura e pressão do ar ao nível do mar ( $15^\circ\text{C}$  e  $1013,25\text{mb}$ ) e perfis verticais fixos de temperatura e pressão.



Segundo Dodson e Zaher (1985), o gradiente vertical da refratividade é dado por:

$$\frac{\partial N_a}{\partial h} = \frac{\partial N_a}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial h} + \frac{\partial N_a}{\partial P} \cdot \frac{\partial P}{\partial h} \quad (2.36)$$

E considerando o índice de refratividade do ar –  $N_a$ , dado pela equação de Barrel e Sears:

$$N_a = N_p \left( \frac{273,16}{1013,25} \right) \frac{P}{T} - 15,02 \frac{e}{T} \quad (2.37)$$

onde:

$N_p$  = índice de refratividade nas condições padrão.

T = temperatura (°K)

P = pressão (mb)

e = pressão parcial do vapor d'água (mb)

Sendo que  $N_a$  se relaciona com n, por:  $N_a = (n - 1) \cdot 10^6$

Diferenciando a equação (2.37) com valores representativos de:  $N_p = 295$ ,  $T = 288^\circ\text{K}$ ,  $P = 1013,25 \text{ mb}$ ,  $e = 10 \text{ mb}$ ; obtém-se o gradiente da refratividade em relação à pressão e o gradiente da refratividade em relação à temperatura:

$$\frac{\partial N_a}{\partial P} = +0,276 / \text{mbar}$$

$$\frac{\partial N_a}{\partial T} = -0,973 / ^\circ\text{C}$$

O gradiente vertical de pressão próximo à superfície é aproximadamente (BOMFORD, 1975) apud (DODSON E ZAHER, 1985):

$$\frac{\partial P}{\partial h} = -0,12 \text{ mb/m}$$

Substituindo os valores dos gradientes:  $\frac{\partial N_a}{\partial P}$ ,  $\frac{\partial N_a}{\partial T}$  e  $\frac{\partial P}{\partial h}$  na equação (2.36), resulta em:

$$\frac{\partial N_a}{\partial h} = -0,973 \frac{\partial T}{\partial h} - 0,0331$$

$\frac{\partial N_a}{\partial h}$  é negativo (curvatura convexa) quando:

$$-0,973 \frac{\partial T}{\partial h} - 0,0331 < 0$$

O que resulta:

$$\frac{\partial T}{\partial h} > -0,0342^\circ\text{C/m}$$

Confirmando, então, a relação (2.35).

Fica claro, teoricamente, o porquê da trajetória da onda luminosa em visadas próximas ao solo apresentar um comportamento anômalo durante dias ensolarados (SCHAAL, 1995).

Para o coeficiente de refração  $k = 0,13$ , obtido segundo um modelo da atmosfera padrão, resulta, segundo (SCHAAL, 1995) em um gradiente de:

$$\frac{\partial T}{\partial h} > -0,012^\circ\text{C/m}$$

Portanto resultando em um gradiente de temperatura maior do que  $-0,034^\circ\text{C}$ , acarretando uma curvatura de visada sempre convexa. Essa curvatura ocasiona uma subtração no desnível determinado por nivelamento trigonométrico. Esta conclusão é ratificada ao se analisar a equação (2.23) onde, para  $k = 0,13$ , a

correção do efeito da refração (subtrativa) representa 13% do efeito da curvatura terrestre.

### 2.7.2 Turbulência na Atmosfera

A turbulência é um estado de instabilidade das condições ambientais locais do ar próximo ao solo: pressão, temperatura e umidade. Ocorre, principalmente, devido a: fluxo de troca de calor entre o solo e o ar, velocidade do vento e presença de obstáculos sobre a superfície do solo (rugosidade).

Modelos simplificados da atmosfera, onde se considera a variação linear dos parâmetros em função da altura, não são suficientes para determinar com precisão os efeitos da refração. Enquanto as variações de pressão são linearmente dependentes da altura em grandes áreas, as variações de temperatura têm de ser consideradas em pequenas distâncias e, em face à turbulência, não variam linearmente com a altura na baixa atmosfera.

Dodson e Zaher (1985) destacam o modelo de transferência turbulenta de Priestley, que define três parâmetros básicos: temperatura potencial, fluxo de troca de calor e altura de Obukhov.

#### 2.7.2.1 Temperatura Potencial - $\theta$

A temperatura potencial  $\theta$  de uma parcela de ar é definida como a temperatura que a parcela teria se fosse expandida ou comprimida adiabaticamente de seu estado real de pressão e temperatura para uma pressão padrão (geralmente 1000 mb). Se uma parcela de ar é submetida apenas a transformações adiabáticas, sua temperatura potencial permanece constante. Portanto, a temperatura potencial é uma quantidade conservativa para transformações adiabáticas.

$$\theta = T \left( \frac{1000}{P} \right)^{0,286} \quad (2.38)$$

Onde:

T= temperatura do ar (°K).

P= pressão do ar (mb).

### 2.7.2.2 Fluxo de Troca De Calor – F

O fluxo de troca de calor entre o ar e o solo é um processo complexo sendo que a sua medida direta requer uma instrumentação bem mais elaborada que a simples medida da temperatura em função da altura. O fluxo de calor, normalmente expresso em watts por metro quadrado, depende fundamentalmente da radiação solar e da absorção de calor do solo. Esse fluxo é expresso por uma equação de balanço energético que envolve três grandezas físicas:

$$F = R_s - G - E \quad (2.39)$$

onde:

F= fluxo de calor entre o ar e o solo.

$R_s$ = radiação na superfície do solo.

G= energia transferida ao solo.

E= perda de calor devido à evaporação da água do solo.

### 2.7.2.3 Altura de Obukhov – L

O fluxo de calor influencia a temperatura do ar até uma certa altura. A partir deste nível se estabelece a condição adiabática, quando não há mais troca de calor entre as camadas de ar. Essa altura é denominada de Altura de Obukhov, dada por:

$$L = -87 \times 10^3 \frac{u_*^3}{F} \quad (2.40)$$

sendo:

$$u_* = \frac{V_k \cdot u}{\ln \frac{h_{av}}{r_s}}$$

onde:

$u_*$  = velocidade de atrito do ar em m/s.

$V_k$  = constante de Von Karmann:  $V_k = 0,4$ .

$u$  = velocidade do vento na linha de visada (m/s).

$h_{av}$  = altura do anemômetro para medir o vento (m).

$r_s$  = rugosidade média da superfície do solo (m).

## 2.7.3 Estados de Turbulência na Atmosfera

### 2.7.3.1 Estado instável

Essa situação ocorre quando a temperatura potencial do ar nas camadas mais baixas é maior que a temperatura potencial das camadas mais elevadas, ou seja, o gradiente da temperatura potencial é negativo. O estado instável predomina durante o período diurno com elevada insolação. Este estado é dividido em três regiões:

#### Região I:

$$\frac{\delta\theta}{\delta h} = -\frac{F}{C_p \rho u_* \kappa} h^{-1} \quad (2.41)$$

para  $0 < h < 0,03L$

Onde:

$C_p$  e  $\rho$  são, respectivamente, calor específico e densidade do ar.

$h$  = altura a partir da superfície do solo.

#### Região II:

$$\frac{\delta\theta}{\delta h} = -0,027 F^{2/3} h^{-4/3} \quad (2.42)$$

para  $0,03L < h < L$

#### Região III:

$$\frac{\delta\theta}{\delta h} = 0$$

### 2.7.3.2 Estado estável

Essa situação ocorre quando a temperatura potencial no ponto mais baixo é menor que no ponto mais alto, ou seja, o gradiente da temperatura potencial é positivo. O estado estável predomina durante o período noturno com céu claro.

$$\frac{\delta\theta}{\delta h} = -2 \times 10^{-3} \frac{F}{u \cdot h} \left( 1 + \frac{5h}{L} \right) \quad (2.43)$$

### 2.7.3.3 Estado neutro

Essa é uma situação onde a temperatura potencial do ponto mais baixo é igual à temperatura potencial do ponto mais elevado, ou seja, o gradiente vertical da temperatura potencial é nulo. O estado neutro predomina no amanhecer, anoitecer e por períodos prolongados de céu encoberto por nuvens.

$$\frac{\delta\theta}{\delta h} = 0 \quad \text{para qualquer valor de } h.$$

A teoria demonstra que para gradientes maiores do que  $-0,034^\circ\text{C/m}$  ocasiona uma curvatura côncava da visada do ângulo zenital, situação inversa ao apresentado na Figura 2.22.

O coeficiente de refração  $k$  usualmente utilizado ( $k = 0,13$ ), corresponde a condições adiabáticas da atmosfera, e não é, todavia, representativo para a maioria das observações geodésicas e topográficas próximas ao solo, onde os efeitos do calor predominam, como demonstram os modelos de transferência de turbulência.

## 2.8 DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO DE REFRAÇÃO VERTICAL NOS ESTADOS DE TURBULÊNCIA

A partir das equações (2.38) a (2.43), Schaal (1995), deduziu as equações para determinação do ângulo de refração vertical  $\beta$ :

$$\beta'' = D \left[ 0,1 \left( \frac{P}{1000} \right)^{0,286} \left( \frac{\delta\theta}{\delta h} + 2,06 \frac{T}{P^{1,286}} \frac{\delta P}{\delta h} \right) + 0,0034 \right] \quad (2.44)$$

A equação (2.44) permite o cálculo da refração, observada  $\beta$  (em segundos) por um teodolito estacionado próximo ao solo na altura  $h$  ( $\cong 1,5m$ ), em função das condições ambientais e do estado de turbulência da atmosfera.

### 2.8.1 Estado de Turbulência Instável

O estado de turbulência instável, caracterizado pelo gradiente negativo da temperatura potencial que, para Região II (altura superior a 1m), é dado pela equação (2.42).

$$\frac{\delta\theta}{\delta h} = -0,027F^{2/3}h^{-4/3} \quad (2.42)$$

Substituindo na (2.44):

$$\beta'' = D \left[ 0,1 \left( \frac{P}{1000} \right)^{0,286} \left( -0,027F^{2/3}h^{-4/3} + 2,06 \frac{T}{P^{1,286}} \frac{\delta P}{\delta h} \right) + 0,0034 \right] \quad (2.45)$$

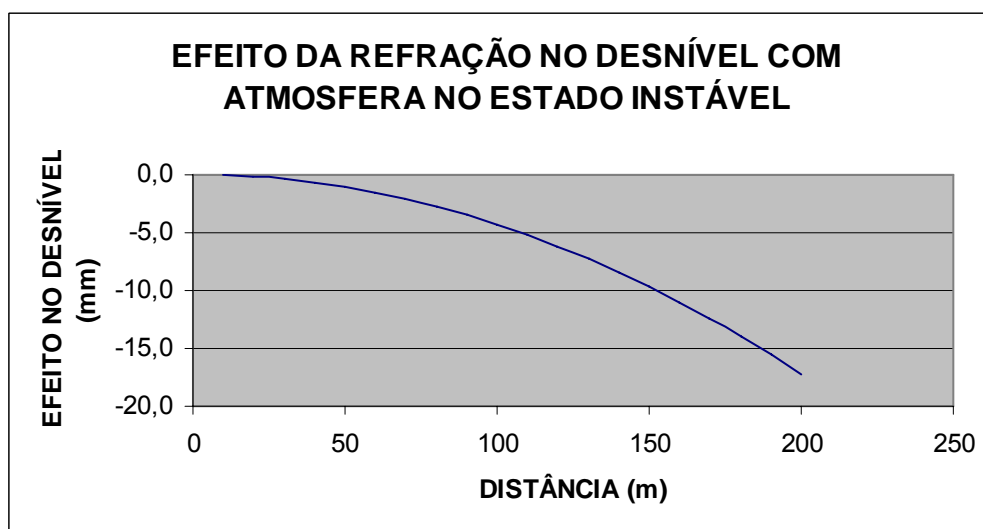
Os efeitos da refração, durante período diurno com alta insolação em uma observação próxima ao solo, são muito mais sentidos no ângulo vertical que na distância (SCHAAL, 1996).

Adotando condições ambientais representativas para a pressão, temperatura e gradiente da pressão, respectivamente 950 mb, 27 °C e -0,12 mb/m,

um lance de 1000 m, durante o dia com elevada insolação ( $F= 450 \text{ w/m}^2$ ), na altura de 1,5 metro, a refração é  $-90''$ , ou  $-1,5'$ . visada apresenta uma curvatura côncava acarretando um desnível aparente de  $-0,45$  metros (SHAAL, 1995).

O gráfico 2.1 apresenta o efeito da refração no desnível medido, com ângulo zenital próximo a  $90^\circ$  e nas condições descritas acima, para distâncias até 200m.

GRÁFICO 2.1 – EFEITO DA REFRAÇÃO NO DESNÍVEL – ATMOSFERA INSTÁVEL



### 2.8.2 Estado de Turbulência Estável

Já para o estado estável o gradiente da temperatura potencial é dado pela equação(2.43).

$$\frac{\delta\theta}{\delta h} = -2.10^{-3} \frac{F}{u_*h} \left(1 + \frac{5h}{L}\right) \quad (2.43)$$

Substituindo na equação (2.44):

$$\beta'' = D \left[ 0,1 \left( \frac{P}{1000} \right)^{0,286} \left( -2.10^{-3} \frac{F}{u_*h} \left(1 + \frac{5h}{L}\right) + 2,06 \frac{T}{P^{1,286}} \frac{\delta P}{\delta h} \right) + 0,0034 \right] \quad (2.46)$$



### 2.8.3 Atmosfera no Estado Neutro

No estado neutro o gradiente da temperatura potencial é nulo  $\frac{\delta\theta}{\delta h} = 0$ , portanto a equação (2.5) é válida para a correção da refração.

$$c_r = \frac{kD^2}{2R} \quad (2.5)$$

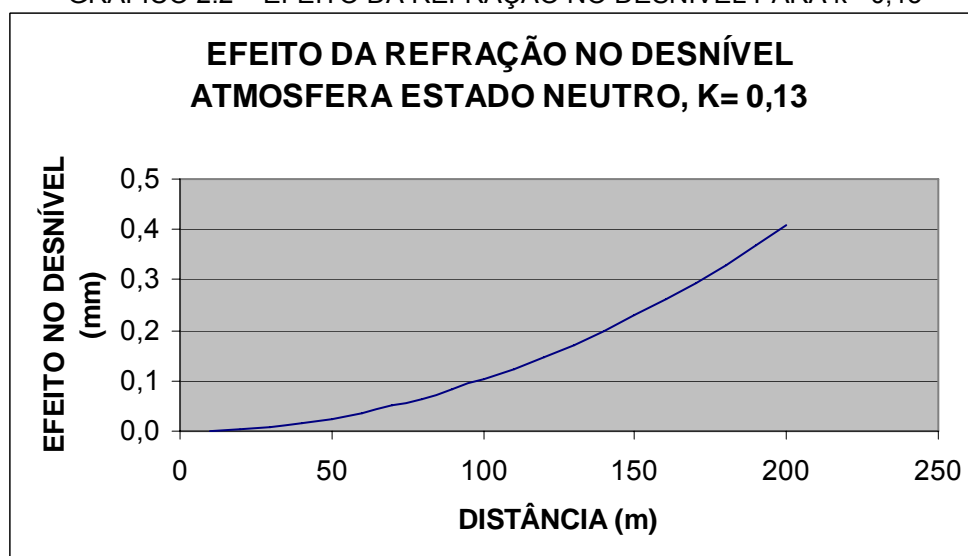
A Tabela 2.5 apresenta o efeito da refração (mm) em diferentes distâncias para  $k= 0,13$  em comparação com as especificações para desníveis de precisão. , .

TABELA 2.5 – EFEITO DA REFRAÇÃO PARA  $k= 0,13$

Distância(m)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Cr	0,1	0,4	0,9	1,6	2,6	3,7	5,0	6,5	8,3	10,2
$3\text{mm}\sqrt{k}$	0,9	1,3	1,6	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7	2,8	3,0
$6\text{mm}\sqrt{k}$	1,9	2,7	3,3	3,8	4,2	4,6	5,0	5,4	5,7	6,0
$8\text{mm}\sqrt{k}$	2,5	3,6	4,4	5,1	5,7	6,2	6,7	7,2	7,6	8,0

O gráfico 2.2 mostra o efeito da refração no desnível para  $k= 0,13$ ; aplicando-se a equação 2.5. Confrontando-se com o gráfico 2.1 observa-se sentido contrário do efeito da refração nos desníveis.

GRÁFICO 2.2 – EFEITO DA REFRAÇÃO NO DESNÍVEL PARA  $k= 0,13$



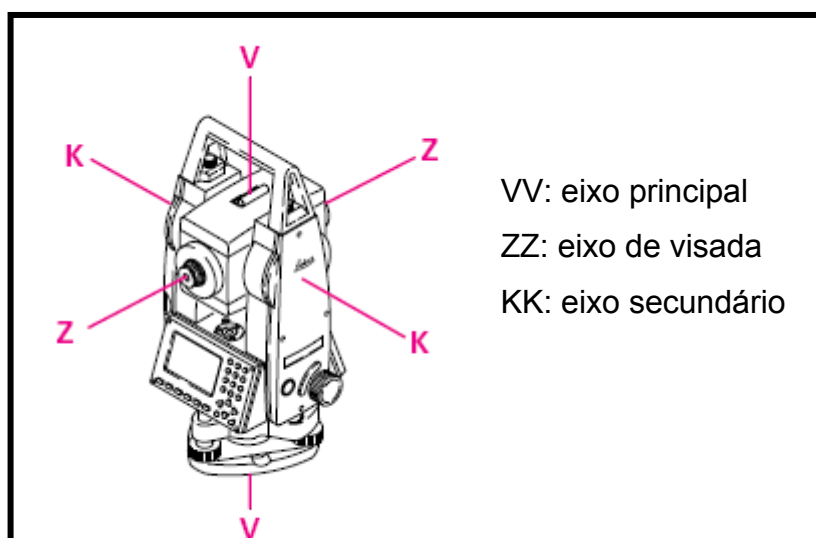
### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 DETERMINAÇÃO DE DESNÍVEL COM ESTAÇÃO TOTAL

Trata-se de uma adaptação da metodologia tradicional (FAGGION ET AL, 2003), utilizando-se equipamento de última geração – Estação Total - e dois bastões graduados, apoiados por bipés, posicionados na mesma altura e instalados sobre os pontos entre os quais se deseja determinar o desnível. Estes sustentarão os prismas (refletores) que farão a devolução do sinal da medida de distância entre emissor (Estação Total) e prismas. Estes servirão também como alvo para a medida do ângulo zenital.

Essas medições, ângulos zenitais e distâncias, estão referidas a mesma origem ( $E_c$ ) na Estação Total: a interseção entre o eixo principal, de visada e o eixo secundário (Figura 3.1), bem como aos centros dos prismas.

FIGURA 3.1 SISTEMA DE EIXOS DA ESTAÇÃO TOTAL



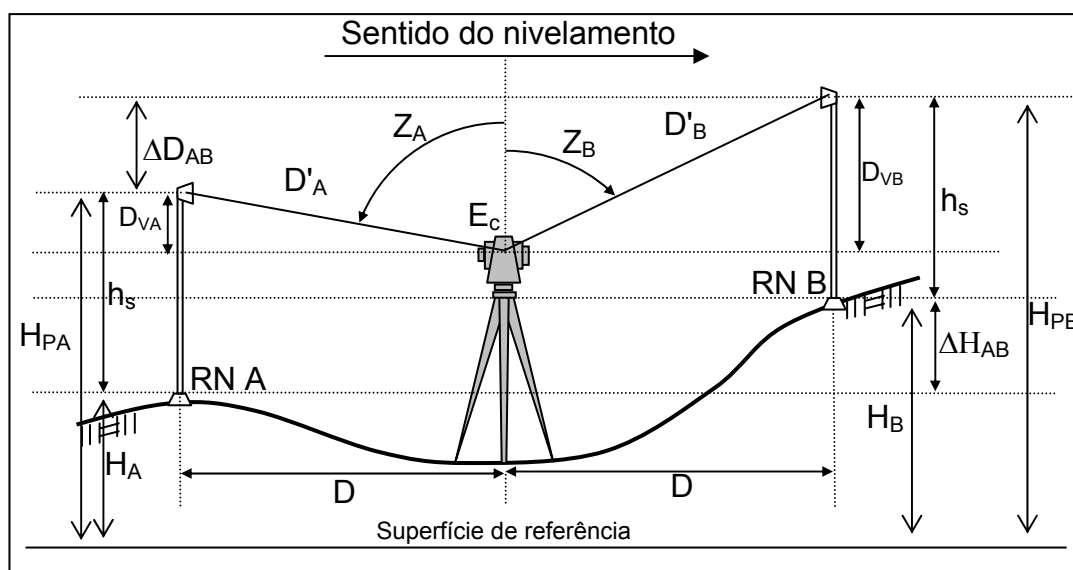
FONTE: ZEISKE (2000)

O método consiste em instalar a Estação Total em uma posição que seja possível visualizar os dois prismas posicionados em ré e vante. Atuando desta forma, será possível determinar o desnível entre os alvos sem considerar a altura dos centros dos prismas (já que os mesmos estão posicionados na mesma altura) e a altura do instrumento (uma vez que este é mantido na mesma posição para determinar o desnível de ré e de vante).

Com a Estação Total instalada equidistante dos prismas é possível também minimizar o efeito da curvatura da terra e o efeito da refração no ângulo zenital, uma vez que estes efeitos são proporcionais às distâncias.

A dedução da equação para o cálculo do desnível utilizando esta metodologia baseia-se na figura 3.2.

FIGURA 3.2 - NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO MÉTODO DE VISADAS IGUAIS



Onde:

- $E_c$ = ponto interseção entre os eixos da estação total.
- $D_{VA}$ = distância vertical em A.
- $D_{VB}$ = distância vertical em B.
- $h_s$ = altura do centro do prisma à RN (iguais, como preconiza o método).
- $D$ = distância horizontal: estação – prisma.
- $\Delta D_{AB}$ = diferença entre as distâncias verticais:  $D_{VB} - D_{VA}$
- $\Delta H_{AB}$ = desnível da RN A para a RN B.
- $D'_A$  e  $D'_B$ = distância inclinada de  $E_c$  para os centros dos prismas em A e B, respectivamente.
- $Z_A$  e  $Z_B$ = ângulo zenital para os centros dos prismas em A e B, respectivamente.
- $H_A$  e  $H_B$ = altitudes da RN A e RN B, respectivamente.
- $H_{PA}$  e  $H_{PB}$ = altitudes dos centros dos prismas em A e B, respectivamente

Preliminarmente deve-se atentar que, o desnível da RN A para a RN B ( $\Delta H_{AB}$ ) é dado por:

$$\Delta H_{AB} = H_B - H_A \quad (3.1)$$

Assim como o desnível da RN B para a RN A ( $\Delta H_{BA}$ ) é dado por:

$$\Delta H_{BA} = H_A - H_B \quad (3.2)$$

Portanto:

$$\Delta H_{AB} = -\Delta H_{BA} \quad (3.3)$$

A equação 3.3 mostra que o sinal do desnível depende do sentido do caminhamo do nivelamento.

Da figura 3.2, verifica-se que a diferença entre as distâncias verticais ( $\Delta D_{AB}$ ) é dada por:

$$\Delta D_{AB} = D_{VB} - D_{VA} = H_{PB} - H_{PA} \quad (3.4)$$

Da figura 3.2, tem-se também:

$$H_{PA} = H_A + h_p \quad (3.5)$$

$$H_{PB} = H_B + h_p \quad (3.6)$$

Substituindo as equações 3.5 e 3.6 na equação 3.4, vem:

$$\Delta D_{AB} = D_{VB} - D_{VA} = H_B + h_p - (H_A + h_p) \quad \therefore$$

$$\Delta D_{AB} = D_{VB} - D_{VA} = H_B - H_A \quad (3.7)$$

Substituindo a equação 3.2 na equação 3.7, finalmente tem-se:

$$\Delta H_{BA} = D_{VB} - D_{VA} \quad (3.8)$$

Onde (Figura 3.2):

$$D_{VA} = D'_A \cdot \cos Z_A \quad (3.9)$$

$$D_{VB} = D'_B \cdot \cos Z_B \quad (3.10)$$

Nas condições propostas no método, verifica-se pelas equações 3.9 e 3.10, que as únicas observações que influenciam na determinação do desnível da RN A para a RN B, são: as distâncias inclinadas  $D'_A$  e  $D'_B$  e os ângulos zenitais  $Z_A$  e  $Z_B$ .

Pode-se verificar também pela figura 3.2, que indica o sentido do nivelamento, e pela equação 3.8, que o desnível entre as RRNN ( $\Delta H_{AB}$ ) é dado pela distância vertical de *vante* ( $D_{VB}$ ) menos a distância vertical de *ré* ( $D_{VA}$ ).

### 3.2 PRECISÃO ESPERADA NA DETERMINAÇÃO DO DESNÍVEL ( $\Delta H_{AB}$ ) PARA VISADAS DE IGUAL COMPRIMENTO

O desnível  $\Delta H_{AB}$  é dado pela equação 3.8:

$$\Delta H_{AB} = D_{VB} - D_{VA} \quad (3.8)$$

Aplicando-se a teoria de propagação de erros aleatórios à equação 3.8, tem-se para o desvio padrão de  $\Delta H_{AB}$  ( $\sigma_{\Delta h}$ ):

$$\sigma_{\Delta H_{AB}} = \sqrt{\sigma_{D_{VA}}^2 + \sigma_{D_{VB}}^2} \quad (3.11)$$

Como consta no capítulo anterior, por intermédio da Tabela 2.3, para uma mesma distância, a precisão esperada para a distância vertical ( $D_V$ ) pouco varia com o ângulo zenital. Portanto, para visadas de igual distância, pode-se considerar:

$$\sigma_{D_{VA}}^2 \cong \sigma_{D_{VB}}^2 \cong \sigma_D^2 \quad (3.12)$$

Substituindo a equação (3.12) na equação (3.11) e simplificando a notação fazendo  $\Delta H = \Delta H_{AB}$ , vem:

$$\sigma_{\Delta H} = \sqrt{2\sigma_D^2} \quad \therefore$$

$$\sigma_{\Delta H} = \sqrt{2} \sqrt{\sigma_D^2} \quad (3.13)$$

Considerando a equação 2.21, para mais de uma série de observações, obtém-se:

$$\sigma_{\Delta H} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{N_s}} \sqrt{\cos^2 Z \sigma_{D'}^2 + D'^2 \sin^2 Z \sigma_Z^2} \quad (3.14)$$

### 3.3 DETERMINAÇÃO DO EFEITO DA REFRAÇÃO NA DISTÂNCIA MEDIDA

As variações nas condições atmosféricas alteram a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas e provocam, conseqüentemente, erros sistemáticos nas medidas da distância. As estações totais, em sua maioria, permitem a aplicação da correção desse erro sistemático em tempo real. A correção à distância medida pode ser obtida das seguintes maneiras (RÜEGER, 1996; FAGGION, 2001) apud (FAGGION ET AL, 2003), descritas abaixo:

- Utilizando o ábaco que acompanha o manual do equipamento. Neste caso as informações necessárias para a determinação da correção, em ppm (parte por milhão), são a temperatura e a pressão;
- Utilizando as fórmulas que acompanham o manual do equipamento. Além dos parâmetros citados no item anterior é necessária também a umidade relativa do ar;
- Utilizando as fórmulas adotadas pela UGGI (os mesmos parâmetros do item anterior);
- Utilizando as fórmulas apresentadas por RÜEGER (1996, p.80). Estas equações são recomendadas para a redução de medições obtidas em levantamentos de alta precisão.

Faggion et al. (2003) em testes realizados com um conjunto de observações de distâncias medidas sobre a base de calibração de medidores eletrônicos de distância da fazenda Cangüiri da Universidade Federal do Paraná- UFPR,

demonstra que a diferença entre os valores das correções obtidas com as fórmulas citadas anteriormente está na casa do centésimo do milímetro. A diferença só é significativa quando a correção determinada com o ábaco é comparada com o conjunto de fórmulas já citadas.

Tendo em vista este aspecto optou-se pela utilização do formulário constante no manual do equipamento (TRIMBLE ZEISS, 2001):

$$\Delta D' = 281,8 - \left[ \frac{0,29065.P}{(1 + \alpha.t)} - \frac{4,126 \cdot 10^{-4} \cdot h_r \cdot 10^x}{(1 + \alpha.t)} \right] \quad (3.15)$$

Onde:

$\Delta D'$  = Correção das condições atmosféricas para a distância observada (ppm)

P = Pressão Atmosférica (mb)

t = Temperatura Ambiente (°C)

$h_r$  = Umidade Relativa (%)

$$\alpha = \frac{1}{273,16} ; \quad x = \frac{7,5t}{237,3 + t} + 0,7857$$

## 4 CALIBRAÇÃO DO CONJUNTO BASTÃO - PRISMA

Por calibração entende-se: conjunto de operações que estabelecem, em condições específicas, a correlação entre valores indicados por um instrumento de medida, ou sistema de medida, ou uma medida materializada e os verdadeiros convencionais da grandeza medida (FAGGION, 2001).

Com o objetivo de se verificar a acurácia na definição da altura do bastão graduado (Figura 4.1), foi realizada a calibração dos dois bastões utilizando-se o interferômetro a LASER, no Laboratório de Instrumentação Geodésica - LAIG, da UFPR.

FIGURA 4.1 – CONJUNTO BASTÃO-PRISMA APOIADO POR BIPÉ



### 4.1 SISTEMA INTERFEROMÉTRICO DISPONÍVEL NO LAIG

Em 1988, por intermédio de um convênio Brasil – Alemanha, montou-se no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas um sistema para calibração de



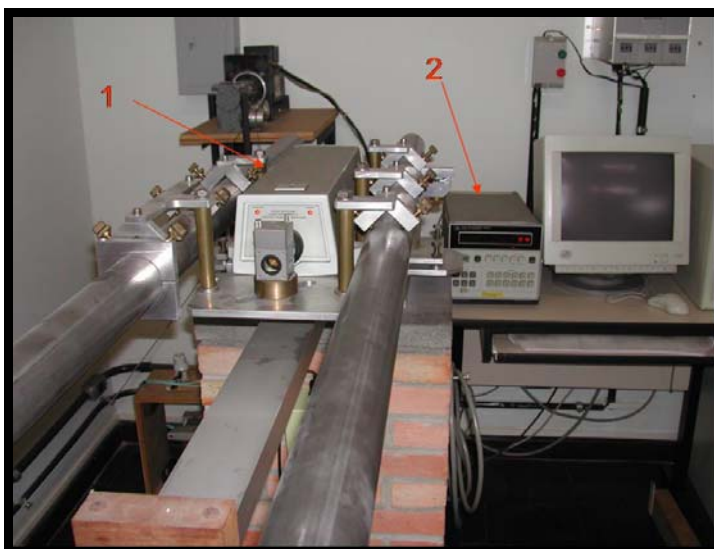
miras de ínvar, utilizando-se um interferômetro a LASER para efetuar as medidas dos intervalos entre os traços gravados na fita de ínvar com precisão do micrón (FAGGION, 1993).

Esse sistema, além de calibrar miras de ínvar, também pode ser utilizado na verificação e retificação de outros equipamentos topográficos e geodésicos.

O sistema é composto de:

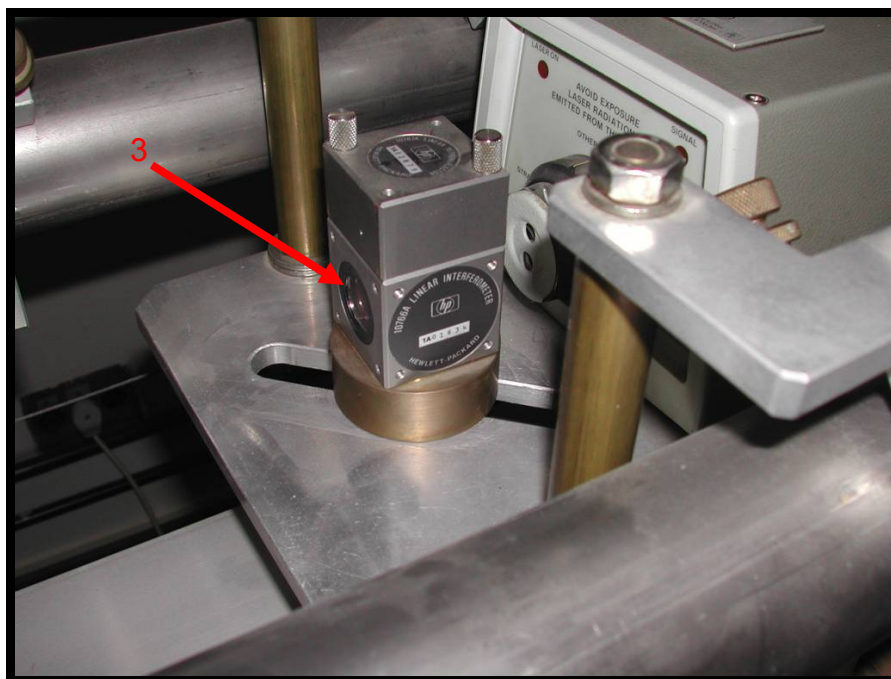
- 1- Emissor do LASER (*light amplification by stimulated emission of radiation*)(Figura 4.2): fonte de luz monocromática, muito intensa, coerente e colimada, na qual a emissão de radiação se faz pelo estímulo de um campo externo (Aurélio, 2005).
- 2- Contador e mostrador (Figura 4.2): consiste basicamente de um processador matemático que transforma a diferença de fase da onda eletromagnética em distância.

FIGURA 4.2 - EMISSOR LASER E CONTADOR-MOSTRADOR



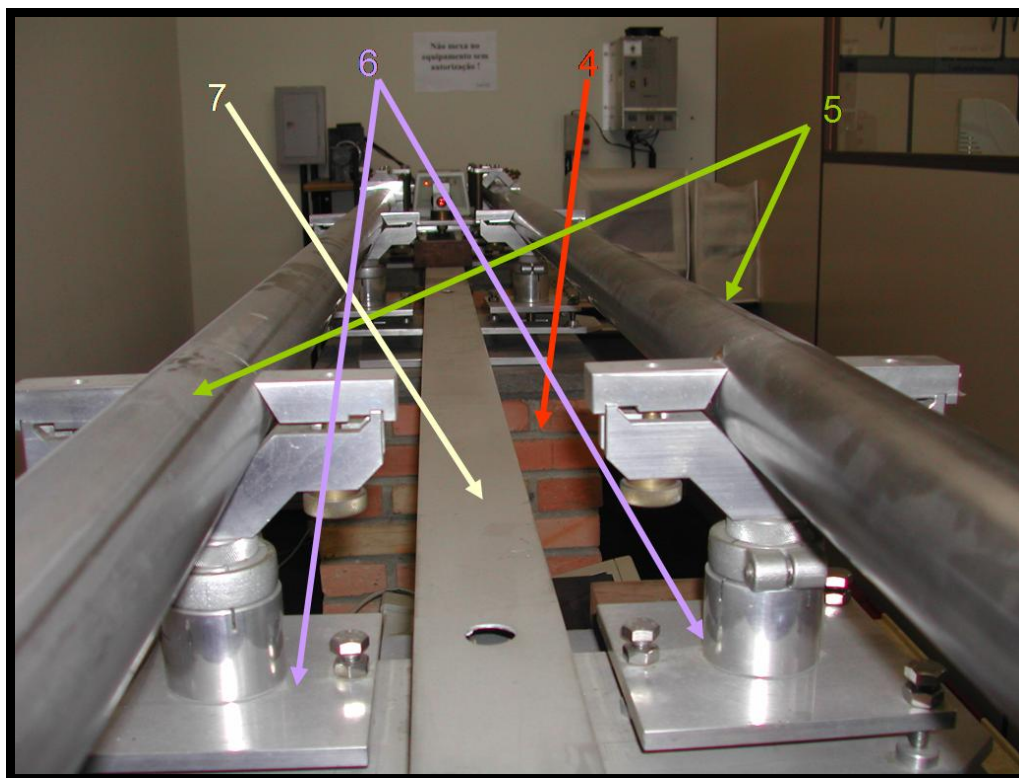
- 3- Interferômetro (Figura 4.3): divide o feixe LASER em dois, desviando um para o refletor fixo e o outro para um refletor móvel, recombinando-os após a reflexão.

FIGURA 4.3 - INTERFERÔMETRO



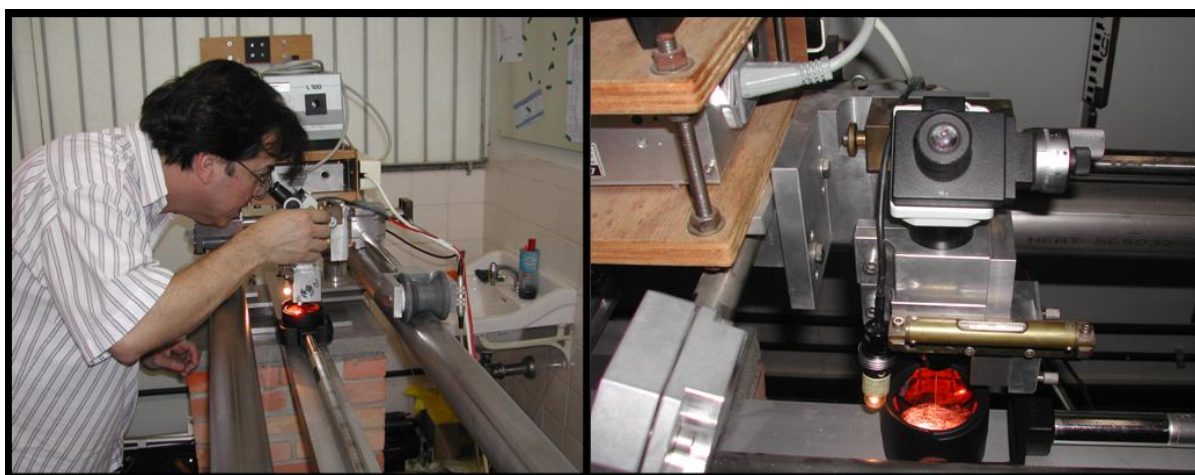
- 4- Pilares (Figura 4.4): em número de 5, alinhados, afastados entre si de 1 metro e engastados na laje do piso. Sobre os pilares estão fixados os suportes dos tubos de aço.
- 5- Tubos de aço (Figura 4.4): são dois com 5 metros de comprimento e diâmetro de 6 centímetros cada um. Funcionam como trilhos para o deslocamento do carrinho.
- 6- Sistema de fixação dos tubos de aço (Figura 4.4): é constituído por peças de alumínio que possuem três parafusos calantes que permitem posicionar os tubos de aço na posição horizontal.
- 7- Suporte de apoio para os equipamentos a serem calibrados (Figura 4.4): consiste em uma barra vazada de alumínio de seção retangular apoiada sobre os pilares. Com dimensões: 5m de comprimento; 7,5cm de largura e 4cm de altura.

FIGURA 4.4 – SISTEMA INTERFEROMÉTRICO



- 8- Carrinho (Figura 4.5): apoiado em 3 rodas que se deslocam sobre os tubos de aço. No carrinho estão fixados: o refletor móvel do interferômetro, uma luneta para as pontarias e um nível de precisão para a verticalização da luneta.

FIGURA 4.5 - CARRINHO E SEUS COMPONENTES



O interferômetro baseia-se no princípio da interferência ótica. Sua aplicação se dá na determinação de distâncias curtas com alta acurácia e na definição do metro (RÜEGER, 1996).

O primeiro interferômetro foi construído em 1880, por A. A. Michelson. Em 1889 foi realizada a primeira medida do metro utilizando uma fonte de luz. Por esse feito, Michelson recebeu o prêmio Nobel de Física (Rüeger, 1989).

Aos leitores interessados no assunto, notadamente no princípio do interferômetro, a complementação deste conteúdo pode ser encontrada em Faggion (1993).

## 5. EXPERIMENTOS REALIZADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 5.1 RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO

A graduação do bastão é centimétrica, variando de 1,30m a 2,10m, e é usada para a definição da altura do prisma: distância da extremidade inferior do bastão ao centro do prisma (Figura 5.1).

FIGURA 5.1 - ALTURA DO PRISMA



A calibração foi feita por amostragem, nas graduações de 1,30m, 1,70m e 2,00m. As Tabelas 5.1 e 5.2 apresentam os valores medidos em milímetros (três leituras) para cada graduação selecionada.

TABELA 5.1 - MEDIDAS DO BASTÃO 1 (em milímetros)

<i>Marca de 2,00m</i>		<i>Marca de 1,70m</i>		<i>Marca de 1,30m</i>	
	1999,845		1649,998		1299,885
	1999,839		1649,991		1299,884
	1999,841		1649,987		1299,883
média=	1999,842	média=	1649,992	média=	1299,884
dif. p/marca=	-0,158	dif. p/marca=	-0,008	dif. p/marca=	-0,116
desv. padrão=	0,003	desv. padrão=	0,006	desv. padrão=	0,001

TABELA 5.2 - MEDIDAS DO BASTÃO 2 (em milímetros)

Marca de 2,00m		Marca de 1,70m		Marca de 1,30m	
	2000,276		1650,149		1300,013
	2000,260		1650,157		1300,012
	2000,265		1650,165		1300,013
média=	2000,267	média=	1650,157	média=	1300,012
dif. p/marca=	0,267	dif. p/marca=	0,157	dif. p/marca=	0,012
desv. padrão=	0,008	desv. padrão=	0,008	desv. padrão=	0,001

O maior desvio padrão é de 0,008mm, obtido das medições da marca 1,70m do Bastão 2. Os demais desvios também estão na ordem do micron demonstrando alta precisão na obtenção dos dados.

Verifica-se que a maior diferença entre a graduação definida pelo fabricante e o valor obtido pela calibração ocorreu no Bastão 2, na marca de 2 metros: essa diferença foi de 0,267mm.

Considerando apenas esse erro, excluindo-se os erros nas medidas da distância e do ângulo zenital, e considerando que a tolerância de uma seção para levantamentos de alta precisão ( $3\text{mm}\sqrt{k}$ ) aplicada a uma distância de 8 metros é 0,268mm, verifica-se que o erro encontrado – 0,267mm – é significativo para visadas de comprimento menor do que 8 metros.

## 5.2 VERIFICAÇÃO DA ESPESSURA DOS TRAÇOS DO BASTÃO

O objetivo desta calibração foi verificar a influência da espessura do traço na determinação da altura do bastão.

TABELA 5.3 - ESPESSURA DOS TRAÇOS DO BASTÃO

	1,30m	$\sigma$	1,70m	$\sigma$	2,00m	$\sigma$
	0,448		0,475		0,455	
2	0,447		0,485		0,452	
3	0,447		0,489		0,453	
4	0,447		0,488		0,452	
5	0,449		0,489		0,453	
Médias	<b>0,448</b>	0,001	<b>0,485</b>	0,006	<b>0,453</b>	0,001
	Média dos três traços → → →					<b>0,462 mm</b>

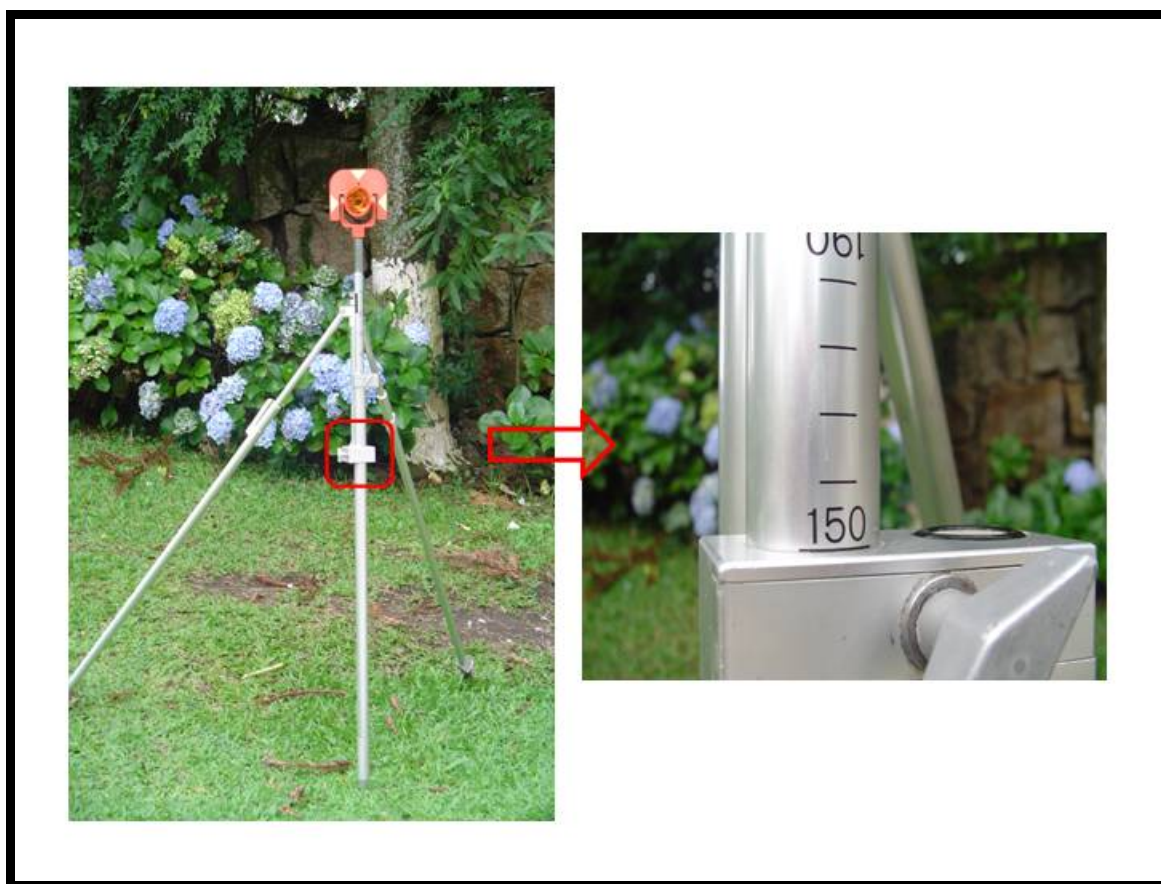
A tabela 5.3 apresenta a medição da espessura dos traços do bastão, realizada por amostragem, nas graduações de 1,30m, 1,70m e 2,00m. Valores medidos em milímetros (três leituras) para cada traço selecionado.

Mais uma vez os resultados obtidos demonstram a qualidade do equipamento utilizado na realização deste experimento.

A espessura média dos traços é de 0,462 mm. Portanto, para minimizar sua influência na determinação do desnível, deve-se garantir a mesma posição no traço em cada um dos dois bastões.

Os testes realizados nesta pesquisa recomendam a utilização da borda inferior do traço, por ser mais fácil tangenciar essa borda com a base de fixação. (Figura 5.2).

FIGURA 5.2 FIXAÇÃO DA ALTURA DO BASTÃO



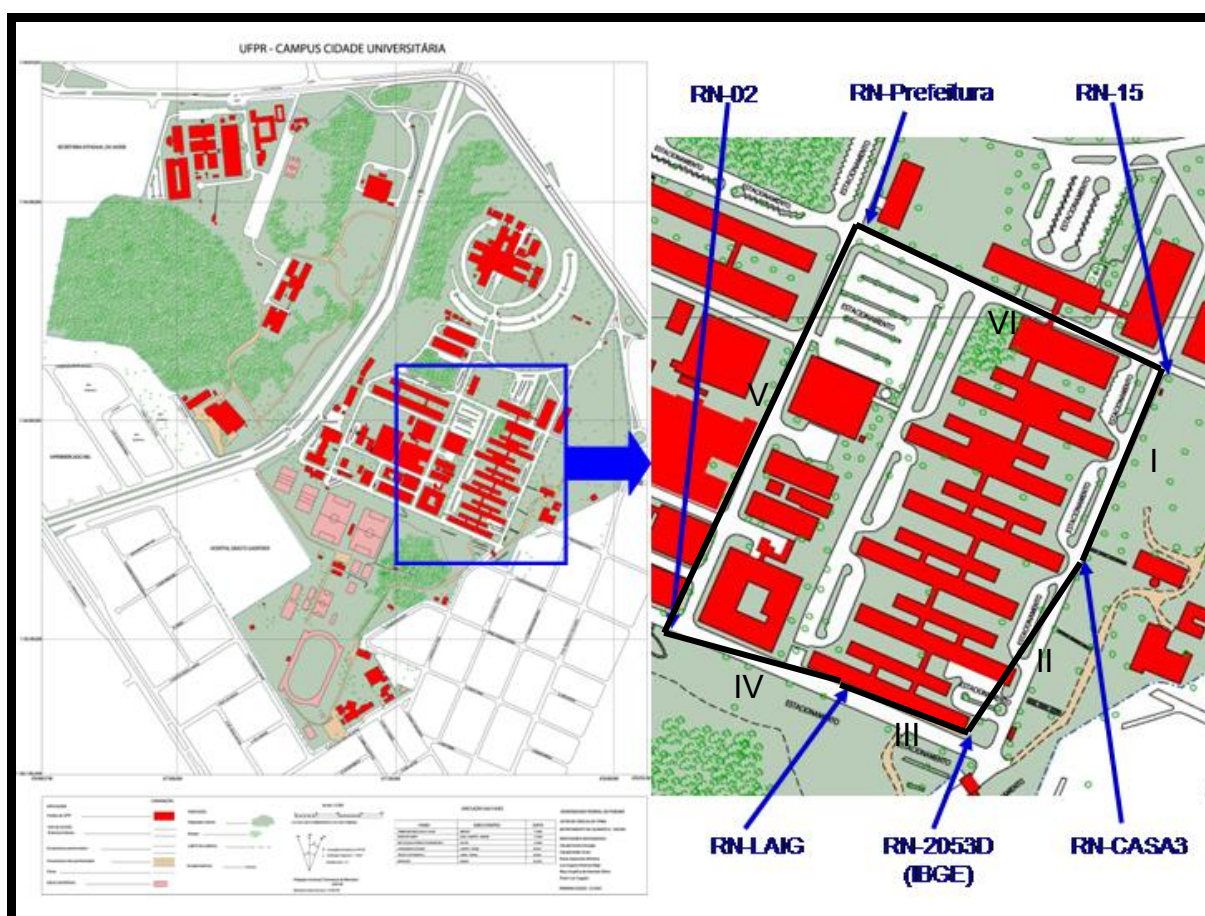
### 5.3 DEFINIÇÃO DOS LOCAIS DOS LEVANTAMENTOS

Estabeleceu-se um circuito de nivelamento no Centro Politécnico de aproximadamente 1km, composto por seis referências de nível. Três já existentes: RN-15, RN-2053D (implantada pelo IBGE) e RN-02; uma referência de nível materializada para possibilitar o fechamento do circuito: RN-PREFEITURA, e duas referências de nível materializadas para possibilitarem visadas de comprimentos iguais quando da utilização das Estações Totais: RN-CASA3 e RN-LAIG.

A figura 5.3 apresenta o circuito, bem como a posição das RRNN utilizadas no trabalho.



FIGURA 5.3 – LOCALIZAÇÃO DAS RRNN NO CENTRO POLITÉCNICO



Realizou-se também determinação de desníveis com Estações Totais na barragem de Salto Caxias, da COPEL, localizada no município de Capitão Leônidas Marques/PR. Esses experimentos foram realizados com o objetivo de avaliar o efeito da refração no ângulo zenital, em regiões onde a superfície é de concreto e ocorre elevada insolação.

As medições foram realizadas em referências de nível estabelecidas por um circuito de nivelamento geométrico, de precisão  $1\text{mm}\sqrt{k}$ , implantado pela UFPR na malha viária no entorno do reservatório de Salto Caxias, com o objetivo de avaliar a subsidência da região com a formação do reservatório

#### 5.4 ESTAÇÕES TOTAIS UTILIZADAS NOS LEVANTAMENTOS

Na determinação dos desníveis, foram utilizadas Estações Totais (Figura 5.4) de alta, média e baixa precisão angular, segundo classificação da NBR 13333

(Tabela 5.4), pertencentes ao acervo patrimonial da UFPR, Departamento de Geomática, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas – CPGCG.

FIGURA 5.4 ESTAÇÕES TOTAIS UTILIZADAS NOS TRABALHOS



TABELA 5.4 – PRECISÃO NOMINAL DAS ESTAÇÕES TOTAIS

FABRICANTE	MODELO	PRECISÃO	PRECISÃO LINEAR	NBR-13133
LEICA	TC2002	0,5"	$\pm(1\text{mm} + 1\text{ppm})$	precisão alta
TRIMBLE	ELTA S20	3"	$\pm(2\text{mm} + 2\text{ppm})$	precisão média
LEICA	TC403L	10"	$\pm(3\text{mm} + 3\text{ppm})$	precisão baixa

## 5.5 NIVELAMENTO GEOMÉTRICO DO CIRCUITO DO CENTRO POLITÉCNICO

Para o nivelamento geométrico utilizou-se o nível digital NA-3003 e miras com código de barras (Figura 5.5). As diferenças entre os comprimentos das visadas de ré e de vante ficaram abaixo de 1 metro. Todas as seções apresentaram fechamento melhor que  $3\text{mm}\sqrt{k}$ . Buscando obedecer as recomendações do IBGE, a menor leitura da mira foi de 0,40600m e a maior de 2,43075m. Os cálculos foram realizados no programa Microsoft Excel.

A tabela 5.5 apresenta um resumo dos resultados do nivelamento geométrico.

FIGURA 5.5 – NÍVEL NA 3003, MIRA DE CÓDIGO DE BARRAS (DETALHE)



TABELA 5.5 – RESUMO DO NIVELAMENTO GEOMÉTRICO

SEÇÃO	RÉ → VANTE	DISTÂNCIA(m)	FECH. ( $\text{mm}\sqrt{k}$ )	DESNÍVEL(m)
I	RN-15 → CASA3	131,61	2,12	2,6034
II	CASA3 → IBGE	139,18	0,38	3,5423
III	IBGE → LAIG	98,03	0,80	-0,2356
IV	LAIG → RN-02	122,76	1,03	-0,0999
V	RN-02 → PREFEITURA	293,97	2,64	-8,5109
VI	PREFEITURA → RN-15	220,58	0,64	2,7008

Fechamento do circuito: 0,0001m

A Tabela 5.6 apresenta as altitudes calculadas a partir da altitude da RN-2053D, que faz parte da rede altimétrica de precisão do Brasil, implantada pelo IBGE, cuja altitude é 914,3259m:

TABELA 5.6 – ALTITUDES DO CIRCUITO NIVELADO

RN	H(m)
RN-15	908,1803
RN-CASA3	910,7836
RN-IBGE	914,3259
RN-LAIG	914,0903
RN-02	913,9903
RN-PREFEITURA	905,4794

## 5.6 RESULTADOS OBTIDOS COM O NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO

### 5.6.1 Método de Visadas Iguais

Visadas de comprimentos iguais, permitem minimizar os efeitos da refração e da curvatura terrestre, portanto não se fazem necessários os seus cálculos.

Além disso, conforme demonstrado no capítulo 3, o desnível é dado pela equação (3.8):

$$\Delta h_{AB} = D_{V2} - D_{V1} \quad (3.8)$$

$$\text{onde: } D_{V2} = D'_2 \cos Z_2 \quad (3.9)$$

$$D_{V1} = D'_1 \cdot \cos Z_1 \quad (3.10)$$

A correção do erro sistemático  $\Delta D'$  (equação 3.15) para cada distância observada  $D'_1$  e  $D'_2$ , (equações 3.9 e 3.10) é determinada a partir das condições atmosféricas do local das observações. Como as condições meteorológicas são as mesmas e as distâncias medidas  $D'_1$  e  $D'_2$  são aproximadamente iguais com ângulos zenitais próximos a  $90^\circ$ , pode-se considerar que a influência dessa correção é igual para as duas distâncias observadas, portanto essa correção também não se faz necessária.

### 5.6.2 Resultados Obtidos com a Estação Total TC2002

Para a determinação dos desníveis as medições dos ângulos zenitais e distâncias foram realizadas em 3 séries completas (PD-PI) (Tabela 5.7).

TABELA 5.7 - DESNÍVEIS OBTIDOS COM A ESTAÇÃO TOTAL TC2002

SEÇÃO	D(m)	NG (m)	TC2002(m)	Dif. p/ NG(mm)	mm $\sqrt{k}$
I	128,691	2,6034	2,6023	-1,1	3
II	137,756	3,5423	3,5431	0,9	2
III	109,123	-0,2356	-0,2360	-0,4	1
IV	121,408	-0,0999	-0,0996	0,3	1
V	291,862	-8,5109	-8,5094	1,5	3
VI	218,055	2,7008	2,6994	1,4	3

Descrição da Tabela 5.7:

- Primeira coluna: seções conforme discriminado na Tabela 5.5.
- Segunda coluna: comprimento do lance medido com a Estação Total, distância de ré mais distância de vante.
- Terceira coluna: desníveis obtidos com nivelamento geométrico.
- Quarta coluna: desníveis obtidos com a Estação Total TC 2002.
- Quinta coluna: diferença entre os desníveis obtidos com a TC 2002 e o nivelamento geométrico.
- Sexta coluna: fechamento da seção em  $\text{mm}\sqrt{k}$ , tomando-se a diferença (quinta coluna) pelo comprimento do lance em quilômetros (segunda coluna), ou seja: 
$$\frac{\text{Dif. (mm)}}{\sqrt{D(\text{km})}}$$

Comparando as diferenças entre os desníveis obtidos com a Estação Total TC 2002 e o nível digital NA 3003 (considerado padrão de referência para nosso trabalho)(Tabela 5.7). Observa-se que atendem a resolução para trabalhos de precisão .

A Tabela 5.8 apresenta a precisão esperada (em mm) para o desnível  $\Delta H$  de uma seção, com a Estação Total TC 2002, conforme equação 3.14, e em comparação com as especificações para nivelamento de precisão, utilizando 3 séries de observações ( $N_s = 3$ ).

A sexta coluna da Tabela 5.4 mostra que as diferenças dos desníveis obtidos entre a TC2002 e o nivelamento geométrico de todas as seções atendem a especificação para levantamentos de alta precisão:  $3\text{mm}\sqrt{k}$ , corroborando com a precisão esperada da Estação Total TC 2002 (Tabela 5.8).

TABELA 5.8 – TC 2002: COMPARAÇÃO ENTRE PRECISÃO ESPERADA VERSUS  
ESPECIFICAÇÕES DO IBGE -  $N_s = 3$

D(m)	ESTAÇÃO TOTAL	ESPECIFICAÇÕES		
	TC 2002	3mm	6mm	8mm
20	0,1	0,4	0,8	1,1
40	0,1	0,6	1,2	1,6
60	0,2	0,7	1,5	2,0
80	0,2	0,8	1,7	2,3
100	0,2	0,9	1,9	2,5
120	0,2	1,0	2,1	2,8
140	0,2	1,1	2,2	3,0
160	0,2	1,2	2,4	3,2
180	0,2	1,3	2,5	3,4
200	0,2	1,3	2,7	3,6
220	0,3	1,4	2,8	3,8
240	0,3	1,5	2,9	3,9
260	0,3	1,5	3,1	4,1
280	0,3	1,6	3,2	4,2
300	0,3	1,6	3,3	4,4

Descrição da Tabela 5.8:

- Primeira coluna: distância em metros.
- Segunda coluna: precisão esperada (mm) em função da distância e do ângulo zenital no intervalo de 90° a 80°. As cores definem em qual especificação a precisão esperada se enquadra.

### 5.6.3 Resultados Obtidos com a Estação Total ELTA S20

Para a determinação dos desníveis as medições foram realizadas em 3 séries completas (PD-PI) (Tabela 5.9).

TABELA 5.9 - DESNÍVEIS OBTIDOS COM A ESTAÇÃO TOTAL ELTA S20

SEÇÃO	D(m)	NG (m)	ELTA S20	ET - NG(mm)	$\text{mm}\sqrt{k}$
I	128,691	2,6034	2,6044	1,0	3
II	137,756	3,5423	3,5433	1,1	3
III	109,123	-0,2356	-0,2357	0,0	1
IV	121,408	-0,0999	-0,1003	-0,3	1
V	291,862	-8,5109	-8,5075	3,4	6
VI	218,055	2,7008	2,6996	-1,2	3

Descrição da Tabela 5.9:

- Primeira coluna: seções conforme discriminado na Tabela 5.5
- Segunda coluna: comprimento do lance medido com a Estação Total, distância de ré mais distância de vante.
- Terceira coluna: desníveis obtidos com nivelamento geométrico.
- Quarta coluna: desníveis obtidos com a Estação Total ELTA S20.
- Quinta coluna: diferença entre os desníveis obtidos com a ELTA S20 e o nivelamento geométrico.
- Sexta coluna: fechamento da seção em  $\text{mm}\sqrt{k}$ , tomando-se a diferença (quinta coluna) pelo comprimento do lance em quilômetros (segunda coluna), ou seja:  $\frac{\text{Dif. (mm)}}{\sqrt{D(\text{km})}}$

A Tabela 5.10 apresenta a precisão esperada (em mm) para o desnível  $\Delta H$  de uma seção, utilizando a Estação Total ELTA S20, em 3 séries completas de observações ( $N_s = 3$ ), cálculo feito com a Equação 3.14, e as especificações do nivelamento de precisão (IBGE, 1986) para cada distância considerada.

A análise das duas últimas colunas da tabela 5.9 mostram que as diferenças dos desníveis obtidos entre a Estação Total ELTA S20 e o nivelamento geométrico estão coerentes com a precisão esperada (Tabela 5.10).

TABELA 5.10 – ELTA S20: COMPARAÇÃO ENTRE PRECISÃO ESPERADA VERSUS  
ESPECIFICAÇÕES DO IBGE -  $N_s = 3$

D(m)	ESTAÇÃO TOTAL	ESPECIFICAÇÕES		
	ELTA S20	3mm	6mm	8mm
20	0,3	0,4	0,8	1,1
40	0,4	0,6	1,2	1,6
60	0,5	0,7	1,5	2,0
80	0,5	0,8	1,7	2,3
100	0,6	0,9	1,9	2,5
120	0,8	1,0	2,1	2,8
140	0,9	1,1	2,2	3,0
160	1,0	1,2	2,4	3,2
180	1,1	1,3	2,5	3,4
200	1,2	1,3	2,7	3,6
220	1,3	1,4	2,8	3,8
240	1,4	1,5	2,9	3,9
260	1,5	1,5	3,1	4,1
280	1,7	1,6	3,2	4,2
300	1,8	1,6	3,3	4,4

Descrição da Tabela 5.10:

- Primeira coluna: distância em metros.
- Segunda coluna: precisão esperada (mm) em função da distância e do ângulo zenital no intervalo de  $90^\circ$  a  $80^\circ$ . As cores definem em qual especificação a precisão esperada se enquadra.

A Tabela 5.10 mostra que a observação com 3 séries, limita em 240 metros a expectativa de especificação de alta precisão ( $3\text{mm}\sqrt{k}$ ) para a ELTA S20, a partir desse comprimento até o limite da tabela, a expectativa passa a ser de  $6\text{mm}\sqrt{k}$ .

#### 5.6.4 Resultados Obtidos com a Estação Total TC403L

Para a determinação dos desníveis com este equipamento as medições foram realizadas em 6 séries completas (PD-PI). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.11.



TABELA 5.11 - DESNÍVEIS OBTIDOS COM A ESTAÇÃO TOTAL TC 403L

SEÇÃO	D(m)	NG (m)	TC403L(m)	dif.403(mm)	mm $\sqrt{k}$
I	128,691	2,6034	2,6017	-1,7	5
II	137,756	3,5423	3,5425	0,2	1
III	109,123	-0,2356	-0,2367	-1,1	3
IV	121,408	-0,0999	-0,0992	0,7	2
V	291,862	-8,5109	-8,5126	-1,7	3
VI	218,055	2,7008	2,6973	-3,5	7

Descrição da Tabela 5.11:

- Primeira coluna: seções conforme discriminado na Tabela 5.5.
- Segunda coluna: comprimento do lance medido com a Estação Total, distância de ré mais distância de vante.
- Terceira coluna: desníveis obtidos com nivelamento geométrico.
- Quarta coluna: desníveis obtidos com a Estação Total TC 403L.
- Quinta coluna: diferença entre os desníveis obtidos com a TC 403L e o nivelamento geométrico.
- Sexta coluna: fechamento da seção em mm $\sqrt{k}$ , tomando-se a diferença (quinta coluna) pelo comprimento do lance em quilômetros (segunda coluna),

ou seja:  $\frac{\text{Dif. (mm)}}{\sqrt{D(\text{km})}}$

A Tabela 5.12 apresenta a precisão esperada (em mm) para o desnível  $\Delta H$  de uma seção, com a Estação Total TC 403L, conforme equação 3.14, e em comparação com as especificações para nivelamento de precisão, utilizando 6 séries completas de observações ( $N_s = 6$ ). Por ser uma Estação Total de baixa precisão, o cálculo da precisão esperada indicou a necessidade de um número de séries maior, com o objetivo de obter precisão mais próxima das outras Estações utilizadas nos experimentos.

A análise das duas últimas colunas da tabela 5.11 mostram que as diferenças dos desníveis obtidos entre a TC403L e o nivelamento geométrico das seções I e VI, estão dentro do esperado (Tabela 5.12), os demais desníveis estão melhores do que a expectativa.

TABELA 5.12 – TC 403L: COMPARAÇÃO ENTRE PRECISÃO ESPERADA VERSUS ESPECIFICAÇÕES DO IBGE -  $N_s = 6$

	ESTAÇÃO TOTAL	ESPECIFICAÇÕES		
	TC 403L	3mm	6mm	8mm
20	0,4	0,4	0,8	1,1
40	0,6	0,6	1,2	1,6
60	0,9	0,7	1,5	2,0
80	1,1	0,8	1,7	2,3
100	1,4	0,9	1,9	2,5
120	1,7	1,0	2,1	2,8
140	2,0	1,1	2,2	3,0
160	2,2	1,2	2,4	3,2
180	2,5	1,3	2,5	3,4
200	2,8	1,3	2,7	3,6
220	3,1	1,4	2,8	3,8
240	3,3	1,5	2,9	3,9
260	3,6	1,5	3,1	4,1
280	3,9	1,6	3,2	4,2
300	4,2	1,6	3,3	4,4

Observa-se na Tabela 5.12 que com seis séries completas (PD-PI) tem-se expectativa de alta precisão ( $3\text{mm}\sqrt{k}$ ) até 20 metros de comprimento de seção. A partir daí, até o comprimento de 180 metros, tem-se a expectativa de precisão de áreas mais desenvolvidas ( $6\text{mm}\sqrt{k}$ ). A partir de 200 metros, até o limite não determinado na tabela, a expectativa é de precisão para áreas menos desenvolvidas ( $8\text{mm}\sqrt{k}$ )

#### 5.6.5 Contra Nivelamento com a Estação Total ELTA S20

Foi realizado um contra-nivelamento com a Estação Total ELTA S20 e comparado com os resultados obtidos do nivelamento com a mesma Estação Total na Seção 5.6.3.

No contra-nivelamento não foram observadas as distâncias inclinadas ( $D'$ ) nem os ângulos zenitais ( $Z$ ), e sim as distâncias verticais ( $D_v$ ) fornecidas diretamente pelo equipamento. As distâncias verticais foram medidas em 3 séries PD-PI, para ré e para vante.

A Tabela 5.13 apresenta a comparação entre os nivelamento e contra-nivelamento da Estação Total ELTA S20, bem como com o nivelamento geométrico.

TABELA 5.13 – CONTRA-NIVELAMENTO COM A ESTAÇÃO TOTAL ELTA S20

SEÇÃO	NG(m)	D (m)	N	CN	N - CN	mm/K	(N+CN)/2	dif/NG	mm/K
I	2,6034	128,8	2,6044	2,6042	0,0002	0,6	2,6043	0,0009	2,6
II	3,5423	137,8	3,5433	3,5424	0,0009	2,5	3,5428	0,0006	1,6
III	-0,2356	109,2	-0,2357	-0,2347	-0,0010	3,0	-0,2352	0,0005	1,4
IV	-0,0999	121,5	-0,1003	-0,1010	0,0007	2,0	-0,1006	0,0007	1,9
V	-8,5109	291,9	-8,5075	-8,5103	0,0028	5,1	-8,5089	0,0020	3,7
VI	2,7008	218,1	2,6996	2,7003	-0,0007	1,5	2,7000	0,0009	1,9

Descrição da Tabela 5.13:

- Primeira coluna: seções conforme discriminado na Tabela 5.5.
- Segunda coluna: desníveis obtidos com o nivelamento geométrico
- Terceira coluna: comprimento da seção.
- Quarta coluna: desníveis obtidos no nivelamento com a ELTA S20.
- Quinta coluna: desníveis obtidos no contra-nivelamento com a ELTA S20.
- Sexta coluna: diferença entre nivelamento e contra-nivelamento.
- Sétima coluna: fechamento entre N e CN da Seção.
- Oitava coluna: desnível médio do nivelamento e do contra-nivelamento.
- Nona coluna: diferença entre a média (oitava coluna) e o nivelamento geométrico.
- Décima coluna: fechamento do desnível médio comparado ao nivelamento geométrico.

Os fechamentos obtidos para cada seção, nivelamento e contra-nivelamento (sétima coluna), corroboram com a precisão esperada para o equipamento (Tabela 5.10), bem como quando se verifica o fechamento das médias do nivelamento e contra-nivelamento de cada seção (décima coluna) com o nivelamento geométrico.

### 5.6.6 Levantamento com Visadas de Comprimentos Desiguais

Os levantamentos foram realizados no mesmo circuito utilizando a estação Total ELTA S20 cuja precisão nominal é mais comum com as disponíveis nas empresas que desenvolvem projetos em topografia e geodésia. Como critério de observação utilizou-se 3 séries completas (Tabela 5.14). É importante salientar que a coleta dos dados ocorreu em dia nublado, o que caracteriza atmosfera em estado neutro, conforme descrito nas seções 2.7.3.3 e 2.8.3, Portanto sendo válida, para correção do efeito da refração, a equação 2.5.

$$c_r = \frac{kD^2}{2R} \quad (2.5)$$

Onde:

$$K= 0,13$$

$$R= 6371 \text{ km}$$

D= distância horizontal

TABELA 5.14 - DESNÍVEIS OBTIDOS COM A ESTAÇÃO TOTAL ELTA S20 EM COMPRIMENTOS DE VISADAS DESIGUAIS

SEÇÃO	D(r)	D(v)	D(r+v)	$\sigma_D$	$3\sqrt{K}$	NG (m)	$\Delta h(m)$	$\Delta h - NG$	mm $\sqrt{k}$
I	28,5	100,9	129,4	1,0	1,0	2,6034	2,6028	-0,6	2
II	40,7	96,7	137,4	0,9	1,1	3,5423	3,5416	-0,7	2
III	72,8	40,5	113,3	0,9	1,0	-0,2356	-0,2347	0,9	3
IV	32,0	89,2	121,2	0,9	1,0	-0,0999	-0,1007	-0,8	2
V	100,7	191,2	291,9	1,8	1,6	-8,5109	-8,5132	-2,3	4
VI	80,5	137,9	218,4	1,4	1,4	2,7008	2,7006	-0,3	1
VII	72,7	150,5	223,2	1,4	1,4	-0,3356	-0,3370	-1,4	3

Descrição da Tabela 5.14:

- Primeira coluna: seções conforme discriminado na Tabela 5.5, além de uma seção extra: VII= RN-IBGE → RN-02 .

- Segunda coluna: comprimento da visada para ré.
- Terceira coluna: comprimento da visada para vante.
- Quarta coluna: comprimento total da seção: (segunda mais terceira colunas)
- Quinta coluna: precisão esperada, aplicando-se a equações 2.21 e 3.9.
- Sexta coluna: especificação para nivelamento de alta precisão ( $3\text{mm}\sqrt{k}$ ).
- Sétima coluna: desníveis obtidos com nivelamento geométrico.
- Oitava coluna: desníveis obtidos com a Estação Total ELTA S20.
- Nona coluna: diferença entre os desníveis obtidos com a ELTA S20 e o nivelamento geométrico.
- Décima coluna: fechamento da seção em  $\text{mm}\sqrt{k}$ , tomando-se a diferença (nona coluna) pelo comprimento do lance em quilômetros (quarta coluna) (Dr+v), ou seja: 
$$\frac{\text{Dif. (mm)}}{\sqrt{D_{r+v} \text{ (km)}}$$

A análise da precisão esperada (quinta coluna) com a especificação para nivelamento de alta precisão (sexta coluna), verifica-se que apenas na seção V a precisão esperada é maior que a especificação para nivelamento de alta precisão ( $3\text{mm}\sqrt{k}$ ), justificando o fechamento da seção em  $4\text{mm}\sqrt{k}$ . Os resultados apresentam coerência entre as especificações e a precisão esperada da Estação Total Elta S20.

## 5.7 LEVANTAMENTOS REALIZADOS NA BARRAGEM DE SALTO CAXIAS.

Na rede altimétrica implantada pela UFPR em Salto Caxias, de precisão  $1\text{mm}\sqrt{k}$ , determinou-se o desnível com Estação Total entre as RN 50A e a RN 51 (Figura 5.6), com visadas de comprimentos diferentes, aproximadamente 470m para ré e 680m para vante, para avaliar o efeito da refração no ângulo zenital.

FIGURA 5.6 – RN-50A E RN-51 – BARRAGEM DE SALTO CAXIAS



A determinação do desnível entre as duas RRNN deu-se em duas épocas distintas:

- 17/08/2004: época de elevada insolação. Utilizou-se a Estação Total ELTAS20.
- 16/06/2005: nublado durante todo o dia. Utilizou-se a TC2002 .

5.7.1 Medição do Desnível RN-50A para RN-51, no dia 17 de agosto de 2004, dia de elevada insolação

A tabelas 5.15 apresenta o desnível observado no dia 17/08/2004, utilizando-se a Estação Total ELTA S20, com 3 séries de observação.

TABELA 5.15 – DESNÍVEL RN-50A PARA RN-51 CALCULADO COM  $K=0,13$  E MODELO DE TURBULÊNCIA INSTÁVEL

ESTADO	Dr	Dv	D(r+v)	$\sigma D$	NG(m)	Dh(m)	Dif p/ NG(mm)	$mm\sqrt{k}$
k= 0,13	470	680	1150	6,9	-0,0227	-0,0853	-62,6	58
INSTÁVEL	470	680	1150	6,9	-0,0227	-0,0170	-5,7	5

Descrição da Tabela 5.15:

- Segunda coluna: comprimento da visada para ré.
- Terceira coluna: comprimento da visada para vante.
- Quarta coluna: comprimento total da seção: (terceira mais quarta colunas)
- Quinta coluna: precisão esperada, aplicando-se as equações 2.21 e 3.9.
- Sexta coluna: desníveis obtidos com nivelamento geométrico.
- Sétima coluna: desníveis obtidos com a Estação Total ELTA S20.
- Oitava coluna: diferença entre os desníveis obtidos com a ELTA S20 e o nivelamento geométrico.
- Nona coluna: fechamento da seção em  $\text{mm}\sqrt{k}$ , tomando-se a diferença (oitava coluna) pelo comprimento do lance em quilômetros (quarta coluna)

$$(D_{r+v}), \text{ ou seja: } \frac{\text{Dif. (mm)}}{\sqrt{D_{r+v} \text{ (km)}}$$

Na primeira linha da tabela 5.15, apresenta-se o cálculo do desnível utilizando-se  $k= 0,13$  para determinar o efeito da refração. Observa-se uma discrepância de  $-62,6$  mm no desnível em comparação com o nivelamento geométrico, diferindo em muito da precisão esperada de  $6,9\text{mm}$ . Essa diferença acarreta um fechamento de  $58\text{mm}\sqrt{k}$ .

Os desvios padrão das séries de leituras zenitais para ré e para vante estão coerentes com a precisão nominal da estação total:  $3,1''$  e  $2,1''$ , respectivamente, indicando boa precisão na medição dos ângulos verticais.

Outro aspecto importante a ser considerado é que o equipamento só realiza a medida da distância se houver retorno do sinal em qualquer ponto do prisma. O prisma tem  $60$  milímetros de diâmetro, considerando o caso extremo de visada na borda inferior ou superior, o erro máximo seria de  $30$  milímetros. Portanto, a diferença encontrada de  $-62,6\text{mm}$  é o dobro do erro máximo supracitado. Conclui-se que a causa possível para tal diferença se deve ao efeito da refração no ângulo vertical, notadamente pelas condições meteorológicas do momento da observação, caracterizada como atmosfera em estado instável (seção 2.7.3.1).

Na segunda linha da tabela apresenta-se cálculo do desnível utilizando-se o modelo de estado de turbulência instável (equação 2.45) para determinar o efeito da refração no ângulo zenital.

$$\beta'' = D \left[ 0,1 \left( \frac{P}{1000} \right)^{0,286} \left( -0,027 F^{2/3} h^{-4/3} + 2,06 \frac{T}{P^{1,286}} \frac{\partial P}{\partial h} \right) + 0,0034 \right] \quad (2.45)$$

As medições se deram em período de elevada insolação, conforme dados fornecidos pela estação meteorológica do SIMEPAR, na barragem de Salto Caxias, onde a radiação solar medida naquele horário foi de:  $R = 656 \text{w/m}^2$ .

Na equação 2.45, adotou-se o gradiente médio vertical da pressão definido por Bomford (1975), dado por:

$$\frac{\partial P}{\partial h} = -0,12 \text{mb/m.}$$

O termo  $F$  - fluxo de troca de calor entre o ar e o solo, da equação 2.45 - requer uma instrumentação bem mais elaborada que a simples medida da temperatura em função da altura. É expresso em watts por metro quadrado, depende fundamentalmente da radiação solar e da absorção de calor do solo, e é dado pela expressão 2.39.

$$F = R_s - G - E \quad (2.39)$$

onde:

$F$  = fluxo de calor entre o ar e o solo.

$R_s$  = radiação na superfície do solo.

$G$  = energia transferida ao solo.

$E$  = perda de calor devido à evaporação da água do solo.

Não sendo possível medir tal grandeza, adotou-se o valor máximo definido por Angus-Lepan (1980) apud Schaal (1995) que, para o período diurno, é de:

$$F = 450 \text{w/m}^2$$

Após o cálculo, observou-se uma diferença de 5,7mm em comparação com o nivelamento geométrico. Essa diferença acarreta um fechamento de  $5\text{mm}\sqrt{k}$ , coerente com precisão esperada para a ELTA S20 de 6,9mm.



As especificações de precisão para uma seção de 1150 metros, são:

$$\begin{aligned} 3\text{mm}\sqrt{k} &\rightarrow 3,2\text{mm} \\ 6\text{mm}\sqrt{k} &\rightarrow 6,4\text{mm} \\ 8\text{mm}\sqrt{k} &\rightarrow 8,6\text{mm} \end{aligned}$$

Ao aplicar-se o modelo de turbulência instável, fecha-se a seção com precisão para áreas mais desenvolvidas ( $6\text{mm}\sqrt{k}$ )

5.7.2 Medição do Desnível RN-50A para RN-51, no dia 16 de junho de 2005, dia nublado

A tabela 5.16 apresenta os resultados das observações do dia 16/06/2005, manhã e tarde utilizando-se a Estação Total TC2002, com 3 séries de observação PD-PI.

TABELA 5.16 – DESNÍVEL RN-50A PARA RN-51 CALCULADO COM  $K=0,13$

HORA	Dr	Dv	D(r+v)	$\sigma D$	NG	Dif p/ NG	Dif p/ NG	$\text{mm}\sqrt{k}$
10:53	466	684	1150	1,2	-0,0227	-0,0243	-1,6	2
14:45	466	683	1149	1,2	-0,0227	-0,0221	0,6	1

Descrição da Tabela 5.16:

- Primeira coluna: Hora da observação
- Segunda coluna: comprimento da visada para ré.
- Terceira coluna: comprimento da visada para vante.
- Quarta coluna: comprimento total da seção: (terceira mais quarta colunas)
- Quinta: precisão esperada, aplicando-se as equações 2.21 e 3.9.
- Sexta coluna: desníveis obtidos com nivelamento geométrico.
- Sétima coluna: desníveis obtidos com a Estação Total ELTA S20.
- Oitava coluna: diferença entre os desníveis obtidos com a ELTA S20 e o nivelamento geométrico.

- Nona coluna: fechamento da seção em  $\text{mm}\sqrt{k}$ , tomando-se a diferença (nona coluna) pelo comprimento do lance em quilômetros (quinta coluna) ( $D_{r+v}$ ), ou

seja: 
$$\frac{\text{Dif. (mm)}}{\sqrt{D_{r+v} \text{ (km)}}$$

As observações se deram em período nublado, característico de atmosfera no estado neutro (seções: 2.7.3.3 e 2.8.3), sendo utilizada a equação (2.5) para determinação do efeito da refração.

As determinações de desnível na parte da manhã e da tarde fecham em  $2\text{mm}\sqrt{k}$  e  $1\text{mm}\sqrt{k}$ , respectivamente. Os resultados apresentam coerência entre a especificação para levantamentos de alta precisão e a precisão esperada da Estação Total TC 2002, calculada para o comprimento da seção.

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 6.1 CONCLUSÕES

Os experimentos realizados neste trabalho demonstram, em face à metodologia adotada, a viabilidade de obtenção de desníveis de precisão com estação total, segundo as especificações e normas gerais para levantamentos geodésicos do IBGE.

Os desníveis obtidos com as estações totais de alta, média e baixa precisão, com visadas iguais, apresentam resultados compatíveis com a precisão nominal de cada estação total e o número de séries observadas, de acordo com a teoria de propagação dos erros, não ocorrendo, em nenhum dos experimentos, erro de fechamento superior a classe de  $6\text{mm}\sqrt{k}$ , correspondente a precisão do fechamento de uma seção para áreas mais desenvolvidas.

Nos experimentos com visadas de comprimentos desiguais na determinação de desníveis com estação total, além da determinação da curvatura terrestre (de simples solução algébrica), o efeito da refração no ângulo vertical tem que ser levado em conta. Duas situações se apresentam nos levantamentos em função das condições meteorológicas: estado neutro da atmosfera e estado instável de turbulência da atmosfera (considerando observações diurnas, mais comuns nos levantamentos). Os experimentos em condições de atmosfera neutra apresentam resultados bastante consistentes, compatíveis com os resultados obtidos para visadas de igual comprimento, verifica-se aí que a determinação do efeito da curvatura terrestre é o mais significativo para a obtenção de acurácia. Já na segunda situação a simples adoção de um índice de refração único não determina o efeito real da refração, podendo, inclusive, deteriorar o resultado. O experimento realizado em 17 de agosto de 2004, na barragem de Salto Caxias, apresenta melhor resultado ao ser utilizado um modelo de transferência de turbulência na determinação do efeito da refração no ângulo vertical.

Nos testes realizados, verificou-se que a maior influência na determinação de desníveis está na observação do ângulo zenital. A precisão nominal linear de qualquer estação total atual atende as necessidades para determinações de desníveis de precisão.

## 6.2 RECOMENDAÇÕES

Para obtenção de maior acurácia na fixação da altura do bastão graduado, recomenda-se tangenciar a borda inferior do traço.

Em determinações de desnível com visadas desiguais, fazer as medições em condições meteorológicas de atmosfera em estado neutro.

Fazer uma pré-análise para estabelecer o número de séries completas (PD-PI) necessárias, de acordo com a precisão nominal angular da estação total, visando a obtenção da precisão especificada e a otimização dos trabalhos de campo.

Os resultados alcançados neste trabalho, apontam para a aplicação no monitoramento tridimensional de obras.

Recomenda-se a continuidade da pesquisa para avaliar a influência da refração no ângulo vertical, aplicando-se modelos de transferência de turbulência.

**APÊNDICES**

1- DADOS E CÁLCULOS COM A ESTAÇÃO TOTAL TC 2002	86
2- DADOS E CÁLCULOS COM A ESTAÇÃO TOTAL ELTA S 20	88
3- DADOS E CÁLCULOS COM A ESTAÇÃO TOTAL TC 403L	90
4- DADOS E CÁLCULO DO CONTRA-NIVELAMENTO COM A ELTA S20	93
5- DADOS E CÁLCULOS COM A ESTAÇÃO TOTAL ELTA S20 – VISADAS DESIGUAIS	94
6- DADOS E CÁLCULOS COM A ESTAÇÃO TOTAL ELTA S20 EM SALTO CAXIAS – AGOSTO DE 2004	98
7- DADOS E CÁLCULOS COM A ESTAÇÃO TOTAL TC 2002 EM SALTO CAXIAS – JUNHO DE 2005	99
8- SIMEPAR – DADOS METEOROLÓGICOS DE SALTO CAXIAS	100
9- DADOS E CÁLCULOS DO NIVELAMENTO GEOMÉTRICO	102

ESTAÇÃO TOTAL	DATA	LOCAL DO LEVANTAMENTO
TC 2002	04 a 08/12/2005	Centro Politécnico

RN	HORA	DADOS DE CAMPO				CÁLCULO								
15	09:30	90	54	3,9	64,3790	90	54	7,7	Dv= -1,0138					
		269	5	48,5	64,3790									
	09:32	90	54	5,5	64,3790					Z=	90	54	8,3	
		269	5	48,9	64,3790					σ=			0,6	
↓	09:34	90	54	5,6	64,3790	90	54	8,9	Dv= 1,5885					
		269	5	47,8	64,3790									
	09:40	88	35	2,7	64,3120					D'= 64,3790				
		271	24	52,5	64,3120					88	35	5,1		
CASA3	09:44	88	35	0,3	64,3120	88	35	4,3	Desn= 2,6023					
		271	24	51,6	64,3120					Z=	88	35	4,9	
	09:49	88	35	0,9	64,3120					σ=			0,5	
		271	24	50,4	64,3120					D'= 64,3120				
↓	11:06	91	25	35,6	68,9110	91	25	36,5	Dv= -1,7159					
		268	34	22,6	68,9110									
	CASA3	11:08	91	25	35,7					68,9110	Z=	91	25	36,7
		268	34	23,3	68,9110					σ=			0,6	
↓	11:11	91	25	35,9	68,9110	91	25	37,4	Dv= 1,8272					
		268	34	21,2	68,9110									
	11:18	88	28	44,4	68,8450					D'= 68,9110				
		271	31	14,8	68,8450					88	28	44,8		
IBGE	11:20	88	28	43,1	68,8450	88	28	45,3	Desn= 3,5431					
		271	31	12,6	68,8450					Z=	88	28	44,9	
	11:23	88	28	42,4	68,8450					σ=			0,3	
		271	31	12,9	68,8450					D'= 68,8450				
↓	15:53	89	49	32,6	54,3470	89	49	35,8	Dv= 0,1646					
		270	10	20,9	54,3470									
	IBGE	15:57	89	49	30,7					54,3470	Z=	89	49	35,1
		270	10	23,7	54,3470					σ=			1,4	
↓	16:01	89	49	32,4	54,3470	89	49	36,1	Dv= -0,0714					
		270	10	20,2	54,3470									
	16:02	270	10	20,2	54,3470					D'= 54,3470				
		270	10	20,2	54,3470					89	49	36,1		
LAIG	15:38	90	4	27,9	54,7760	90	4	27,4	Desn= -0,2360					
		269	55	27,2	54,7760									
	15:40	90	4	26,1	54,7760					Z=	90	4	28,7	
		269	55	29,5	54,7760					σ=			1,5	
	15:43	90	4	24,5	54,7760					D'= 54,7760				
		269	55	29,6	54,7760					90	4	27,4		

ESTAÇÃO TOTAL	DATA	LOCAL DO LEVANTAMENTO
TC 2002	04 a 08/12/2005	Centro Politécnico

RN	HORA	DADOS DE CAMPO				CÁLCULO			
	17:46	89	47	6,9	60,6730				
		270	12	49,2	60,6730	89	47	8,9	Dv= 0,2269
LAIG	17:53	89	47	4,6	60,6730	Z=	89	47	8,6
		270	12	47,9	60,6730	89	47	8,3	$\sigma=$ 0,3
	17:59	89	47	6	60,6730	D'=	60,6730		
		270	12	48,8	60,6730	89	47	8,6	
	18:03	89	52	45,4	60,7350				
		270	7	8,6	60,7350	89	52	48,4	Dv= 0,1273
02	18:09	89	52	43,7	60,7350	Z=	89	52	47,7
		270	7	8,9	60,7350	89	52	47,4	$\sigma=$ 0,6
	18:12	89	52	44,2	60,7350	D'=	60,7350		Desn= -0,0996
		270	7	9,8	60,7350	89	52	47,2	
	13:40	88	46	2,7	145,8820				
	13:43	271	13	52,9	145,8820	88	46	7,4	Dv= 3,1362
02	13:45	88	46	3,5	145,8820	Z=	88	46	6,5
	13:45	271	13	51,5	145,8820	88	46	6,0	$\sigma=$ 0,6
	13:46	88	46	2,3	145,8820	D'=	145,8820		
	13:47	271	13	52,1	145,8820	88	46	6,1	
	13:26	92	6	31,6	145,9800				
	13:28	267	53	24	145,9800	92	6	33,8	Dv= -5,3732
Prefeitura	13:31	92	6	34,2	145,9800	Z=	92	6	33,9
	13:32	267	53	25,2	145,9800	92	6	34,5	$\sigma=$ 0,6
	13:34	92	6	32,1	145,9800	D'=	145,9800		Desn= -8,5094
	13:35	267	53	25,4	145,9800	92	6	33,4	
	16:29	91	13	56,9	109,0440				
	16:30	268	45	56,9	109,0440	91	14	0,0	Dv= -2,3470
Prefeitura	16:31	91	13	54,7	109,0440	Z=	91	13	59,9
	16:32	268	45	54,7	109,0440	91	14	0,0	$\sigma=$ 0,2
	16:35	91	13	56,8	109,0440	D'=	109,0440		
	16:34	268	45	57,6	109,0440	91	13	59,6	
	16:08	89	48	49	109,0110				
	16:11	270	11	3,2	109,0110	89	48	57,8	Dv= 0,3524
15	16:12	89	48	51,4	109,0110	Z=	89	48	53,2
	16:14	270	11	4,4	109,0110	89	48	53,5	$\sigma=$ 2,6
	16:15	89	48	49,9	109,0110	D'=	109,0110		Desn= 2,6994
	16:17	270	11	3,8	109,0110	89	48	53,0	

ESTAÇÃO TOTAL	DATA	LOCAL DO LEVANTAMENTO
ELTA S20	04 a 08/12/2005	Centro Politécnico

RN	HORA	DADOS DE CAMPO				CÁLCULO			
15	09:55	90	54	5,5	64,4122				
		269	5	58	64,4122	90	54	3,8	Dv= -1,0129
	10:00	90	54	4	64,4121			Z= 90 54 3,6	
		269	5	58,2	64,4123	90	54	2,9	σ= 0,6
↓	10:04	90	54	6,5	64,4119			D'= 64,4122	
		269	5	58,4	64,4123	90	54	4,1	
	10:08	88	35	3,6	64,3468				
		271	25	0,3	64,3471	88	35	1,6	Dv= 1,5916
CASA3	10:11	88	35	3,5	64,3469			Z= 88 34 0,0	
		271	25	0,3	64,3469	88	35	1,6	σ= 0,5
	10:13	88	35	3,7	64,3470			D'= 64,3970	Desn= 2,6044
		271	25	0,5	64,6472	88	35	1,6	
↓	11:30	91	25	31,5	68,9408				
		268	34	29	68,9406	91	25	31,3	Dv= -1,7150
	11:33	91	25	32,9	68,9406			Z= 91 25 31,8	
		268	34	28,5	68,9406	91	25	32,2	σ= 0,5
↓	11:35	91	25	33	68,9405			D'= 68,9406	
		268	34	29	68,9405	91	25	32,0	
	11:38	88	28	42,8	68,8829				
		271	31	14,2	68,8829	88	28	44,3	Dv= 1,8283
IBGE	11:41	88	28	44,8	68,8829			Z= 88 28 44,8	
		271	31	13,1	68,8831	88	28	45,9	σ= 0,9
	11:44	88	28	43	68,8832			D'= 68,8830	Desn= 3,5433
		271	31	14,7	68,8831	88	28	44,2	
↓	16:20	89	49	28	54,3880				
		270	10	23	54,3879	89	49	32,5	Dv= 0,1654
	16:22	89	49	31	54,3877			Z= 89 49 32,8	
		270	10	23	54,3876	89	49	34,0	σ= 1,0
↓	16:25	89	49	28	54,3880			D'= 54,3879	
		270	10	24	54,3880	89	49	32,0	
	16:08	90	4	24	54,8113				
		269	55	36,7	54,8113	90	4	23,6	Dv= -0,0703
LAIG	16:12	90	4	25	54,8116			Z= 90 4 24,5	
		269	55	35,1	54,8115	90	4	24,9	σ= 0,8
	16:16	90	4	24	54,8117			D'= 54,8115	Desn= -0,2357
		269	55	34	54,8117	90	4	25,0	



ESTAÇÃO TOTAL	DATA	LOCAL DO LEVANTAMENTO
ELTA S20	04 a 08/12/2005	Centro Politécnico

RN	HORA	DADOS DE CAMPO				CÁLCULO			
	17:16	89	47	1,3	60,7087				
		270	12	55,8	60,7087	89	47	2,8	Dv= 0,2283
LAIG	17:19	89	47	2,6	60,7086			Z= 89 47 4,2	
		270	12	53,9	60,7086	89	47	4,3	$\sigma$ = 1,4
	17:26	89	47	3	60,7086			D'= 60,7086	
		270	12	52	60,7086	89	47	5,5	
	↓								
	17:30	89	52	44,8	60,7680				
		270	7	14,8	60,7679	89	52	45,0	Dv= 0,1281
02	17:33	89	52	43	60,7677			Z= 89 52 45,3	
		270	7	12,2	60,7678	89	52	45,4	$\sigma$ = 0,3
	17:40	89	52	45,5	60,7681			D'= 60,7679	Desn= -0,1003
		270	7	14,4	60,7679	89	52	45,5	
	12:23	88	46	8,9	145,9045				
	12:25	271	13	47,6	145,9045	88	46	10,7	Dv= 3,1335
	12:27	88	46	7,9	145,9050			Z= 88 46 9,9	
02	12:28	271	13	48,2	145,9048	88	46	9,9	$\sigma$ = 0,8
	12:28	88	46	6,5	145,9048			D'= 145,9047	
	12:29	271	13	48,2	145,9048	88	46	9,2	
	↓								
	11:55	92	6	28,1	146,0269				
		267	53	25,9	146,0270	92	6	31,1	Dv= -5,3741
	12:05	92	6	30,6	146,0271			Z= 92 6 32,6	
Prefeitura		267	53	25,5	146,0273	92	6	32,5	$\sigma$ = 1,6
	12:15	92	6	31,5	146,0270			D'= 146,0271	Desn= -8,5075
		267	53	23	146,0272	92	6	34,3	
	15:45	91	13	57,3	109,1137				
	15:47	268	46	3,2	109,1139	91	13	57,1	Dv= -2,3468
	15:49	91	13	58,7	109,1136			Z= 91 13 56,6	
Prefeitura	15:52	268	46	3,6	109,1139	91	13	57,6	$\sigma$ = 1,2
	15:54	91	13	55,6	109,1137			D'= 109,1138	
	14:00	268	46	5,2	109,1139	91	13	55,2	
	↓								
	15:33	89	48	52,7	109,0469				
	15:35	270	11	6,4	109,0469	89	48	53,2	Dv= 0,3529
	15:37	89	48	55	109,0470			Z= 89 48 52,6	
15	15:39	270	11	9	109,0473	89	48	53,0	$\sigma$ = 0,9
	15:40	89	48	51	109,0470			D'= 109,0471	Desn= 2,6996
	15:42	270	11	7,9	109,0472	89	48	51,5	

ESTAÇÃO TOTAL	DATA	LOCAL DO LEVANTAMENTO
TC 403L	04 a 08/12/2005	Centro Politécnico

RN	HORA	DADOS DE CAMPO				CÁLCULO					
15	08:40	90	54	18	64,3790	90	54	11,0	Dv= -1,0149		
		269	5	56	64,3790						
	08:43	90	54	20	64,3790	Z=	90	54		11,7	
		269	5	56	64,3790	90	54	12,0		$\sigma$ =	0,8
	08:45	90	54	19	64,3790	D'=	64,3788				
		269	5	55	64,3780	90	54	12,0			
	08:50	90	54	19	64,3790	90	54	11,0			
		269	5	57	64,3790						
		08:53	90	54	21	64,3780	90	54		13,0	
			269	5	55	64,3790					
	08:58	90	54	19	64,3790	90	54	11,5			
		269	5	56	64,3780						
	09:00	88	35	15	64,3110	88	35	11,5	Dv= 1,5868		
		271	24	52	64,3110						
	09:08	88	35	15	64,3120	Z=	88	35		10,3	
		271	24	57	64,3110	88	35	9,0		$\sigma$ =	0,8
	09:12	88	35	15	64,3130	D'=	64,3113				
CASA3		271	24	55	64,3110	88	35	10,0		Desn=	2,6017
	09:17	88	35	19	64,3110	88	35	10,0			
		271	24	59	64,3110						
	09:19	88	35	17	64,3110	88	35	10,5			
		271	24	56	64,3110						
	09:21	88	35	19	64,3120	88	35	10,5			
		271	24	58	64,3110						
	10:34	91	25	46	68,9080	91	25	39,0	Dv= -1,7165		
		268	34	28	68,9080						
	10:36	91	25	46	68,9080	Z=	91	25		38,5	
		268	34	30	68,9080	91	25	38,0		$\sigma$ =	0,9
	10:37	91	25	48	68,9080	D'=	68,9078				
CASA3		268	34	30	68,9070	91	25	39,0			
	10:39	91	25	46	68,9080	91	25	38,5			
		268	34	29	68,9080						
	10:42	91	25	43	68,9080	91	25	37,0			
		268	34	29	68,9080						
	10:45	91	25	45	68,9070	91	25	39,5			
		268	34	26	68,9070						
	10:48	88	28	53	68,8470	88	28	48,0	Dv= 1,8260		
		271	31	17	68,8470						
	10:50	88	28	56	68,8470	Z=	88	28		48,6	
		271	31	19	68,8470	88	28	48,5		$\sigma$ =	0,8
	10:52	88	28	56	68,8470	D'=	68,8470				
IBGE		271	31	21	68,8470	88	28	47,5		Desn=	3,5425
	10:55	88	28	58	68,8470	88	28	49,5			
		271	31	19	68,8470						
	10:58	88	29	0	68,8470	88	28	49,5			
		271	31	21	68,8470						
	11:00	88	29	0	68,8470	88	28	48,5			
		271	31	23	68,8470						

ESTAÇÃO TOTAL	DATA	LOCAL DO LEVANTAMENTO
TC 403L	04 a 08/12/2005	Centro Politécnico

RN	HORA	DADOS DE CAMPO				CÁLCULO			
	16:58	89	49	52	54,3490				
	16:59	270	10	25	54,3490	89	49	43,5	Dv= 0,1629
	16:59	89	49	49	54,3490			Z= 89 49 41,8	
	17:01	270	10	22	54,3490	89	49	43,5	σ= 1,6
	17:02	89	49	49	54,3490			D'= 54,3488	
IBGE	17:04	270	10	25	54,3480	89	49	42,0	
	17:05	89	49	53	54,3490				
	17:06	270	10	29	54,3480	89	49	42,0	
	17:08	89	49	44	54,3480				
	17:10	270	10	23	54,3490	89	49	40,5	
	17:10	89	49	44	54,3490				
	17:12	270	10	25	54,3490	89	49	39,5	
	16:35	90	4	45	54,7750				
	16:36	269	55	27	54,7760	90	4	39,0	Dv= -0,0738
	16:38	90	4	46	54,7760			Z= 90 4 38,0	
	16:40	269	55	27	54,7760	90	4	39,5	σ= 2
	16:41	90	4	45	54,7760			D'= 54,7757	
LAIG	16:42	269	55	27	54,7760	90	4	39,0	Desn= -0,2367
	16:45	90	4	45	54,7760				
	16:46	269	55	26	54,7760	90	4	39,5	
	16:48	90	4	44	54,7760				
	16:52	269	55	31	54,7750	90	4	36,5	
	16:55	90	4	39	54,7750				
	16:57	269	55	30	54,7750	90	4	34,5	
	16:34	89	47	19	60,6740				
		270	12	44	60,6730	89	47	17,5	Dv= 0,2251
	16:37	89	47	16	60,6740			Z= 89 47 14,8	
		270	12	53	60,6740	89	47	11,5	σ= 2,1
	16:40	89	47	22	60,6730			D'= 60,6738	
LAIG		270	12	55	60,6740	89	47	13,5	
	16:43	89	47	23	60,6740				
		270	12	53	60,6730	89	47	15,0	
	16:45	89	47	20	60,6740				
		270	12	50	60,6740	89	47	15,0	
	16:48	89	47	22	60,6740				
		270	12	49	60,6740	89	47	16,5	
	16:50	89	53	1	60,7340				
		270	7	11	60,7340	89	52	55,0	Dv= 0,1259
	16:53	89	53	1	60,7340			Z= 89 52 52,6	
		270	7	16	60,7340	89	52	52,5	σ= 1,8
	16:55	89	52	59	60,7340			D'= 60,7339	
02		270	7	13	60,7340	89	52	53,0	Desn= -0,0992
	16:57	89	52	56	60,7340				
		270	7	11	60,7330	89	52	52,5	
	16:59	89	52	55	60,7340				
		270	7	9	60,7340	89	52	53,0	
	17:01	89	52	55	60,7340				
		270	7	16	60,7340	89	52	49,5	

ESTAÇÃO TOTAL		DATA		LOCAL DO LEVANTAMENTO	
TC 403L		04 a 08/12/2005		Centro Politécnico	
RN	HORA	DADOS DE CAMPO		CÁLCULO	
	12:37	88	46 19	145,8980	
	12:39	271	14 1	145,8980 88 46 9,0	
	12:41	88	46 16	145,8980 Z= 88 46 9,3	
	12:42	271	14 2	145,8980 88 46 7,0 σ= 3,2	
	12:46	88	46 19	145,8980 D'= 145,8978	
02	12:48	271	13 50	145,8980 88 46 14,5	
	12:49	88	46 12	145,8980	
	12:51	271	13 50	145,8970 88 46 11,0	
	12:52	88	46 20	145,8980	
	12:54	271	14 2	145,8970 88 46 9,0	
	12:56	88	46 11	145,8980	
	12:58	271	14 0	145,8980 88 46 5,5	
	12:59	92	6 48	145,9630	
	13:03	267	53 22	145,9630 92 6 43,0	
	13:06	92	6 44	145,9620 Z= 92 6 42,8	
	13:07	267	53 22	145,9630 92 6 41,0 σ= 1,5	
	13:08	92	6 47	145,9640 D'= 145,9629	
Prefeitura	13:10	267	53 19	145,9630 92 6 44,0	
	13:13	92	6 50	145,9630	
	13:14	267	53 25	145,9630 92 6 42,5	
	13:16	92	6 45	145,9630	
	13:18	267	53 22	145,9620 92 6 41,5	
	13:19	92	6 50	145,9630	
	13:21	267	53 20	145,9630 92 6 45,0	
	15:10	91	14 7	109,0820	
	15:09	268	46 10	109,0820 91 13 58,9	
	15:13	91	14 7	109,0830 Z= 91 14 1,9	
	15:11	268	46 3	109,0820 91 14 2,4 σ= 1,9	
	15:15	91	14 9	109,0830 D'= 109,0828	
Prefeitura	15:14	268	46 5	109,0830 91 14 2,4	
	15:17	91	14 9	109,0840	
	15:16	268	46 4	109,0830 91 14 2,9	
	15:21	91	14 9	109,0830	
	15:20	268	46 9	109,0830 91 14 0,4	
	15:24	91	14 9	109,0830	
	15:22	268	46 1	109,0830 91 14 4,4	
	14:45	89	49 9	109,0080	
		270	11 8	109,0080 89 49 0,5	
	14:50	89	49 13	109,0060 Z= 89 49 0,7	
	14:51	270	11 7	109,0070 89 49 3,0 σ= 2,4	
	14:55	89	49 11	109,0080 D'= 109,0077	
15	14:57	270	11 5	109,0080 89 49 3,0	
	14:58	89	49 9	109,0080	
	14:59	270	11 6	109,0070 89 49 1,5	
	15:01	89	49 6	109,0080	
	15:02	270	11 6	109,0080 89 49 0,0	
	15:03	89	49 5	109,0080	
	15:04	270	11 12	109,0080 89 48 56,5	

ESTAÇÃO TOTAL	DATA	LOCAL DO LEVANTAMENTO
ELTA S20	29/12/2005	Centro Politécnico

## CONTRA-NIVELAMENTO

RN-15				CASA3			
HORA	PD	PI		HORA	PD	PI	
15:38	-1,0379	-1,0411	-1,0395	15:51	1,5650	1,5643	1,5646
15:44	-1,0376	-1,0411	-1,0393	15:52	1,5653	1,5646	1,5650
15:46	-1,0379	-1,0407	-1,0393	15:55	1,5656	1,5640	1,5648
		Dv=	-1,0394			Dv=	1,5648
						ΔH=	2,6042
CASA3				IBGE			
HORA	PD	PI		HORA	PD	PI	
16:12	-1,6876	-1,6887	-1,6881	16:18	1,8539	1,8539	1,8539
16:14	-1,6873	-1,6887	-1,6880	16:19	1,8546	1,8542	1,8544
16:15	-1,6876	-1,6886	-1,6881	16:21	1,8546	1,8546	1,8546
		Dv=	-1,6881			Dv=	1,8543
						ΔH=	3,5424
IBGE				LAIG			
HORA	PD	PI		HORA	PD	PI	
16:39	0,1933	0,1941	0,1937	16:44	-0,0405	-0,0413	-0,0409
16:40	0,1936	0,1936	0,1936	16:46	-0,0407	-0,0413	-0,0410
16:42	0,1936	0,1941	0,1938	16:48	-0,0405	-0,0415	-0,0410
		Dv=	0,1937			Dv=	-0,0410
						ΔH=	-0,2347
LAIG				RN-02			
HORA	PD	PI		HORA	PD	PI	
17:11	0,4129	0,4129	0,4129	17:16	0,3110	0,3125	0,3118
17:13	0,4129	0,4126	0,4127	17:17	0,3110	0,3125	0,3118
17:14	0,4129	0,4126	0,4127	17:19	0,3113	0,3125	0,3119
		Dv=	0,4128			Dv=	0,3118
						ΔH=	-0,1009
RN-02				Prefeitura			
HORA	PD	PI		HORA	PD	PI	
17:38	1,5137	1,5136	1,5137	17:47	-6,9966	-6,9968	-6,9967
17:39	1,5140	1,5135	1,5138	17:49	-6,9967	-6,9973	-6,9970
17:40	1,5135	1,5127	1,5131	17:50	-6,9963	-6,9970	-6,9967
		Dv=	1,5135			Dv=	-6,9968
						ΔH=	-8,5103
Prefeitura				RN-15			
HORA	PD	PI		HORA	PD	PI	
18:08	-3,8062	-3,8078	-3,8070	18:14	-1,1069	-1,1067	-1,1068
18:08	-3,8063	-3,8085	-3,8074	18:15	-1,1084	-1,1064	-1,1074
18:09	-3,8075	-3,8073	-3,8074	18:17	-1,1071	-1,1065	-1,1068
		Dv=	-3,8073			Dv=	-1,1070
						ΔH=	2,7003

EXPERIMENTO COM VISADAS DESIGUAIS

ESTAÇÃO TOTAL	DATA	LOCAL DO LEVANTAMENTO
TC ELTA S20	26/12/2005	Centro Politécnico

RN	HORA	DADOS DE CAMPO								
	16:25	90	25	44	28,5190	90				
	16:25	269	34	11	28,5190	90	25	46,5		
15	16:26	90	25	44	28,5200	90	Z= 90	25	45,8	
	16:27	269	34	12	28,5200	90	25	46,0	$\sigma=$ 0,8	
	16:28	90	25	43	28,5190	90	D'= 28,5193			
	16:29	269	34	13	28,5190	90	25	45,0		
	↓									
	16:31	88	38	39	100,9080	89				
	16:32	271	21	23	100,9080	88	38	38,0		
CASA3	16:33	88	38	39	100,9080	89	Z= 88	38	38,2	
	16:34	271	21	22	100,9080	88	38	38,5	$\sigma=$ 0,3	
	16:35	88	38	37	100,9080	89	D'= 100,9080			
	16:36	271	21	21	100,9080	88	38	38,0		
	16:50	91	30	41	40,6520	92				
	16:52	268	29	16	40,6520	91	30	42,5		
CASA3	16:53	91	30	41	40,6520	92	Z= 91	30	42,2	
	16:54	268	29	17	40,6520	91	30	42,0	$\sigma=$ 0,3	
	16:55	91	30	41	40,6520	92	D'= 40,6520			
	16:56	268	29	17	40,6520	91	30	42,0		
	↓									
	16:58	88	32	14	96,7020	89				
	16:59	271	27	46	96,7020	88	32	14,0		
IBGE	17:00	88	32	14	96,7020	89	Z= 88	32	13,7	
	17:01	271	27	47	96,7020	88	32	13,5	$\sigma=$ 0,3	
	17:01	88	32	13	96,7010	89	D'= 96,7017			
	17:02	271	27	46	96,7010	88	32	13,5		
	17:15	89	42	2	72,7830	90				
	17:16	270	17	55	72,7840	89	42	3,5		
IBGE	17:18	89	42	3	72,7830	90	Z= 89	42	3,5	
	17:20	270	17	56	72,7830	89	42	3,5	$\sigma=$ 0	
	17:21	89	42	3	72,7830	90	D'= 72,7832			
	17:21	270	17	56	72,7830	89	42	3,5		
	↓									
	17:23	89	47	37	40,4560	90				
	17:24	270	12	21	40,4560	89	47	38,0		
LAIG	17:24	89	47	37	40,4560	90	Z= 89	47	38,7	
	17:25	270	12	19	40,4560	89	47	39,0	$\sigma=$ 0,6	
	17:27	89	47	38	40,4560	90	D'= 40,4562			
	17:28	270	12	20	40,4570	89	47	39,0		

EXPERIMENTO COM VISADAS DESIGUAIS

ESTAÇÃO TOTAL	DATA	LOCAL DO LEVANTAMENTO
ELTA S20	26/12/2005	Centro Politécnico

RN	HORA	DADOS DE CAMPO									
	17:44	90	2	25	32,0290	90					
	17:44	269	57	35	32,0290	90	2	25,0			
LAIG	17:46	90	2	25	32,0290	90		Z= 90	2	24,7	
	17:46	269	57	35	32,0290	90	2	25,0	$\sigma=$	0,6	
	17:47	90	2	26	32,0290	90		D'= 32,0290			
	17:47	269	57	38	32,0290	90	2	24,0			
	17:48	90	4	46	89,2170	90					
	17:50	269	55	15	89,2170	90	4	45,5			
02	17:51	90	4	47	89,2160	90		Z= 90	4	45,8	
	17:52	269	55	15	89,2170	90	4	46,0	$\sigma=$	0,3	
	17:53	90	4	46	89,2170	90		D'= 89,2168			
	17:54	269	55	14	89,2170	90	4	46,0			
	18:06	88	58	39	100,6850	89					
	18:08	271	1	25	100,6850	88	58	37,0			
02	18:08	88	58	38	100,6850	89		Z= 88	58	36,7	
	18:09	271	1	25	100,6850	88	58	36,5	$\sigma=$	0,3	
	18:10	88	58	39	100,6850	89		D'= 100,6848			
	18:11	271	1	26	100,6840	88	58	36,5			
	18:15	92	0	44	191,2420	92					
	18:17	267	59	10	191,2410	92	0	47,0			
Prefeitura	18:19	92	0	45	191,2420	92		Z= 92	0	46,7	
	18:21	267	59	11	191,2420	92	0	47,0	$\sigma=$	0,6	
	18:22	92	0	44	191,2410	92		D'= 191,2417			
	18:23	267	59	12	191,2420	92	0	46,0			
	15:35	91	18	47	80,4880	91					
	15:37	268	41	7	80,4880	91	18	50,0			
Prefeitura	15:55	91	18	45	80,4880	91		Z= 91	18	49,8	
	15:57	268	41	7	80,4880	91	18	49,0	$\sigma=$	0,8	
	16:00	91	18	46	80,4870	91		D'= 80,4877			
	16:02	268	41	5	80,4870	91	18	50,5			
	16:05	89	38	43	137,9600	90					
	16:06	270	21	18	137,9600	89	38	42,5			
15	16:11	89	38	41	137,9600	90		Z= 89	38	42,7	
	16:12	270	21	15	137,9600	89	38	43,0	$\sigma=$	0,3	
	16:16	89	38	44	137,9600	90		D'= 137,9600			
	16:17	270	21	19	137,9600	89	38	42,5			

EXPERIMENTO COM VISADAS DESIGUAIS

ESTAÇÃO TOTAL	DATA	LOCAL DO LEVANTAMENTO
ELTA S20	26/12/2005	Centro Politécnico

RN	HORA	DADOS DE CAMPO							
	17:15	89	42	5	72,7830	90			
	17:16	270	17	52	72,7840	89	42	6,5	
IBGE	17:18	89	42	6	72,7830	90	Z= 89	42	6,5
	17:20	270	17	53	72,7830	89	42	6,5	$\sigma=$ 0
	17:21	89	42	7	72,7830	90	D'= 72,7832		
	17:21	270	17	54	72,7830	89	42	6,5	
	↓								
	17:31	89	59	4	150,4640	90			
	17:32	270	0	55	150,4640	89	59	4,5	
02	17:34	89	59	4	150,4630	90	Z= 89	59	4,3
	17:35	270	0	56	150,4640	89	59	4,0	$\sigma=$ 0,3
	17:36	89	59	5	150,4640	90	D'= 150,4638		
	17:36	270	0	56	150,4640	89	59	4,5	

CÁLCULO DO DESNÍVEL SOMENTE COM OS VALORES MEDIDOS NÃO CONSIDERANDO OS EFEITOS DA CURVATURA TERRESTRE E DA REFRAÇÃO.

SEÇÃO	Zenital - Z	Dist. Incl. (m)	Dv	$\Delta h$
I	90,429398	28,5193	-0,2137	
	88,643657	100,9080	2,3885	2,6023
II	91,511713	40,6520	-1,0725	
	88,537130	96,7017	2,4687	3,5412
III	89,700972	72,7832	0,3799	
	89,794074	40,4562	0,1454	-0,2345
IV	90,040185	32,0290	-0,0225	
	90,079398	89,2168	-0,1236	-0,1012
V	88,976852	100,6848	1,7979	
	92,01296	191,2417	-6,7175	-8,5153
VI	91,313843	80,4877	-1,8455	
	89,645185	137,9600	0,8543	2,6998
VII	89,701806	72,7832	0,3788	
	89,984537	150,4638	0,0406	-0,3382



CÁLCULO DO DESNÍVEL CONSIDERANDO O EFEITO DA REFRAÇÃO NA DISTÂNCIA MEDIDA.

SEÇÃO	Ts °C	T úmida °C	Umid. Rel.	Pressão mbar	Corr.Atm.ppm	Di corr.	DV s/ corr. (m)	ΔH
I	22,4	18,5	69,35	913	37,2641	28,5183	-0,2137	
	22,4	18,5	69,35	913	37,2641	100,9042	2,3884	2,6022
II	21	17,5	71,40	913	36,0608	40,6505	-1,0724	
	21	17,5	71,40	913	36,0608	96,6982	2,4686	3,5410
III	21,5	17	64,02	913	36,4266	72,7805	0,3798	
	21,5	17	64,02	913	36,4266	40,4547	0,1454	-0,2344
IV	21,3	17	65,38	913	36,2654	32,0278	-0,0225	
	21,3	17	65,38	913	36,2654	89,2136	-0,1236	-0,1012
V	21	16,9	66,67	913	36,0157	100,6812	1,7978	
	21	16,9	66,67	913	36,0157	191,2348	-6,7172	-8,5150
VI	24	19	62,61	913	38,5767	80,4846	-1,8454	
	24	19	62,61	913	38,5767	137,9547	0,8543	2,6997
VII	21,5	17	64,02	913	36,4266	72,7805	0,3788	
	21,5	17	64,02	913	36,4266	150,4584	0,0406	-0,3382

CÁLCULO DO DESNÍVEL CONSIDERANDO OS EFEITOS DA REFRAÇÃO E CURVATURA TERRESTRE.

SEÇÃO	Corr.Cur.(m)	Corr. K	Dv corr. (m)	ΔH
I	0,0001	0,0000	-0,2137	
	0,0008	0,0001	2,3891	2,6028
II	0,0001	0,0000	-1,0723	
	0,0007	0,0001	2,4693	3,5416
III	0,0004	0,0001	0,3802	
	0,0001	0,0000	0,1455	-0,2347
IV	0,0001	0,0000	-0,0224	
	0,0006	0,0001	-0,1231	-0,1007
V	0,0008	0,0001	1,7985	
	0,0029	0,0004	-6,7148	-8,5132
VI	0,0005	0,0001	-1,8450	
	0,0015	0,0002	0,8556	2,7006
VII	0,0004	0,0001	0,3791	
	0,0018	0,0002	0,0421	-0,3370

ESTAÇÃO TOTAL	DATA	LOCAL DO LEVANTAMENTO
ELTA S20	17/08/2004	SALTO CAXIAS

	PD	PI	Z	$\sigma=$	D'	Ts	Tu	Um	Pressão	
RN 50A	0 4	21,7 179 55	49,2	89,928819	469,799	29,4	19,0		980,0	
	0 4	18,7 179 55	52	89,929625	469,798	29,4	19,0		980,0	
	0 4	16,2 179 55	56,1	89,930542	469,799	29,4	19,0		980,0	
RN 51				89,929662	3,1"	469,798	29,4	19,0	37	980,0
	0 2	33,1 179 57	49,2	89,960569	679,793	29,4	19,0		980,0	
	0 2	34,1 179 57	41,2	89,959319	679,793	29,4	19,0		980,0	
	0 2	28 179 57	40	89,960000	679,794	29,4	19,0		980,0	
				89,959963	2,3"	679,793	29,4	19,0	37	980,0

Operador: D. Granemann

Anotador: Luisnei

Hora: 14:00

#### CÁLCULO DO DESNÍVEL TOMANDO K= 0,13

RN	Corr. Atm	Di corr.(m)	DV s/ corr. (m)	Curv. (m)	Refr.	Dv corr. (m)	DH
RN 50A	25,201484	469,7865	0,5767	0,0172	0,0022	0,5917	(metros)
RN 51	25,201484	679,7760	0,4750	0,0361	0,0047	0,5064	-0,0853
						Dif. p/ NG:	-0,0626

#### CÁLCULO DO DESNÍVEL COM O MODELO DE TURBULÊNCIA INSTÁVEL (Equação 2.46)

RN	Beta instáv. em ( " )	Z corrigido de Beta	Di corr. de Beta	Di corr. c/ curv.	Desnível (metros)
RN 50A	-41,58	89,918112	0,6714	0,6542	
RN 51	-60,17	89,943250	0,6733	0,6372	-0,0170
				Dif. p/ NG:	0,0057

Obs.: A umidade relativa foi obtida indiretamente por observações de temperatura seca e úmida com um psicrômetro. Aplicou-se um polinômio de segundo grau apresentado por Schaal(1995).

ESTAÇÃO TOTAL	DATA	LOCAL DO LEVANTAMENTO
TC 2002	16/06/2005	SALTO CAXIAS

RN	HORA	DADOS DE CAMPO						Z	D'	Ts	Umid.	Pressão
RN 50A	10:53	89	56	10	270	3	47,9	89,936403	465,577	18,8	85	986,6
		89	56	11	270	3	48,6	89,936444	465,577	19,1	84	986,6
		89	56	9,8	270	3	49	89,936222	465,577	19,1	84	986,6
								89,936356	465,577	19,0	85	986,6
RN 51		89	57	35,2	270	2	23,4	89,959972	683,753	18,7	85	986,6
		89	57	38,5	270	2	23,1	89,960472	683,753	19,1	85	986,6
		89	57	36,1	270	2	24,5	89,959944	683,753	18,9	85	986,6
								89,960130	683,753	18,9	85	986,6
RN 50A	14:45	89	56	13,9	270	3	45,3	89,937306	466,368	19,2	87	983,0
		89	56	14,7	270	3	44	89,937597	466,367	19,2	87	983,0
								89,937451	466,368	19,2	87	983,0
RN 51		89	57	38,1	270	2	22,9	89,960444	682,937	19,4	87	983,0
		89	57	37,3	270	2	20,4	89,960681	682,938	19,4	87	983,0
								89,960563	682,938	19,4	87	983,0

Operador: Jorge  
 Anotador: Magal

CÁLCULO DO DESNÍVEL TOMANDO K= 0,13

RN	HORA	Corr. Atm	Di corr.(m)	DV s/ corr. (m)	Curv. (m)	Refr.	Dv corr. (m)	DH(m)
50A	10:53	14,424264	465,5703	0,5172	0,0169	0,0022	0,5319	
51		14,328234	683,7432	0,4758	0,0365	0,0047	0,5076	-0,0243
							Dif. p/ NG	-0,0016
50A	14:45	15,605540	466,3602	0,5091	0,0170	0,0022	0,5239	
51		15,796852	682,9267	0,4701	0,0364	0,0047	0,5018	-0,0221
							Dif. p/ NG	0,0006

## SIMEPAR – SALTO CAXIAS

*Salto Caxias: longitude= -53.4833, latitude= -25.5166*

Data	Pressão Média (hPa)	Pressão Máxima (hPa)	Pressão Mínima (hPa)	Temperatura Média (C)	Temperatura Máxima (C)	Temperatura Mínima (C)
17/08/2004 00:00	967.9	968.0	967.8	18.9	19.2	18.1
17/08/2004 01:00	967.7	968.1	967.2	17.5	18.2	17.1
17/08/2004 02:00	967.1	967.3	966.9	17.4	17.8	17.1
17/08/2004 03:00	967.0	967.1	966.8	16.9	17.1	16.7
17/08/2004 04:00	966.8	966.9	966.6	16.2	16.7	15.4
17/08/2004 05:00	967.0	967.0	966.8	15.6	16.0	15.3
17/08/2004 06:00	966.7	966.9	966.6	15.6	16.1	15.3
17/08/2004 07:00	967.4	967.8	966.9	15.2	15.9	14.8
17/08/2004 08:00	968.0	968.2	967.7	14.9	15.3	14.5
17/08/2004 09:00	968.3	968.6	968.1	16.2	17.0	15.4
17/08/2004 10:00	968.8	969.1	968.6	18.1	19.4	17.0
17/08/2004 11:00	969.1	969.2	968.9	20.7	22.1	19.3
17/08/2004 12:00	968.7	969.0	968.3	23.3	24.7	22.1
17/08/2004 13:00	968.0	968.3	967.7	26.1	28.7	24.7
17/08/2004 14:00	967.2	967.7	966.9	29.4	29.7	28.7
17/08/2004 15:00	966.6	966.9	966.3	29.8	30.0	29.3
17/08/2004 16:00	966.1	966.4	965.9	30.0	30.3	29.6
17/08/2004 17:00	966.0	966.1	965.8	29.2	29.5	28.4
17/08/2004 18:00	966.2	966.2	966.1	27.3	28.3	26.6
17/08/2004 19:00	966.1	966.2	966.1	27.0	27.6	26.5
17/08/2004 20:00	966.5	966.7	966.2	26.3	26.6	25.4
17/08/2004 21:00	966.9	967.1	966.7	24.5	25.3	24.0
17/08/2004 22:00	967.3	967.6	967.1	23.4	24.0	22.6
17/08/2004 23:00	967.9	968.0	967.6	21.6	22.6	20.3
18/08/2004 00:00	968.1	968.2	968.0	19.9	20.2	19.5

## SIMEPAR – SALTO CAXIAS

Salto Caxias: lon = -53.4833, lat = -25.5166

Data	Temperatura de Relva (°C)	Umidade Relativa (%)	Radiação Solar (W/m <sup>2</sup> )	Velocidade do Vento (m/s)
17/08/2004 00:00	15.4	62.3	0.0	3.9
17/08/2004 01:00	15.1	71.3	0.0	2.7
17/08/2004 02:00	14.9	69.4	0.0	3.0
17/08/2004 03:00	14.8	71.6	0.0	1.5
17/08/2004 04:00	14.7	78.3	0.0	2.1
17/08/2004 05:00	14.6	82.6	0.0	3.2
17/08/2004 06:00	14.3	79.0	1.0	5.3
17/08/2004 07:00	14.1	80.9	1.0	3.6
17/08/2004 08:00	14.0	84.2	70.0	2.4
17/08/2004 09:00	14.4	80.4	188.0	4.1
17/08/2004 10:00	15.0	72.9	385.0	2.4
17/08/2004 11:00	15.9	63.7	597.0	2.0
17/08/2004 12:00	17.4	56.0	682.0	1.5
17/08/2004 13:00	18.5	45.1	706.0	4.1
17/08/2004 14:00	19.8	30.7	656.0	1.6
17/08/2004 15:00	20.5	30.7	556.0	1.1
17/08/2004 16:00	19.2	30.8	352.0	3.4
17/08/2004 17:00	18.5	32.3	87.0	0.5
17/08/2004 18:00	17.6	40.2	37.0	2.0
17/08/2004 19:00	16.8	36.1	2.0	2.0
17/08/2004 20:00	16.5	37.0	0.0	1.1
17/08/2004 21:00	16.1	43.0	0.0	1.7
17/08/2004 22:00	15.9	48.9	0.0	1.0
17/08/2004 23:00	15.9	61.2	0.0	2.3
18/08/2004 00:00	15.8	72.0	0.0	2.8



## REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 13133 **Execução de levantamentos geodésicos: procedimento**. Rio de Janeiro, 1994.
- ALENCAR, J. C. M. **Nivelamento geodésico – manual de instruções**. Distrito de Levantamentos Geodésicos – IBGE, 1985.
- ANGUS-LEPAN, P. V.; WEBB, E. K. **Turbulent heat transfer and atmospheric refraction**. In: General Assembly of IAG, Proceedings, Moscow, 1971.
- ARANA, J. M. **O uso do GPS nas determinações de altitudes ortométricas**. Geodésia online, UNESP, Presidente Prudente, 2005.
- BOMFORD, G. **Geodesy**. Oxford: Oxford University Press, 1975.
- BRASIL **Manual Técnico T 34-410 - Nivelamento Trigonométrico**, 1ª edição. Estado-Maior do Exército. Ministério do Exército - Diretoria de Serviço Geográfico, 1975.
- CASTRO, A. L. P. **Nivelamento através do GPS: avaliação e proposição de estratégias**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista – UNESP, Presidente Prudente, 2002.
- CHRZANOWSKI, A. **Design and error analysis of surveying projects**. University of New Brunswick, 1977.
- CINTRA, J.P. **Teodolitos eletrônicos**. XVII Congresso Brasileiro de Cartografia, EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1995.
- D'ALGE, J. C. L. **Estabelecimento de um sistema de altitudes a partir do nivelamento geométrico**. Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1986.

DODSON, A. H.; ZAHER, M. **Refraction effects on vertical angle measurements.** Survey Review, v. 28, n. 217, julho de 1985.

DZIERZEGA, A.; SCHERRER, R. **Measuring with electronic total station.** Survey Review, v. 37, n. 287, janeiro de 2003.

ERBA, D. A.; THUM, A. B.; SILVA, C. A. U.; SOUZA, G. C.; VERONEZ, M. R.; LEANDRO, R. F.; MAIA, T. C. B. **Topografia.** Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2005.

FAGGION, P. L. **Contribuição para implantação de um sistema de aferição de miras na Universidade Federal do Paraná.** Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1993.

FAGGION, P. L. **Obtenção dos elementos de calibração e certificação de medidores eletrônicos de distância em campo e laboratório.** Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

FAGGION, P. L.; VEIGA, L. A. K.; DE FREITAS, S. R. C.; DOS SANTOS, D. P. (2003). **Desníveis de primeira ordem com estação total.** Série em Ciências Geodésicas, v. 3.

FEATHERSTONE, W. E.; DENTITH, M. C.; KIRBY, J. F. **Strategies for the accurate determination of orthometric heights from GPS.** Survey Review, v. 34, n. 267, 1998.

GEMAEL, C. **Introdução a Geodésia geométrica – Primeira parte -** Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR, Curitiba, 1987.

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações – aplicações geodésicas.** Curitiba: Editora da UFPR, 1994.



IBGE - FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA  
**Especificações e normas gerais para levantamentos geodésicos** R.PR nº  
22/83, Boletim de Serviço nº 1602 (Suplemento), Rio de Janeiro, 1983.

IBGE - FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA  
**Manual para padronização de procedimentos de nivelamento geométrico**,  
Versão 1.b. Rio de Janeiro, 2000.

IBGE - FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA  
**Sistema geodésico brasileiro – rede altimétrica**. Disponível em:  
<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/altimetrica.shtm?c=3>. Acesso  
em: maio de 2005.

JORDAN, D. W. **Tratado general de topografia. Volume I**. Barcelona: Editorial  
Gustavo Gili, S.A, 1974.

KENNIE, T. J. M.; PETRIE, G. **Engineering surveying technology**, 1ª edição.  
New York. Blackie Academic & Professional – USA, Halsted Press, 1993.

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

KOSLOWSKI, J. **Electronic total stations are levels too**. Professional Surveyor  
Magazine, v. 18, n. 8, nov/dec 1998.

KUANG, S. **Geodetic network analysis and optimal design: concepts and  
applications**. Michigan: Ann Arbor Press, Inc., 1996.

LEICA TC 403L **User manual**. Heerbrugg, Switzerland, 1998.

LEICA WILD TC 2002 **User manual**. Heerbrugg, Switzerland, 1994.

MEDINA, A. S. **Classificação de teodolitos e estações totais**. Dissertação  
apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade  
Federal do Paraná, Curitiba, 1998.

MEDINA, A. S.; GRANEMANN, D. C.; MARTINS, M. A. R.; BARNECHE, R. S. **Efeito da equação pessoal em levantamentos**. Anais do XIX Congresso Brasileiro de Cartografia, CD-Rom, Recife, 1999.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: Editora UNESP, 2000.

PROFESSIONAL SURVEYOR MAGAZINE - DIN 18723 **Specification for theodolite accuracy**. Disponível em: [www.prosurv.com](http://www.prosurv.com). Acesso em: novembro de 2005.

RÜEGGER, J. M. **Electronic distance measurement**. 3ª. Edição. Berlin: Springer-Verlag, 1996.

SCHAAL, R. E. **Efeitos da refração na atmosfera em observações geodésicas próximas ao solo**. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: foundations, Methods, and applications**. Berlin/New York: Walter de Gruyter, 2003.

TRIMBLE ZEISS, ELTA S. **User Guide**. Ohio, USA, 2001.

VEIGA, L. A. K.; FAGGION, P. L. **Introdução à topografia**. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

ZEISKE, K. **Surveying made easy**. Disponível em: <http://www.leica-geosystems.com/se/surveying/Newspaper/Broschyer/722510en.pdf>. Acesso em: novembro de 2005.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)