

MARIA DE LOURDES DE AQUINO MACEDO GONÇALVES

DETERMINAÇÃO INDIRETA DE COORDENADAS TOPOGRÁFICAS UTILIZANDO
ESTAÇÃO TOTAL E ESPELHO

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de doutor em Ciências Geodésicas.

Orientador: Prof. Dr. Pedro L. Faggion

Curitiba

2009

526.98
G635d

Gonçalves, Maria de Lourdes de Aquino Macedo
Determinação indireta de coordenadas topográficas
utilizando estação total e espelho [manuscrito] / Maria de
Lourdes de Aquino Macedo Gonçalves. – 2009.
128f. : il. [algumas color.]; 31 cm.

Impresso.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Paraná,
Setor de Ciências da Terra, curso de Pós-graduação em
Ciências Geodésicas, 2009.

“Orientador: Prof. Dr. Pedro L. Faggion”.

Bibliografia: f. 107-110

1.Coordenadas geográficas. 2. Mapeamento digital. 3.
Geodesia. I. Universidade Federal do Paraná. II. Faggion,
Pedro Luis. III. Título.

Bibliotecário: **Arthur Leitis Junior – CRB9/1548**

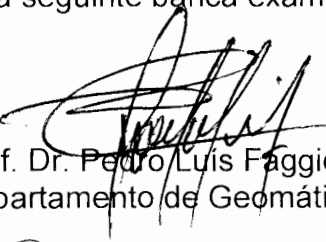
TERMO DE APROVAÇÃO

MARIA LOURDES DE AQUINO MACEDO GONÇALVES


“DETERMINAÇÃO INDIRETA DE COORDENADAS TOPOGRÁFICAS UTILIZANDO
ESTAÇÃO TOTAL E ESPELHOS”

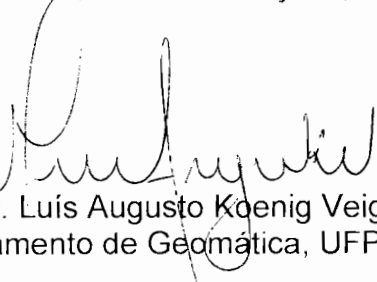
Tese nº 66 aprovada como requisito parcial do grau de Doutor no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:


Orientador:


Prof. Dr. Pedro Luis Faggion
Departamento de Geomática, UFPR


Prof. Dr. Jucilei Cordini
Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC


Prof. Dr. Dalto Domingos Rodrigues
Universidade Federal de Viçosa, UFV


Prof. Dr. Luis Augusto Koenig Veiga
Departamento de Geomática, UFPR


Prof. Dr. Carlos Aurélio Nadal
Departamento de Geomática, UFPR

Curitiba, 31 de agosto de 2009.

Ao meu marido Creso e meus filhos
Thiago, Gustavo e Carolina.

Aos meus pais Eliene e João Roberto.
À minha família.

AGRADECIMENTOS

À Deus, que me permite, a cada novo dia, desfrutar do convívio de minha família.

Aos meus pais, Eliene e João Roberto, que sempre me incentivaram a lutar por um ideal de forma digna.

Ao meu marido Creso, pelo companheirismo e apoio em todos os momentos.

Aos meus filhos, Thiago, Gustavo e Carolina, por me darem a força necessária para continuar.

Aos meus irmãos, João Roberto e Thomaz, pelo apoio irrestrito, sempre com palavras de incentivo.

Ao Prof. Dr. Pedro Luis Faggion, pelo incentivo, apoio e orientação desse trabalho, e acima de tudo pela amizade, respeito, disposição e ajuda inestimável.

Ao Prof. Dr. Carlos Aurélio Nadal e Prof. Dr. Luís Augusto Koenig Veiga pelo apoio, incentivo e discussões que muito auxiliaram no desenvolvimento do trabalho.

À Universidade Federal do Paraná, pela oportunidade do curso, com auxílio em materiais e equipamentos.

Ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela bolsa de estudo.

A AVR Instrumental, pela confecção do suporte do espelho.

Ao Prof. Dr. Wilson de Alcântara Soares, Prof. Dr. Romualdo Wandresen, Prof. Dr. Alvaro Muriel Lima Machado pelo auxílio em momentos importantes da pesquisa.

A Verali Mônica Kleuser, que além da secretária do curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, é também uma grande amiga.

A Mariney, Sr. Elberto e Plínio, pelo amizade e grande auxílio no desenvolvimento dessa pesquisa.

Aos grandes amigos: Karoline Paes Jamur, Franciely Abati Miranda, Fabiani das Dores Abati Miranda, Alessandra Svonka Palmeiro, Michele Beppler, Diuliana Leandro, Vagner Gonçalves Ferreira, Alessandro Salles de Carvalho, Tatiane Ayako Taura, Maria Madalena, Elaine C. Barros de Souza, Regiane Dalazoana, Mauricio Ihlenfeldt Sejas, Wander da Cruz, Rogers Pereira, Niarkios Graça, Érica Santos Matos, Silvio Adolfato, Marco Aurélio Debus Nadal, Daniel Perozo dos Santos, Ricardo Vilar Neves, Ernesto Mitsuo Shibayama, César Rafael Lopes.

A todos os professores do curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, pela contribuição no desenvolvimento dessa pesquisa.

A todos os colegas do curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas pelo convívio saudável, a amizade e discussões do trabalho.

RESUMO

A evolução tecnológica tem exigido cada vez mais o posicionamento, locação, monitoramento de estruturas e obras da construção civil, controle métrico de equipamentos e produtos industriais; controle de deslocamento de máquinas, com alta precisão, e em muitas vezes em áreas de difícil acesso. Estudos recentes mostraram a necessidade do desenvolvimento de metodologias para posicionamento de objetos, utilizando técnicas Topográficas e Geodésicas, em que seja necessário o desvio da visada da Estação Total. Ou seja, posicionar um objeto, utilizando equipamentos topográficos e acessórios que permitam realizar medições de direções horizontais, ângulos verticais e distâncias a objetos que não estejam no campo de visada da estação total. Pensando em contribuir no desenvolvimento de metodologia que permita resolver problemas de posicionamento com essas características é que se desenvolveu essa pesquisa. Nesta, consta uma revisão de literatura contendo os princípios Topográficos e Geodésicos que foram usados no decorrer do projeto; o desenvolvimento de um suporte que permita movimentos de rotação horizontal e vertical de um espelho plano; a calibração, utilizando interferômetro *LASER*, de marcas gravadas no espelho que possibilitam a determinação de sua atitude (posição no espaço); a calibração de uma Mira Horizontal de ínvar também realizada com interferômetro *LASER*. Essa foi usada como referência para a validação da metodologia proposta. Desenvolveu-se também uma modelagem matemática que permita a determinação de coordenadas de objetos, em que seja necessário o desvio da visada utilizando espelho. O trabalho traz também os resultados obtidos contendo as diferenças entre as coordenadas obtidas de maneira direta e indireta, bem como a distância entre os alvos obtidos de forma direta, indireta e com interferometria.

Palavras Chave: Determinação indireta de coordenadas tridimensionais, Estação Total, Espelho plano.

ABSTRACT

The technological evolution has demanded increasingly more accurate positioning, location, monitoring of structures and construction works, metric control of industrial equipment and products. Mechanical apparatus need to be controlled with a high degree of precision, often in areas of difficult access. Recent studies have demonstrated the necessity of the development of methodologies for object positioning, using Topographic and Geodesic techniques, where required, shunting the line of the target Total Station. That is, to locate an object, using topographical and accessory equipment that attain measures of horizontal direction, vertical angles and linear distances of objects that are not in the aimed at field of the total station. Thinking about contributing in the methodology development that allows you to troubleshoot problems in positioning with these characteristics is the basis from which this research was developed. This is a literature review containing Topographical and Geodesic principles used in the course of the project; the development of a support enabling horizontal and vertical rotation of a plain mirror; the calibration, using LASER interferometer, of recorded marks the mirror that allows the determination of it's attitude (position in space); the calibration of one Horizontal Aim of invar also using a LASER interferometer. This was used as reference for the validation of the proposed methodology. A mathematical modeling was developed that allows the determination of the coordinates of objects, where it is necessary the deviation of the line of aim using mirror. The work also brings the gotten results contends the variations, in the order of millimeter, when compared the same one coordinated obtained from direct and indirect form.

Keywords: Three-dimensional positioning of inaccessible points, Total Station, Plain Mirror

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – EFEITO FOTOELÉTRICO	18
FIGURA 2 – ONDAS ELETROMAGNÉTICAS	19
FIGURA 3 – COMPRIMENTO DE ONDA	20
FIGURA 4 – ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO	20
FIGURA 5 – PRINCÍPIO DE FERMAT	22
FIGURA 6 – CAMADAS DE UM ESPELHO.....	23
FIGURA 7 – ZONA DE PLANICIDADE	25
FIGURA 8 – TESTE DE PLANICIDADE DE DUAS SUPERFÍCIES DE VIDRO.....	26
FIGURA 9 – PERFIL DE UMA SUPERFÍCIE RUGOSA	27
FIGURA 10 – SUPERFÍCIE DE REFLETORA.....	28
FIGURA 11 – REFLEXÃO DE UM OBJETO EM UM ESPELHO	29
FIGURA 12 – OBJETO PONTUAL E SUA IMAGEM VIRTUAL	31
FIGURA 13 – LEI DA REFLEXÃO	32
FIGURA 14 – REFLEXÃO ESPECULAR	33
FIGURA 15 – ÂNGULOS DE INCIDÊNCIA E REFLEXÃO	33
FIGURA 16 – REFLEXÃO DIFUSA.....	34
FIGURA 17 – DUPLA REFLEXÃO.....	35
FIGURA 18 – REFLEXÃO COM ESPELHAMENTO FRONTAL	36
FIGURA 19 – INTERFERÔMETRO DE MICHELSON	38
FIGURA 20 – INTERFERÔMETRO DE FIZEAU.....	39
FIGURA 21 – INTERFERÔMETRO DE MACH-ZEHNDER	40
FIGURA 22 – PRINCÍPIO DA MEDIDA ELETRÔNICA DE DISTÂNCIA.....	41
FIGURA 23 – CAVIDADE RESSONANTE	44
FIGURA 24 – LASER DE CRISTAL	46
FIGURA 25 – SISTEMA CARTESIANO DEXTRÓGIRO	50
FIGURA 26 – COORDENADAS CARTESIANAS DE UM PONTO P	51
FIGURA 27 – VISTA EM PLANTA DO LEVANTAMENTO.....	53
FIGURA 28 – ESPELHO UTILIZADO NOS EXPERIMENTOS	54
FIGURA 29 – PRIMEIRO SUPORTE DO ESPELHO.....	55
FIGURA 30 – POSICIONAMENTO DO ESPELHO, ESTAÇÃO TOTAL E ALVO NO EXPERIMENTO 1	56
FIGURA 31 – ALVOS DO SUPORTE DO ESPELHO	57

FIGURA 32 – ESPELHO POSICIONADO NA VERTICAL	57
FIGURA 33 – ANTEPARO DE PAPEL SOBRE O ESPELHO.....	58
FIGURA 34 – ESPELHO ACLOPADO NA LUNETAS DA ESTAÇÃO TOTAL	59
FIGURA 35 – SUPORTE DO ESPELHO	60
FIGURA 36 – ALVOS GRAVADOS NO ESPELHO	61
FIGURA 37 – DETERMINAÇÃO DO AFASTAMENTO ENTRE OS ALVOS DO ESPELHO	62
FIGURA 38 – SOBREPOSIÇÃO DO RETÍCULO DA OCULAR DO INTERFERÔMETRO COM O ALVO DO ESPELHO.....	62
FIGURA 39 – LEITURA DO ALVO.....	63
FIGURA 40 – ALVO GRAVADO NO ESPELHO	64
FIGURA 41 – MIRA HORIZONTAL DE ÍNVAR	65
FIGURA 42 – ÂNGULO PARALÁTICO	65
FIGURA 43– ALVO FIXADO NA MIRA HORIZONTAL DE INVAR	67
FIGURA 44 – INTERFEROMETRIA DOS FIXADOS ALVOS DA MIRA HORIZONTAL DE ÍNVAR	67
FIGURA 45 – SAGUÃO DO BLOCO DE ADMINISTRAÇÃO – CENTRO POLITÉCNICO.....	68
FIGURA 46 – SISTEMA PRINCIPAL E SISTEMA DO ESPELHO.....	69
FIGURA 47 – SISTEMA DE POSICIONAMENTO INDIRETO DE PONTOS	70
FIGURA 48 – ALVOS DA MIRA HORIZONTAL DE ÍNVAR	71
FIGURA 49 – ALVOS DE REFÊRENCIA E PONTO “ESP”	73
FIGURA 50 – POSIÇÃO DO ALVO VIRTUAL.....	74
FIGURA 51 – VETORES E VERSOR DO PLANO DO ESPELHO.....	74
FIGURA 52 – REGRA DA MÃO ESQUERDA	75
FIGURA 53 – REFLEXÃO DO ALVO VIRTUAL.....	78
FIGURA 54 – ALVOS DA MIRA HORIZONTAL DE ÍNVAR	80
FIGURA 55 – TESTE DE PLANICIDADE REALIZADO COM O ESPELHO	81

LISTA DE TABELAS E QUADROS

TABELA 1 – CALIBRAÇÃO DOS ALVOS COM O INTERFERÔMETRO	83
TABELA 2 – CALIBRAÇÃO DAS DISTÂNCIAS ENTRE OS ALVOS DE REFERÊNCIA	85
TABELA 3 – VALORES AJUSTADOS DOS ALVOS DE REFERÊNCIA.....	86
TABELA 4 – CALIBRAÇÃO DA MIRA HORIZONTAL DE ÍNVAR ALVOS MA E MB	86
TABELA 5 – MEDIÇÕES REALIZADAS NO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO DOS ALVOS M1 À M8.....	87
TABELA 6 – CALIBRAÇÃO DOS ALVOS GRAVADOS NA MIRA HORIZONTAL DE ÍNVAR	88
TABELA 7 – VARIAÇÃO ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA OS ALVOS DA MIRA HORIZONTAL DE ÍNVAR	88
TABELA 8 – DISTÂNCIAS ENTRE OS ALVOS.....	89
TABELA 9 – DADOS DE CAMPO DO TESTE 2A.....	90
TABELA 10 – COORDENADAS DO TESTE 2A	92
TABELA 11 – DADOS DE CAMPO DO TESTE 2B.....	93
TABELA 12 – COORDENADAS DO TESTE 2B	95
TABELA 13 – COORDENADAS OBTIDAS NOS TESTES 2A E 2B	96
TABELA 14 – DISTÂNCIAS OBTIDAS NOS TESTES 2A E 2B.....	97
TABELA 15 – DISTÂNCIAS HORIZONTAIS OBTIDAS NOS TESTES 2A E 2B	98
TABELA 16 – DISTÂNCIAS OBTIDAS NOS TESTES 1A E 1B.....	98
TABELA 17 – DISTÂNCIAS HORIZONTAIS OBTIDAS NOS TESTES 1A E 1B	99
TABELA 18 – COORDENADAS OBTIDAS NOS TESTES 3 E 4.....	100
TABELA 19 – DISTÂNCIAS OBTIDAS NOS TESTES 3 E 4.....	101
TABELA 20 – DISTÂNCIAS HORIZONTAIS DO TESTE 3.....	102
TABELA 21 – DISTÂNCIAS DO TESTE 5	102
QUADRO 1 – PROPRIEDADE DOS REVESTIMENTOS DO ESPELHO	28
QUADRO 2 – TIPOS DE LASER	47
QUADRO 3 – LASERS UTILIZADOS EM EQUIPAMENTOS TOPOGRÁFICOS.....	48

LISTA DE SÍMBOLOS

E	campo elétrico da luz
B	campo magnético da luz
f	vetor direção de propagação da luz
ν	frequência
λ	comprimento de onda
S	trajetória óptica
n	índice de refração
c	velocidade da luz no vácuo
v	velocidade da luz no meio material
t	tempo
AA	fonte de luz pontual
DD	ponto
AA'	imagem virtual da fonte de luz AA
PP ₁ e PP _{min}	pontos na superfície refletora
\vec{T}	vetor direção dos planos paralelos
\vec{k}_i	vetor posição localizado no plano médio
\vec{A}	vetor posição qualquer
d	distância
mi	próximo valor inteiro mais elevado
F	número máximo de estrias
D	diâmetro máximo das cavidades
O' e O''	extremidades do objeto
I' e I''	extremidades da imagem
i	ângulo de incidência
r	ângulo de reflexão
p	distância do objeto ao espelho
q	distância da imagem ao espelho
H	tamanho do objeto
H'	tamanho da imagem
O	objeto
I	imagem
N	onda incidente

α	ângulo entre as direções BB'' e BD
α'	ângulo entre as direções BD e BB'
OM	frente de onda
RI	raio incidente
i_1	ângulo de incidência na face anterior
r_1	ângulo de reflexão na face anterior
rf_1	ângulo de refração na primeira refração
i_2	ângulo de incidência na face posterior
r_2	ângulo de reflexão na face posterior
rf_2	ângulo de refração na segunda refração
L	feixe de luz
M	espelho semi-prateado
M_1	espelho móvel
M_2	espelho fixo
V	observador
DF_1	divisor de feixe 1
DF_2	divisor de feixe 2
Δt	tempo de percurso, ida e volta
R	lâmpadas
TT	tubo
MM_1	espelho parcialmente espelhado
MM_2	espelho
PS	pulsada
CT	contínua
UV	ultravioleta
VS	visível
IV	infravermelho
GS	gás
SL	sólido
LQ	líquido
IN	invisível
Hz	direção horizontal
Z	distância zenital

d_i	distância inclinada
d_h	distância horizontal
P	ponto qualquer
P'	projeção do ponto P no plano XY
P''	projeção do ponto P' no eixo Y
P'''	projeção do ponto P' no eixo X
EO	origem do sistema cartesiano
G	posição do teodolito
E1 à E4	alvos gravados na superfície do espelho
ϕ	ângulo paralático
MA	alvo esquerdo da mira horizontal de ínvar
MB	alvo direito da mira horizontal de ínvar
MC	alvo no centro da mira horizontal de ínvar
M1 à M8	alvos fixados na mira horizontal de ínvar
d_1	distância entre a estação total e o espelho
d_2	distância entre o espelho e o alvo visado
\vec{w}	vetor
\vec{u}	vetor que define o eixo do sistema cartesiano do espelho
\vec{v}	vetor que terá sua medida algébrica projetada
\bar{x}	média aritmética das observações
k	número de observações
l_i	observações
m ou σ	erro médio quadrático de uma observação isolada
$m_{\bar{x}}$ ou $\sigma_{\bar{x}}$	erro médio quadrático da média aritmética
MVA	alvo virtual do MA
MVB	alvo virtual do MB
MVC	alvo virtual do MC
MV1 à MV8	alvos virtuais dos M1 à M8

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1. OBJETIVO GERAL.....	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.3 JUSTIFICATIVA.....	16
1.4 ESTRUTURAÇÃO DA PESQUISA.....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 CARACTERÍSTICAS DA LUZ.....	18
2.2 PRINCÍPIO DE FERMAT.....	22
2.3 PROPRIEDADES DOS ESPELHOS.....	23
2.3.1 Planicidade.....	24
2.3.2 Tolerância da superfície	26
2.3.3 Rugosidade	27
2.3.4 Revestimento	27
2.3.5 Superfície Refletora.....	28
2.3.5.1 Reflexão especular.....	32
2.3.5.2 Reflexão difusa.....	34
2.3.5.3 Reflexão dupla e simples	34
2.4 MEDIDA DE DISTÂNCIA.....	36
2.4.1 Interferometria.....	36
2.4.1.1 Interferômetro de Michelson.....	37
2.4.1.2 Interferômetro de Fizeau	38
2.4.1.3 Interferômetro de March-Zehnder	39
2.4.2 Estação Total	40
2.4.2.1 Medida angular.....	40
2.4.2.2 Distânciometro	40
2.5 LASER	42
2.5.1 Conceitos fundamentais do <i>laser</i>	42
2.5.2 Cavityde ressonante	43
2.5.2.1 Laser HeNe	49
2.5.2.2 Laser GaAlAs	49
2.6 SISTEMA DE COORDENADAS.....	49
2.7 DETERMINAÇÃO DE COORDENADAS TRIDIMENSIONAIS.....	50

3 MÉTODO.....	53
3.1 ESPELHO	53
3.2 REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS.....	54
3.2.1 Experimento 1	54
3.2.2 Experimento 2	56
3.2.3 Experimento 3	58
3.2.4 Experimento 4	58
3.3 SUPORTE DO ESPELHO	59
3.4 ALVOS GRAVADOS NA SUPERFÍCIE DO ESPELHO	61
3.5 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS LEVANTAMENTOS	64
3.5.1 Mira horizontal de ínvar	64
3.6 MÉTODO DE LEVANTAMENTO PROPOSTO.....	68
3.6.1 Sistema de Posicionamento com Espelho	69
3.6.1.1 Levantamento dos pontos materializados na mira horizontal de ínvar	70
3.7 MODELO MATEMÁTICO ADOTADO	72
3.7.1 Sequência de Cálculos.....	72
3.7.1.1 Conexão das coordenadas obtidas para diferentes posição	79
4 RESULTADOS.....	81
4.1 TESTE DE PLANICIDADE DO ESPELHO	81
4.2 CALIBRAÇÃO DA MIRA HORIZONTAL DE ÍNVAR	86
4.3 DETERMINAÇÃO DA POSIÇÃO DOS ALVOS DA MIRA HORIZONTAL DE ÍNVAR.....	89
5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	103
5.1 CONCLUSÕES.....	103
5.2 RECOMENDAÇÕES.....	104
6 COOPERAÇÃO E/OU SUPORTE PARA SUA REALIZAÇÃO	106
8 REFERÊNCIAS.....	107

1 INTRODUÇÃO

O homem ao longo do tempo procurou demarcar sua posição e seu domínio, inicialmente sem utilizar-se dos conceitos e estudos que vieram a formar o que hoje conhecemos como topografia (ciência que estuda a representação gráfica de uma parte da superfície terrestre, de acordo com KAHMEN, FAIG, 1988). Atualmente em muito tem se utilizado esses conhecimentos e também os conceitos de Geodésia (ciência que trata da medição e representação da Terra, incluindo o seu campo de gravidade, em um espaço tridimensional variável no tempo, VANICEK, KRAKIWSKY, 1986) para: delimitar áreas urbanas ou rurais, local obras, apoiar mapeamento, por exemplo.

Atualmente, além dos levantamentos topográficos convencionais, destaca-se a topografia industrial, que tem dentre seus objetivos: a locação com precisão de estruturas e equipamentos, o controle métrico de equipamentos e produtos industriais e o controle de deslocamento de máquinas.

Nesses levantamentos, o método empregado na aquisição de dados é escolhido de acordo com a possibilidade de obtenção dos mesmos. Porém, existem diversas dificuldades que envolvem essa etapa da geração de produtos topográficos, tais como: impossibilidade de medida direta de distância, de ângulos verticais e direções horizontais em face da obstrução existente entre a estação total e o alvo, instabilidade (por vibração do solo) no local do levantamento e impossibilidade de visualização do objeto em estudo.

Para contornar esses problemas, tem se realizado pesquisas buscando desenvolver metodologias que viabilizem a realização de medições que não seriam possíveis utilizando as técnicas tradicionais.

Pensando nisso, essa tese foi concebida com o objetivo de desenvolver um método para determinação de coordenadas de pontos, realizando-se medições de ângulos verticais, direções horizontais e distâncias inclinadas utilizando estação total e acessórios desenvolvidos especificamente para atender esse projeto, ou seja, determinar coordenadas de objetos usando um espelho plano para desviar a visada.

Para simular essa situação utilizou-se uma mira horizontal de invar, um conjunto de alvos gravados ao longo da mesma, não acessíveis visualmente a partir da estação total usada para realizar as medidas. Um espelho com a face refletora frontal permitiu visualizar os alvos de interesse e dessa maneira realizar as medições necessárias. Com isso, todos os cálculos para determinação posicional dos alvos de interesse estão vinculados a posição do espelho. Surge então um novo problema: a necessidade de determinar a atitude do mesmo no espaço, ou seja, determinar o plano que coincide com a superfície do espelho no momento da medição. A partir desse determina-se o plano denominado plano de reflexão, o qual é fundamental para o cálculo das coordenadas do alvo de interesse. Como o próprio nome sugere trata-se do plano no qual ocorre a reflexão do alvo. Para tanto, foram gravados alvos de referência na superfície do espelho, os quais tiveram suas coordenadas absolutas determinadas por métodos topográficos.

Também foi desenvolvido um suporte para esse espelho, que permitisse a rotação vertical e horizontal e também sua fixação em um tripé. Essas rotações do espelho são elementos fundamentais para auxiliar na visualização do alvo de interesse.

Para o processamento dos dados, objetivando a determinação das coordenadas, foram desenvolvidas rotinas computacionais utilizando o ambiente matlab.

1.1. OBJETIVO GERAL

Determinar indiretamente coordenadas topográficas tridimensionais utilizando estação total e espelho plano.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Projetar e construir um sistema que permita a adaptação de um espelho

- plano em uma base nivelante de estação total;
- b) Determinar a atitude do espelho no espaço através de alvos gravados no mesmo e posicionamento desses alvos;
 - c) Determinar as distâncias entre os alvos de referência gravados no espelho, utilizando interferometria;
 - d) Determinar a distância entre os alvos gravados em uma mira horizontal de ínvar, utilizando interferometria e o método proposto;
 - e) Validar através da comparação as coordenadas dos alvos mencionados no item anterior, sem a interferência do espelho, ou seja, utilizando o método direto de obtenção de coordenadas;
 - f) Avaliar a influência de diferentes configurações geométricas da posição do espelho, estação total e objeto na obtenção das coordenadas.

1.3 JUSTIFICATIVA

A determinação da posição de objetos em área industrial teve suas primeiras investigações no curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas com a tese de doutorado “Interseção óptica tridimensional aplicada à engenharia de precisão” (NADAL, 2000). Esse estudo apontou a necessidade de posicionar objetos que não permitam visada direta utilizando estação total. Em função disso, iniciou-se uma busca em periódicos nacionais e internacionais e não detectou-se nenhuma contribuição para solução desse problema, a não ser o artigo “Range Determination Using Target Images”, de AHAMED, 1994, com a indicação da utilização de estação total e reflexão especular para determinar coordenadas de objetos não visíveis de forma direta.

Por essa razão e pela necessidade cada vez maior de posicionamento com alta precisão em ambiente industrial é que se desenvolveu essa pesquisa.

1.4 ESTRUTURAÇÃO DA PESQUISA

Buscando proporcionar ao leitor um entendimento do estudo desenvolvido nessa pesquisa o assunto foi tratado da seguinte forma:

No capítulo 2, são abordados os tópicos referentes a revisão bibliográfica, tais como: conceitos de ótica, de reflexão especular, medida de distância, interferometria, álgebra vetorial e geometria analítica.

No capítulo 3, apresenta-se a calibração dos equipamentos utilizados nessa pesquisa bem como a metodologia desenvolvida na determinação de coordenadas em que é necessário o desvio da visada.

No capítulo 4, são apresentados os resultados alcançados na calibração e na obtenção das coordenadas aplicando a metodologia proposta.

O capítulo 5 traz as conclusões e recomendações enfatizando a contribuição desse trabalho.

Por último, no capítulo 6, apresentam-se as referências bibliográficas consultadas.

Nos apêndices constam as cadernetas de campo, projeto do suporte do espelho e as rotinas computacionais desenvolvidas para o cálculo das coordenadas empregando-se desvios de visadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O desenvolvimento desse método de posicionamento envolve conceitos de física, matemática e transformação de sistemas de referência. Na sequência, serão discutidos conceitos desses conteúdos necessários para a compreensão do método proposto.

2.1 CARACTERÍSTICAS DA LUZ

A luz pode ser tratada como uma manifestação da matéria. Um princípio básico da Mecânica Quântica trata a luz e objetos materiais com propriedades de onda-partícula similares. Schrödinger, um dos fundadores da teoria quântica, afirmou que desapareceram novos estudos de distinção entre ondas e partículas, em função da descoberta de que todas as partículas têm também a propriedade de ondas e vice versa. Nem um dos dois conceitos pode ser descartado, mas sim ser associados (HECHT, 1986; RICCI, 2001).

A luz, a partir da demonstração do efeito fotoelétrico, não pode ser tratada apenas como onda. Nessa demonstração uma placa metálica é exposta a um feixe de luz, sendo que cada quantum de energia corresponde a um fóton. Quando os fótons, do feixe de luz, incidem sobre essa placa metálica, eles cedem sua energia aos elétrons da última camada da placa de metal, permitindo que esses adquiram energia suficiente para saltar da placa, Figura 1.

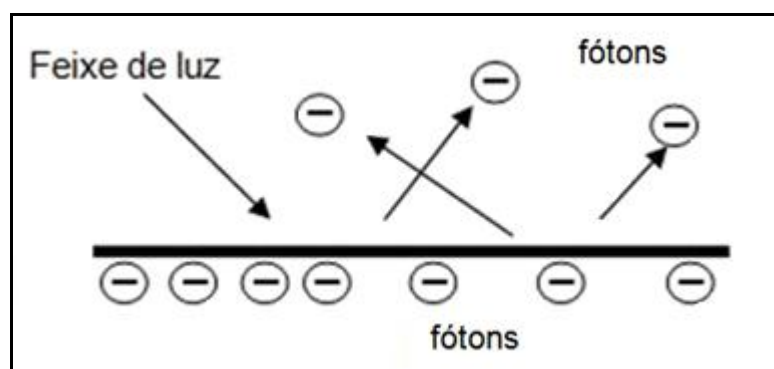


FIGURA 1 – EFEITO FOTOELÉTRICO
FONTE: O autor

As duas naturezas da luz, onda e partícula, podem ser evidenciadas pelo fato da propagação ocorrer através de uma ondulação moldada e que apresenta a existência de partículas durante o processo de emissão e absorção. A energia eletromagnética é criada e destruída em quanta ou fótons (luz visível) e não continuamente como uma onda clássica. A grande contribuição de Maxwell foi mostrar que a óptica, estudo da luz visível, é um ramo do eletromagnetismo e que um feixe de luz é uma configuração de campos elétricos e magnéticos que se propagam (HALLIDAY, RESNICK E MERRILL, 1995).

As ondas são constituídas de um campo elétrico (E) e de um campo magnético (B) que variam periodicamente no tempo e se propagam em uma determinada direção. A Figura 2 apresenta os vetores indicativos do campo magnético e elétrico, que estão contidos em planos perpendiculares à direção de propagação representada por (f) (ÓTICA, 2006).

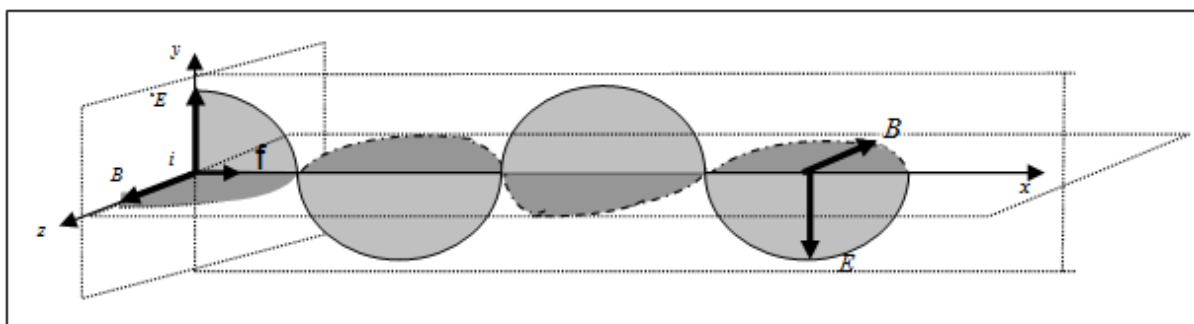


FIGURA 2 – ONDAS ELETROMAGNÉTICAS
ADAPTADO DE: OTICA, 2006

Devido a natureza ondulatória da luz, essa pode ser caracterizada por sua frequência e comprimento de onda. Sendo a frequência (ν) o número de vezes que uma onda passa por um ponto, geralmente é expressa pelo número de ondas por segundo ou Hertz (Hz). O comprimento de onda (λ) é a distância entre dois máximos ou dois mínimos da onda, Figura 3.

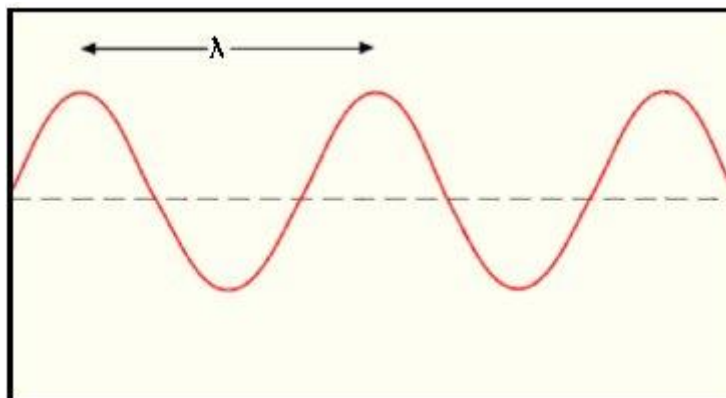


FIGURA 3 – COMPRIMENTO DE ONDA
 FONTE: O autor

Quando a luz tem apenas um comprimento de onda, ou frequência, é chamada de monocromática. Na Figura 4 apresenta-se a escala do comprimento de onda. Essa é traçada de modo que cada sinal represente uma mudança no comprimento e na frequência correspondente, por um fator de 10. É importante salientar que os comprimentos das ondas eletromagnéticas não possuem limites superior e inferior definidos (HALLIDAY, RESNICK E MERRILL, 1995).

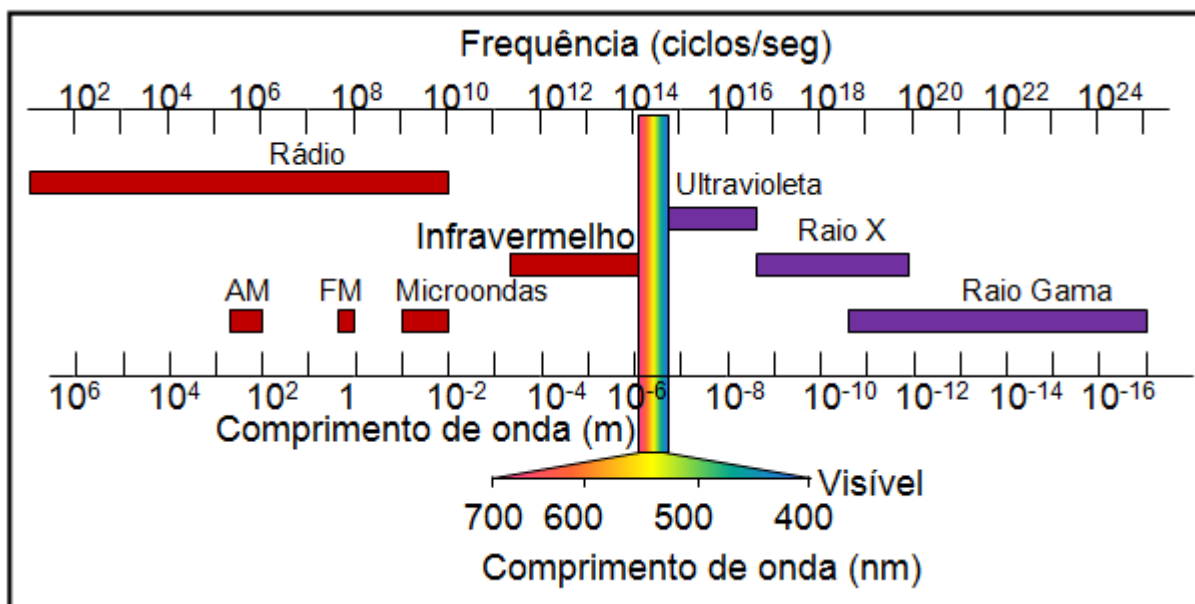


FIGURA 4 – ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO
 ADAPTADO DE: CENTENO, 2004 e BOSCHI FILHO, 2006

As ondas eletromagnéticas têm as seguintes características (HALLIDAY, RESNICK E MERRILL, 1995):

- propagam-se no vácuo com a mesma velocidade escalar;

- o centro da região visível é aproximadamente 550 nm, o qual produz uma sensação de verde próximo ao amarelo;
- os limites da região visível são bem definidos.

A luz visível cobre apenas um pequeno intervalo das ondas eletromagnéticas, sendo o limite inferior e superior iguais à 380 e 750 nm, respectivamente. Podendo ter velocidades diferentes, porém altas, propagando-se em linha retilínea e interage com o meio que ocupa. Dessa forma, quando percorre uma distância (d) no ar e essa mesma distância no vidro, por interagir com as moléculas do vidro, o tempo de deslocamento será maior nesse meio. A trajetória ótica, que determina o atraso ocorrido no vidro, é calculada com a Equação (MEYER-ARENDE, 1995).

$$S = d.n \quad (1)$$

Onde:

S – trajetória ótica;

d – distância percorrida;

n – índice de refração.

O índice de refração, obtido com a Equação (2), representa a relação entre a velocidade da luz no vácuo e sua velocidade em um meio material.

$$n = \frac{c}{v} \quad (2)$$

Sendo:

c – velocidade da luz no vácuo;

v – velocidade da luz no meio material.

Isolando-se (v) tem-se:

$$v = \frac{c}{n} \quad (3)$$

2.2 PRINCÍPIO DE FERMAT

Hierão de Alexandria, que viveu entre 150 a.C. e 250 d.C., foi quem primeiro propôs o conceito do princípio variacional. Em 1957, foi reformulado por Fermat sendo denominado princípio do tempo mínimo, “a trajetória seguida por um raio luminoso entre dois pontos é aquela que é percorrida no menor intervalo de tempo possível” aplicado tanto à reflexão quanto à refração (HECHT, 2002):

A Figura 5 ilustra esse princípio. Ou seja, uma fonte de luz pontual (AA) emite uma série de raios que atingem a superfície refletora e direcionam-se para o ponto (DD), na realidade física somente uma dessas trajetórias é possível (AAPP_{min}DD). Para uma melhor visualização traçou-se os raios que emergem da imagem virtual (AA'), assim nenhuma das distâncias até o ponto (DD) é alterada, observa-se que o percurso de menor distância é a trajetória retilínea (AA'PP_{min}DD), no qual o ângulo de incidência é igual ao de reflexão (HECHT, 2002).

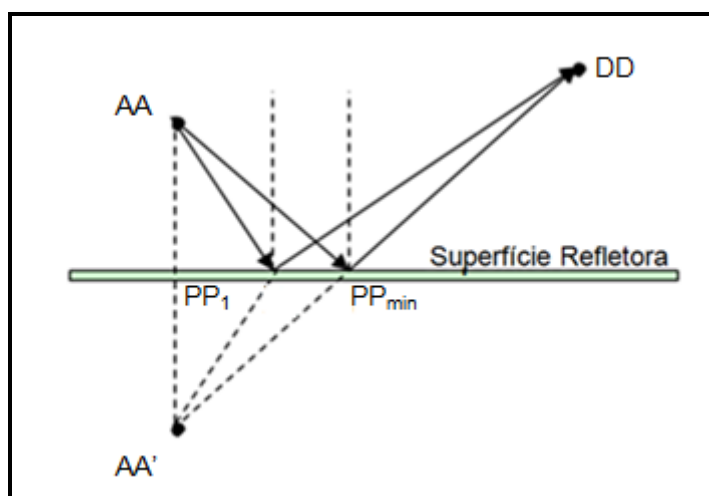


FIGURA 5 – PRINCÍPIO DE FERMAT
ADAPTADO DE: TIPLER, 2000

O tempo (t) gasto pela luz para percorrer uma distância (l) pode ser calculado utilizando-se a Equação (4).

$$t = \frac{l}{v} \quad (4)$$

Onde:

t – tempo gasto para percorrer a distância;

v – velocidade no meio;

l – distância percorrida num meio homogêneo e isótropo.

Substituindo-se a Equação (3) na (4) tem-se:

$$t = \frac{l \cdot n}{c} \quad (5)$$

O produto ($l \cdot n$) é a trajetória ótica, já apresentada na Equação (1), a qual representa a distância percorrida pela luz, no vácuo, durante o tempo (t). Como (n) é constante, por ser um meio homogêneo e isótropo, o caminho ótico mínimo também corresponde à distância mínima, ou seja, a luz percorre uma trajetória retilínea (NUSSENZVEIG, 1998).

2.3 PROPRIEDADES DOS ESPELHOS

Na Antiguidade, os espelhos eram feitos de metal polido, como o bronze e ouro. Os primeiros espelhos de vidro foram fabricados em Murano, em Veneza no fim do século XIII. Atualmente, são produzidos a partir da deposição de metais, tais como prata, alumínio, níquel ou cromo, sobre uma face do vidro. Esses metais são protegidos por camadas de tinta, sendo o espelho à base de prata, um dos mais difundidos (CEBRACE, 2006), Figura 6.

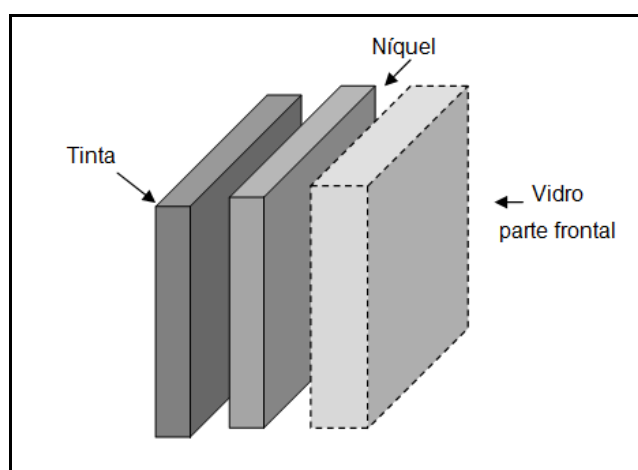


FIGURA 6 – CAMADAS DE UM ESPELHO
FONTE: O autor

Os espelhos podem possuir diferentes formas, tais como: plano; esférico; parabólicos e cilíndricos, tendo utilidade tanto no uso doméstico e carros como em

telescópios, programas espaciais e em pesquisas, por exemplo. Esses últimos são precisos, possuindo uma baixa distorção de imagem e alta refletividade (KING II et al, 1998).

Atualmente, é possível construir espelhos com qualidade óptica identificando, e adequando as propriedades (planicidade, deslocamento angular do eixo ótico e mecânico, precisão da superfície, energia de irregularidade “power”, rugosidade e refletividade) e garantindo o correto desempenho. Muitas dessas propriedades são idênticas para todos os tipos de espelhos, porém ainda não existe um controle de qualidade adequado para uma produção em série, sendo necessário testar individualmente cada espelho. O controle da qualidade requer que sejam testados os espelhos buscando garantir as propriedades anteriormente citadas (KING II et al 1998).

2.3.1 Planicidade

Uma das maneiras de definir um plano é por três pontos não colineares, logo um plano não possui espessura. No entanto, não é possível fabricar uma superfície perfeitamente plana. Em função disso existem tolerâncias adotadas nos pontos externos a esse plano ideal. Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), o campo de tolerância é limitado por dois planos paralelos, com uma distância (t) entre eles, estando entre esses a superfície analisada (ABNT¹, apud MAGALHÃES, 2006).

Em 1993, foi desenvolvida uma definição matemática para tolerâncias geométricas, documentadas na norma ANSI Y14.5.1M – “*Draft: Mathematical Definition of Dimensionins and Tolerancing Principle*”, estabelecendo que a zona de planicidade é um volume em que todos os pontos devem satisfazer a condição da Equação (6) (ANSI², apud MAGALHÃES, 2006).

$$\left| \vec{T} \cdot \left(\vec{K}_i - \vec{A} \right) \right| \leq \frac{t}{2} \quad (6)$$

¹ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1980)

² ANSI/ASME B89.4.1. Methods for performance evaluation of coordinate measuring machines. (1997)

Sendo:

- \vec{T} – vetor direção dos planos paralelos;
- \vec{K}_i – vetor posição localizado no plano médio;
- \vec{A} – vetor posição qualquer;
- d – distância entre os planos paralelos.

Através da Figura 7 é possível visualizar as relações dadas pela equação (6).

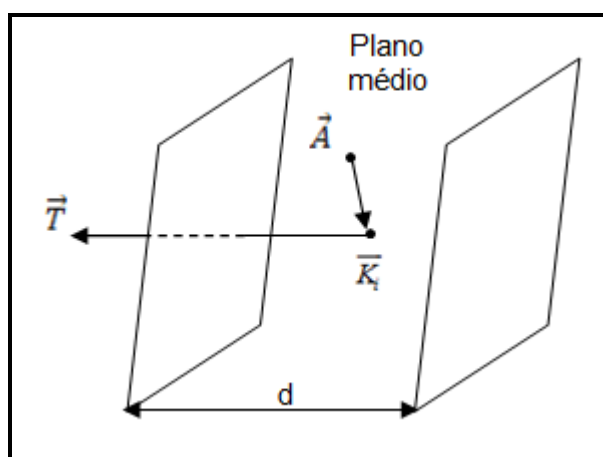


FIGURA 7 – ZONA DE PLANICIDADE
FONTE: MAGALHÃES, 2006

Nessa (\vec{T}) é o vetor direção dos planos paralelos que definem a zona de tolerância; (\vec{K}_i) é o vetor posição contido no plano médio; (d) a distância entre os planos paralelos e (\vec{A}) vetor posição qualquer (MAGALHÃES, 2006).

A planicidade é testada em relação a um modelo padrão e encontra-se entre 1/20 do comprimento de onda. Esse parâmetro é especificado pela distorção da frente de onda da luz refletida. Quanto menor a distorção da frente de onda maior o grau de planicidade. Essa distorção é mensurada pela direção do feixe de um laser e a divisão dessa em duas frentes de onda uma de teste e outra de referência (KING II et al, 1998).

A frente de onda de referência e a de teste são inicialmente refletidas sem o uso do espelho a ser testado. O interferômetro mede a interferência entre as duas frentes de onda retornando o valor da distorção da mesma. Esse resultado é apresentado em (λ/mi), em que (λ) é o comprimento de onda geralmente especificado como 632,8 nm e (mi) é selecionado como o próximo valor inteiro mais

elevado de acordo com a utilização do espelho (KING II et al, 1998).

As bordas dos espelhos não possuem as mesmas especificações do centro, sendo assim a zona de qualidade normalmente compreende 80 a 90% da área central. Dessa forma, o paralelismo da luz refletida é afetado pela planicidade da superfície do espelho, sendo mensurado por uma comparação entre as frentes de onda refletida e incidente. Geralmente o paralelismo é especificado por uma tolerância de ± 3 minutos de arco (KING II et al, 1998).

A planicidade de uma superfície de vidro pode ser testada por meio das franjas de interferência, para tanto é necessário utilizar um modelo padrão (opticamente plano) e pressionar sobre a superfície de vidro a ser testada, Figura 8. Se essa for plana as franjas que se formam são linhas retas paralelas entre si.

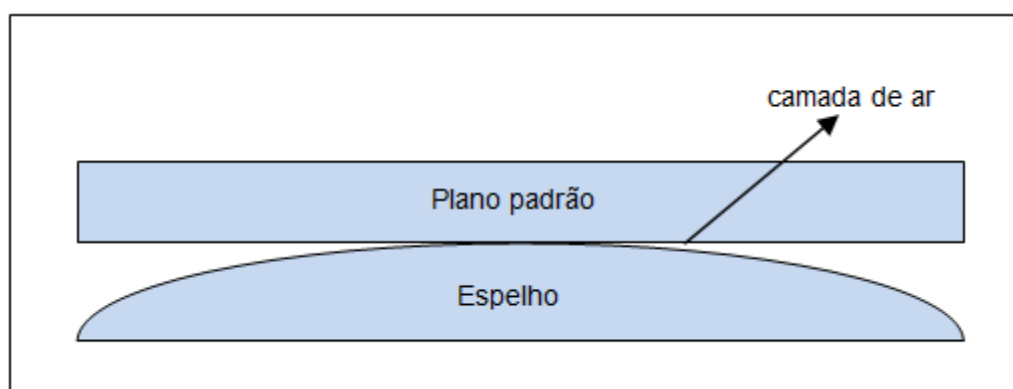


FIGURA 8 – TESTE DE PLANICIDADE DE DUAS SUPERFÍCIES DE VIDRO
FONTE: O autor

Segundo testes realizados por Cordini, 1991, nem mesmo os vidros do tipo cristal, que apresentaram melhores resultados, não possuem a superfície perfeitamente plana.

2.3.2 Tolerância da superfície

A tolerância da superfície determina a proximidade que a superfície do espelho tem em relação a uma superfície padrão, sendo usualmente um décimo de um comprimento de onda. A maioria dos espelhos precisam ter uma abertura de 90% ou maior (KING II et al, 1998).

2.3.3 Rugosidade

A qualidade da superfície de um espelho determina a sua capacidade de reflexão e reprodução da imagem. A tolerância de estrias (*Scratch*) e cavidades (*Dig*) na superfície são especificadas como (F-D), em que (F) o número máximo de estrias visíveis e (D) é o máximo diâmetro das cavidades em nanômetro, sendo o padrão de qualidade 60-40. Ou seja, são visíveis no máximo 60 estrias sendo que a maior possui um diâmetro igual ou menor a 40 nm (KING II et al, 1998), Figura 9.

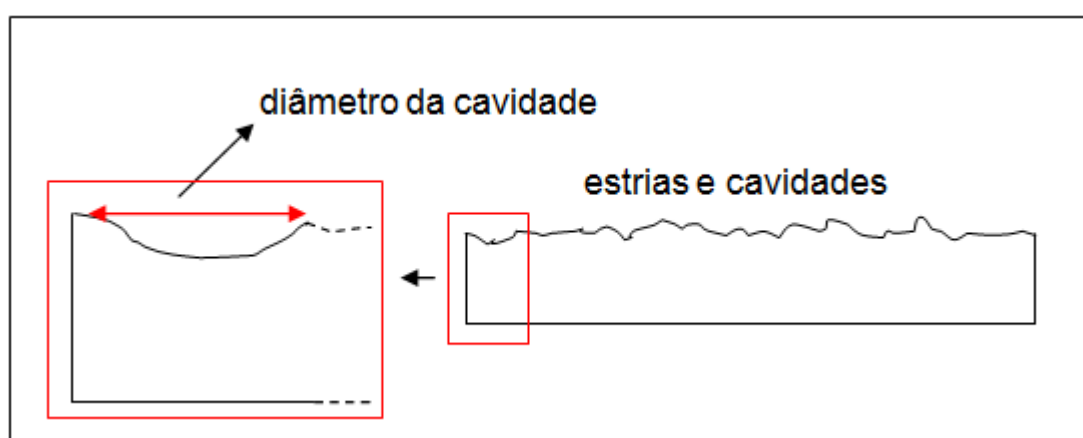


FIGURA 9 – PERFIL DE UMA SUPERFÍCIE RUGOSA
FONTE: O autor

2.3.4 Revestimento

Existem diversos tipos de revestimentos, que variam de acordo com a utilização do espelho. A propriedade que define o revestimento a ser usado é a refletividade, que é a razão entre os fluxos de energia dos feixes refletidos e incidentes, podendo ser obtida experimentalmente em função do número de onda, que é obtido utilizando um laser e um medidor de energia. No Quadro 1, a seguir, apresentam-se as propriedades de alguns revestimentos (TRASFERETTI, DAVANZO, 2001; KING II et al, 1998).

Revestimento	Intervalo da frente de onda (nm)	Média de refletância (%)
Alumínio	200 – IR	90
Prata	400 – IR	98
Ouro	400 – IR	99

QUADRO 1 – PROPRIEDADE DOS REVESTIMENTOS DO ESPELHO
ADAPTADO DE: KING II et al, 1998

2.3.5 Superfície Refletora

Uma superfície é refletora quando permite a reflexão de um feixe de luz. Nesse projeto a superfície refletora é um espelho de alta refletividade, no qual o vidro serve somente de anteparo para a camada refletora, a fim de minimizar o fenômeno de refração, uma vez que nessas estruturas o sinal não sofre influências da superfície do vidro, na Figura 10.

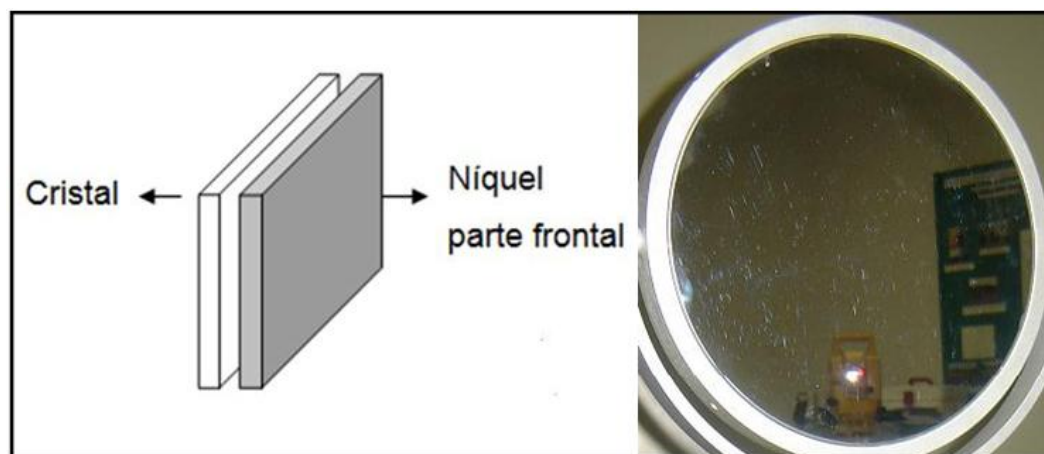


FIGURA 10 – SUPERFÍCIE DE REFLETORA
FONTE: O autor

A reflexão de um objeto apresenta três características:

- 1ª. – a distância entre a imagem e o espelho será sempre igual à distância entre o objeto e o espelho;
- 2ª. – o tamanho da imagem será sempre igual ao tamanho do objeto;
- 3ª. – os raios incidente e refletido pertencem ao mesmo plano.

Na Figura 11 demonstra-se a igualdade entre o tamanho da imagem e do objeto.

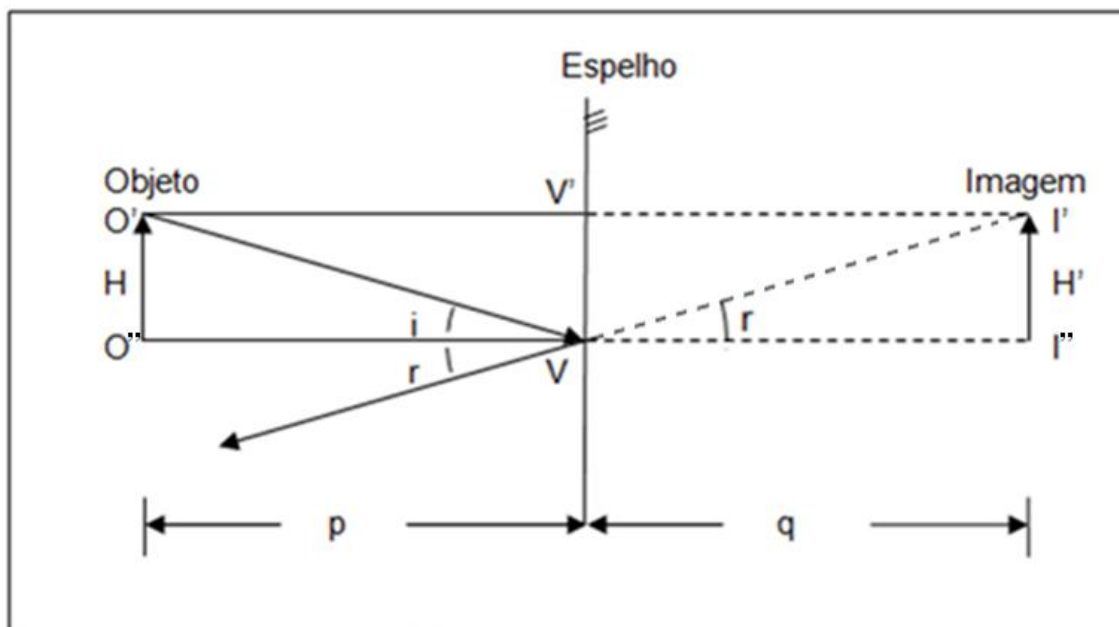


FIGURA 11 – REFLEXÃO DE UM OBJETO EM UM ESPELHO
ADAPTADO DE: SCHIEL, 2009

Na Figura 11:

i – ângulo de incidência;

r – ângulo de reflexão;

p – distância do objeto ao espelho;

q – distância da imagem ao espelho;

H – tamanho do objeto;

H' – tamanho da imagem.

Para se provar que o tamanho do objeto e da sua imagem são iguais, observa-se no triângulo $\widehat{VO'O''}$ que:

$$\operatorname{tg}(i) = \frac{H}{p} \quad (7)$$

Como:

$$r = i \quad (8)$$

Logo,

$$\operatorname{tg}(r) = \operatorname{tg}(i) \quad (9)$$

$$\frac{H'}{-q} = \frac{H}{p} \quad (10)$$

$$\frac{H'}{H} = \frac{-q}{p} \quad (11)$$

Sendo:

$$A = \frac{H'}{H} \quad (12)$$

e,

$$p = -q \quad (13)$$

Dessa maneira:

$$A = \frac{H'}{H} = \frac{-q}{p} = 1 \quad (14)$$

Isto explica que toda imagem visível diante de um espelho é formada por reflexão, que ocorre quando os raios que incidem sobre uma superfície voltam ao meio onde ocorreu a incidência. Essa imagem, formada atrás do espelho, é denominada virtual, uma vez que a luz não passa através dela (NUSSENZVEIG, 1998; HALLIDAY, RESNICK E MERRIEL, 1995).

Na Figura 12 apresenta-se um ponto origem de luz (O), denominado objeto, localizado a uma distância (p) à frente do espelho plano. A luz incidente nesse é representada pelos raios que emanam de (O), sendo refletidos pelo espelho. O prolongamento dos raios refletidos, atrás do espelho, forma a imagem do objeto, ponto (I). Logo a distância (p), entre o objeto e o espelho, por convenção positiva possui mesma grandeza que a distância (q), entre a imagem e o espelho, por convenção negativa.

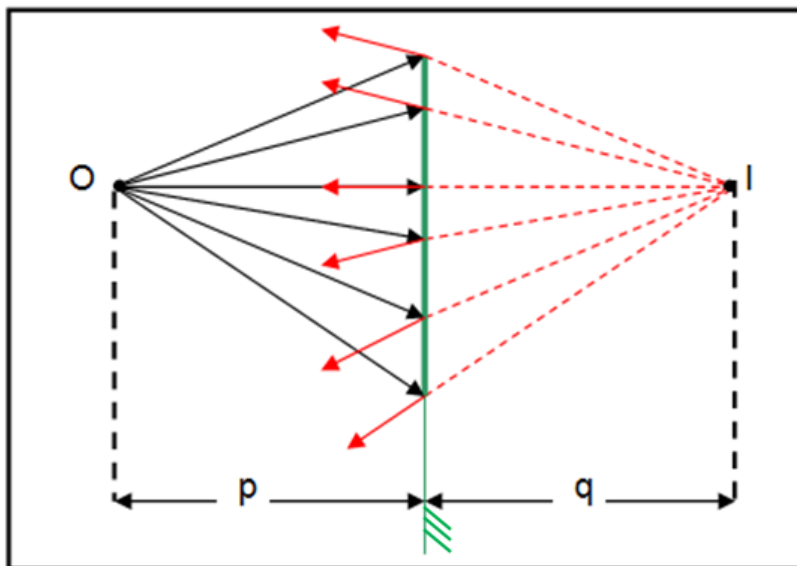


FIGURA 12 – OBJETO PONTUAL E SUA IMAGEM VIRTUAL
ADAPTADO DE: HECHT, 1986

A lei da reflexão determina que o raio refletido e o incidente pertencem ao mesmo plano e que os ângulos de incidência e reflexão possuem a mesma grandeza.

Na Figura 13, supondo que uma onda plana incida em uma superfície plana (XY) e o ângulo de incidência (i) formado entre a normal e essa superfície (linha tracejada), a reta (\overline{OM}) representa a frente de onda no momento em que essa toca a superfície plana (GOLDEMBERG, 1973).

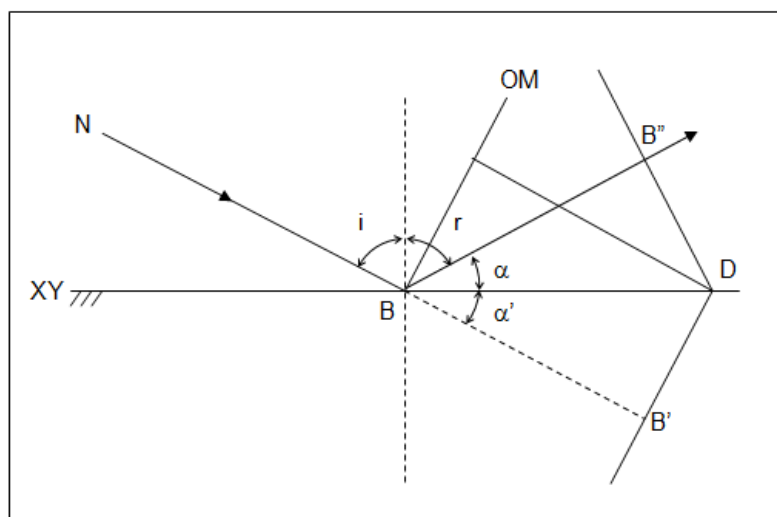


FIGURA 13 – LEI DA REFLEXÃO
ADAPTADO: GOLDEMBERG, 1973

Analisando a mesma figura, se a superfície (XY) não existisse a onda incidente (N) continuaria seu percurso e em um instante (t_1) estaria na posição (B'), porém, quando a onda incidente atinge a superfície (XY) é refletida chegando à posição (B'') no instante (t_1).

Comparando os triângulos ($\widehat{BB''D}$) e ($\widehat{BB'D}$) percebe-se que os ângulos (α) e (α') são iguais, logo (i) é igual a (r). Para que ocorra a reflexão descrita é necessário que a superfície representada pela reta XY seja refletiva, podendo a reflexão ser especular ou difusa (GOLDEMBERG, 1973).

2.3.5.1 Reflexão especular

A reflexão especular ocorre quando os raios são refletidos em uma única direção, ou seja, eles são paralelos entre si. Por esse motivo, para que seja possível enxergar a reflexão de um objeto, o observador precisa estar em determinada posição diante da superfície refletora. Essa reflexão só ocorre quando a profundidade média da mesma for menor que o comprimento de onda da luz incidente, ou seja, a superfície do espelho seja opticamente plana (CESAR, 1966; HALLIDAY E RESNICH, 1966). Na Figura 14 mostra-se a reflexão especular.

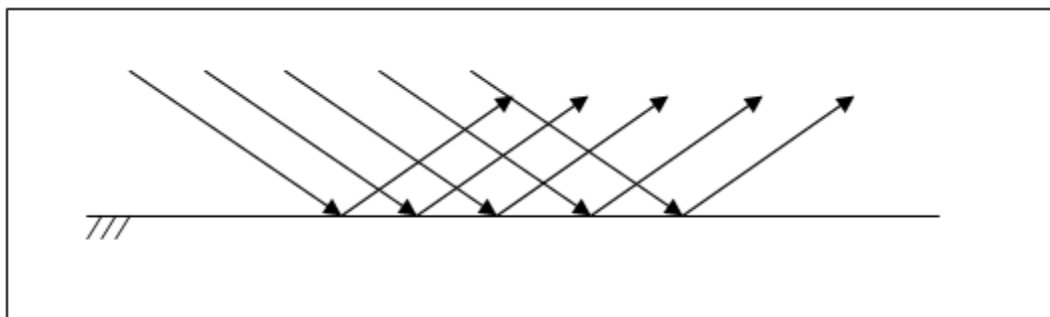


FIGURA 14 – REFLEXÃO ESPECULAR
ADAPTADO DE: CESAR, 1966

A reflexão obedece às seguintes leis:

- 1ª: o raio incidente, a reta normal à superfície refletora no ponto de incidência e o raio refletido estão contidos no mesmo plano;
- 2ª: na reflexão especular o ângulo de incidência (i), ângulo entre a normal e o raio incidente, tem a mesma medida que o ângulo de reflexão (r), ângulo entre a normal e o raio refletido, Figura 15 (CESAR, 1966).

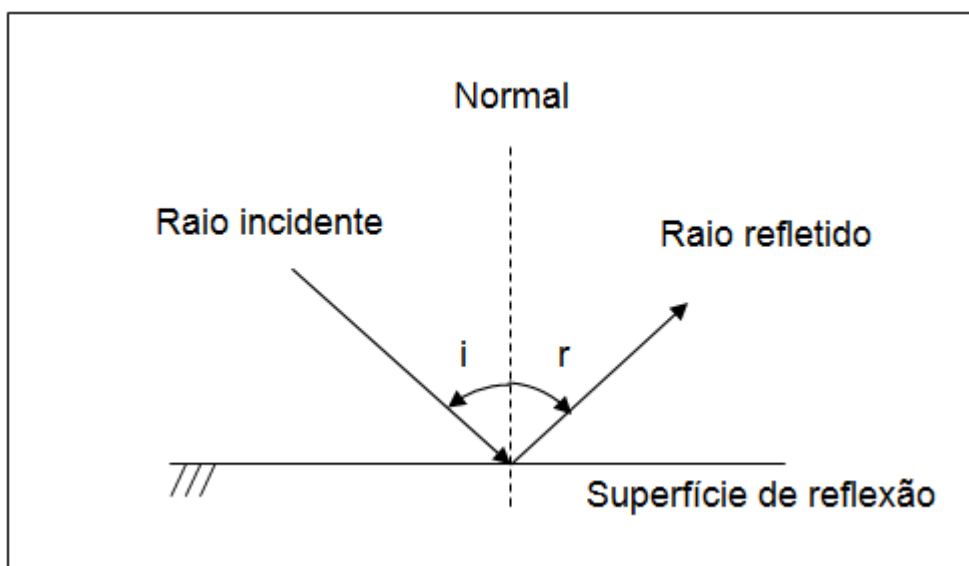


FIGURA 15 – ÂNGULOS DE INCIDÊNCIA E REFLEXÃO
ADAPTADO DE: JENKINS E WHITE, 1976

2.3.5.2 Reflexão difusa

A reflexão difusa ocorre em superfícies microscopicamente rugosas, refletindo os raios em qualquer direção. A diferença entre a reflexão especular e a difusa é uma consequência das estrias e cavidades da mesma (HALLIDAY E RESNICK,1966). Na Figura 16 pode-se observar um exemplo da reflexão difusa.

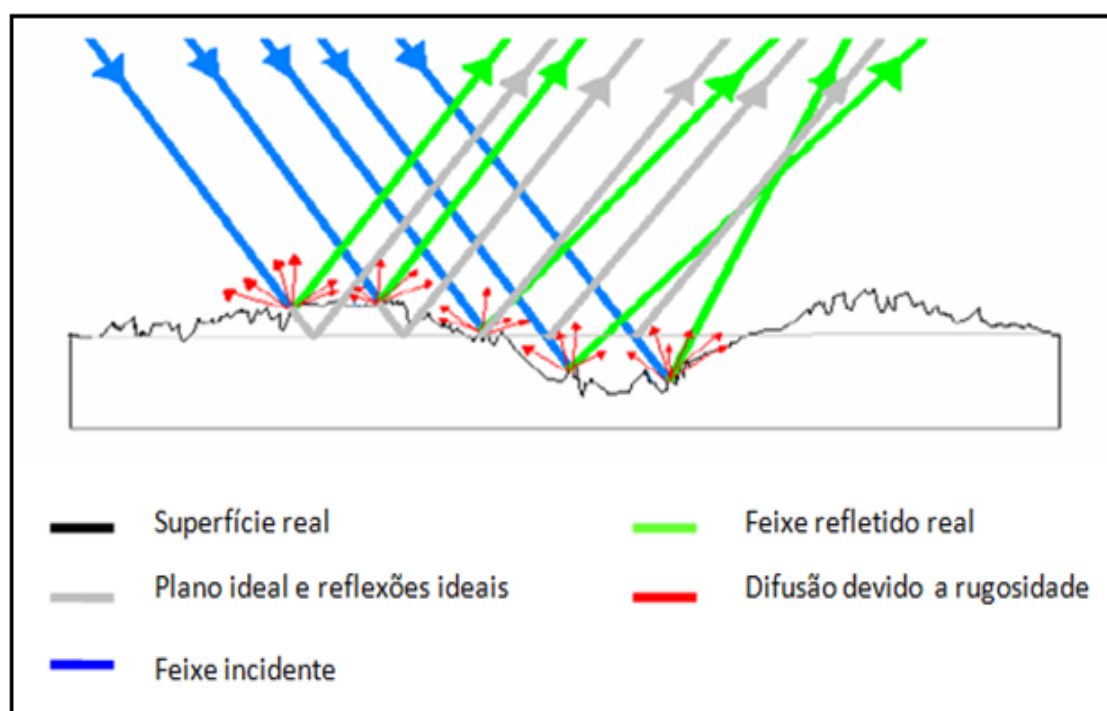


FIGURA 16 – REFLEXÃO DIFUSA
 FONTE: GAVINHO, 2005

2.3.5.3 Reflexão dupla e simples

No espelho o raio incidente será refletido sem sofrer mudanças em sua trajetória. Pode-se observar na Figura 17 que quando o material prateado encontra-se na parte posterior, o raio incidente sofre refração, fenômeno no qual a luz é transmitida para dentro do vidro, mudando de meio. Quando encontra o material prateado o raio sofre reflexão apresentando nova refração ao passar do vidro para o ar, esse fenômeno é denominado dupla reflexão (ALONSO E FINN, 1972; CORDINI,1991).

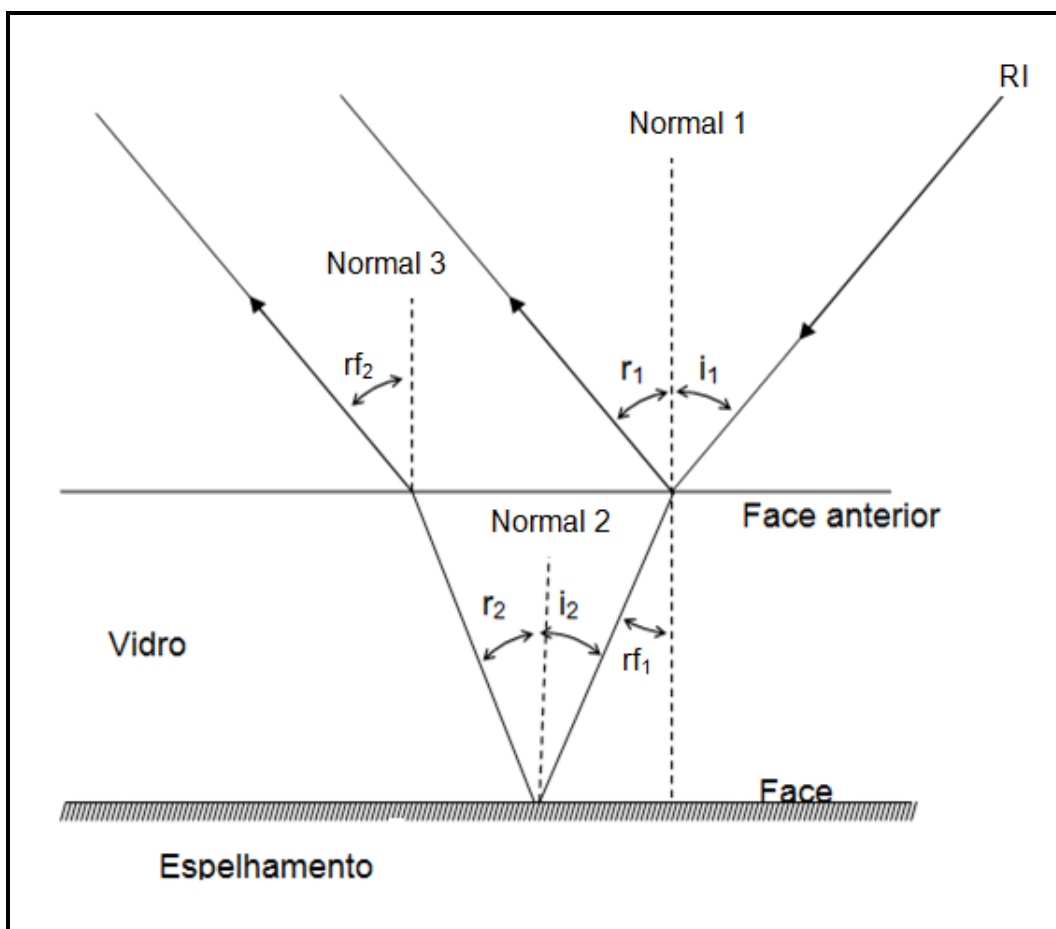


FIGURA 17 – DUPLA REFLEXÃO
ADAPTADO DE: CORDINI, 1991

Na Figura 17:

- i_1 – ângulo de incidência na face anterior;
- r_1 – ângulo de reflexão na face anterior;
- rf_1 – ângulo de refração na primeira refração;
- i_2 – ângulo de incidência na face posterior;
- r_2 – ângulo de reflexão na face posterior;
- rf_2 – ângulo de refração na segunda refração;
- RI – raio incidente.

Quando o espelhamento é frontal o raio incidente não sofre refração. Por esse motivo o espelho utilizado neste experimento tem essa característica, Figura 18.

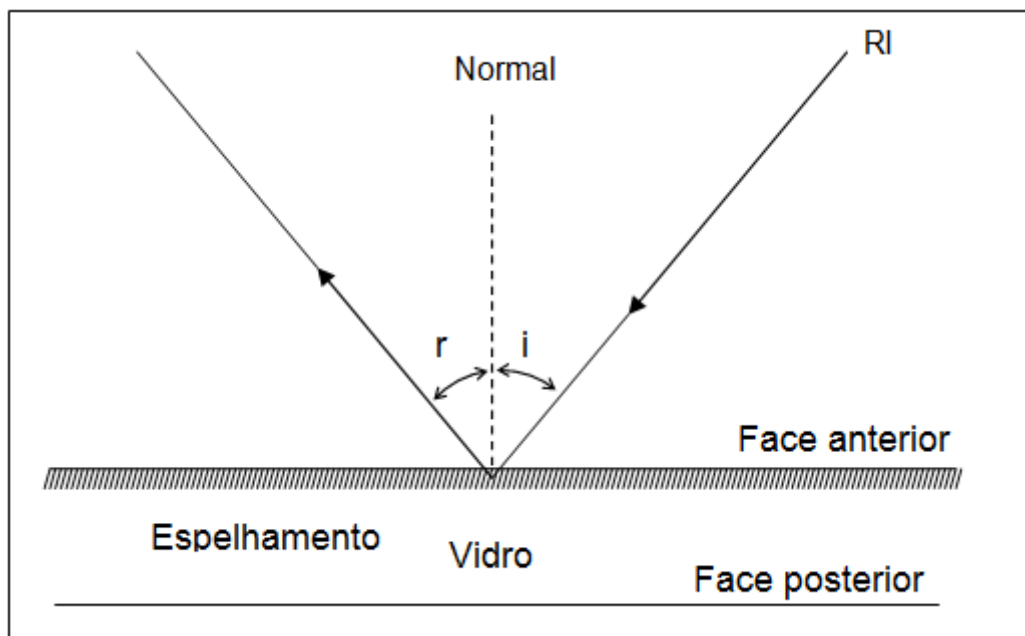


FIGURA 18 – REFLEXÃO COM ESPELHAMENTO FRONTAL
 FONTE: O autor

2.4 MEDIDA DE DISTÂNCIA

2.4.1 Interferômetria

O homem está sempre em busca de melhor precisão em mensurações, na ordem de nanômetros. Por isso, atualmente houve um aumento significativo na metrologia óptica que a qual, dentre diversas técnicas, utiliza a interferômetria de varredura de frequência (IVF), cuja definição é: o “fenômeno resultante da superposição de dois movimentos vibratórios da mesma frequência”, ou seja, é um fenômeno de duas ou mais ondas de mesma frequência, que possuem uma relação de fase constante no tempo provocando a distribuição estacionária da energia das ondas ao longo de direções, ou de superfícies, que se mantêm fixas no espaço. Esse fenômeno ocorre em qualquer tipo de onda, mecânica, acústica, eletromagnética, etc. Sendo especialmente importante com as ondas eletromagnéticas visíveis, por permitir a realização de medidas chamadas interferômetria (CABRAL E REBORDÃO, 2008; ONO, 2009).

Na IVF mede-se o valor absoluto da diferença de percurso óptico (DPO) entre os dois braços de um interferômetro de Michelson. Os interferômetros ópticos são equipamentos que permitem: a mensuração de comprimento e pequenas

alterações de comprimento; ensaios ópticos; estudos de estrutura de superfície; medições da distribuição de pressão e temperatura em fluxos de gás e de plasmas; medições de velocidades de partículas e amplitudes de vibrações entre outros (CABRAL e REDORDÃO, 2008; HORIHARAN, 1995).

As medições com interferômetros utilizam um arranjo óptico com dois ou mais feixes, que são emitidos da mesma fonte, porém com caminhos diferentes. São classificados como sendo de dois ou de múltiplos feixes. Também podem possuir um método diferente para a obtenção dos feixes, sendo que o mais comum é a utilização de um espelho de reflexão parcial. Os interferômetros mais conhecidos são: de Fizeau, Michelson e Mach-Zehnder (HORIHARAN, 1995).

2.4.1.1 Interferômetro de Michelson

O interferômetro de Michelson utiliza dois feixes que são obtidos pela reflexão parcial. Pode medir distâncias de até 100 m com resolução de 300 nm (SERWAY et al³, apud RESTIVO et al 2008)

O princípio consiste em, através de um espelho semi-prateado, dividir um feixe de luz emitido por uma fonte de luz “L” em dois com a mesma intensidade, Figura 19.

³ Serway, R. A., Faughn, J. S., Vuille, C. and Bennet, C. H., “College Physics”, Thomson Brooks/Cole, pp. 836-837, (2005)

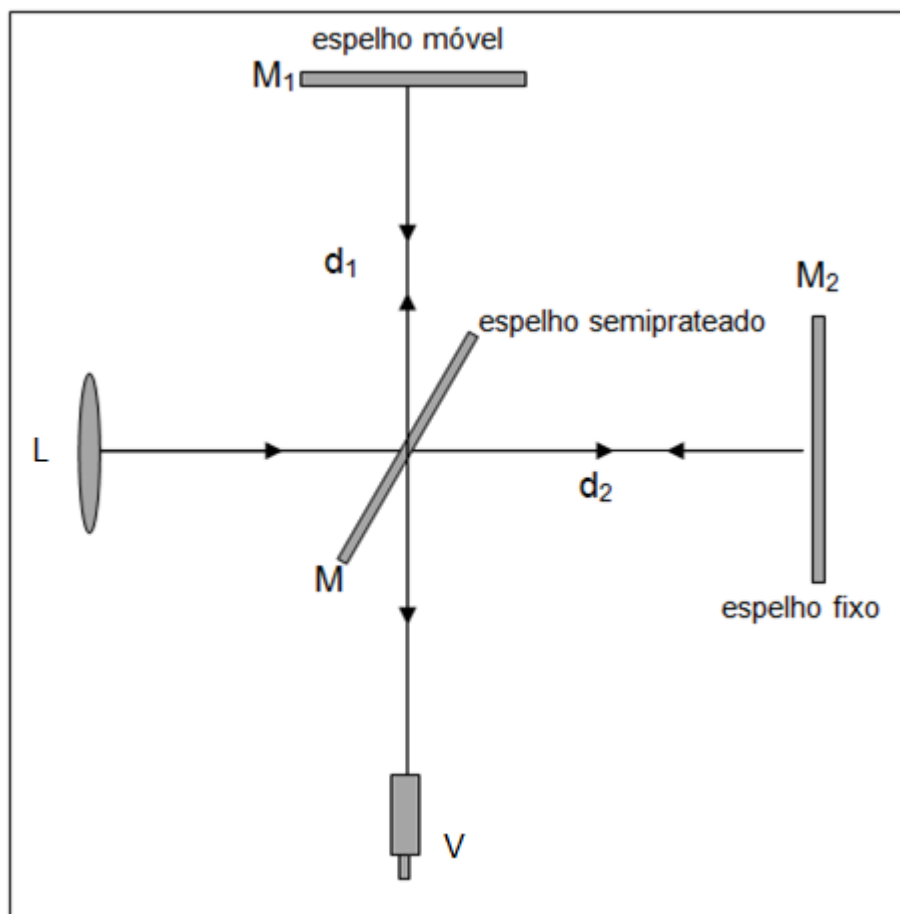


FIGURA 19 – INTERFERÔMETRO DE MICHELSON
 FONTE: GOLDEMBERG, 1973

A luz emitida pela fonte (L) incide no espelho semi-prateado (M), que a divide em dois feixes de mesma intensidade sendo que o primeiro segue em direção ao espelho móvel (M_1) e o segundo em direção ao espelho fixo (M_2). Esses dois feixes, que são coerentes por terem sido originados na mesma fonte, são observados na posição (V). Se os dois caminhos possuem comprimentos diferentes ($d_1 \neq d_2$) então haverá uma diferença de fase entre os dois feixes, com isso é possível determinar o deslocamento entre as partes (GOLDEMBERG, 1973).

2.4.1.2 Interferômetro de Fizeau

O interferômetro de Fizeau é utilizado para medir a qualidade óptica de componentes e sistemas. O princípio consiste em filtrar um sinal laser por uma objetiva microscópica e um pequeno orifício, Figura 20. Esse encontra-se no ponto focal das lentes de colimação. Entre as lentes e o orifício encontra-se um divisor de

feixes, onde parte é movida para a superfície refletora e o restante para a superfície a ser testada, retornando a origem com informações do teste ótico. As duas frentes de onda são recombinadas dentro do interferômetro e o divisor de feixes encaminha os feixes combinados para um sistema de gravação ou um monitor (NASA, 1999).

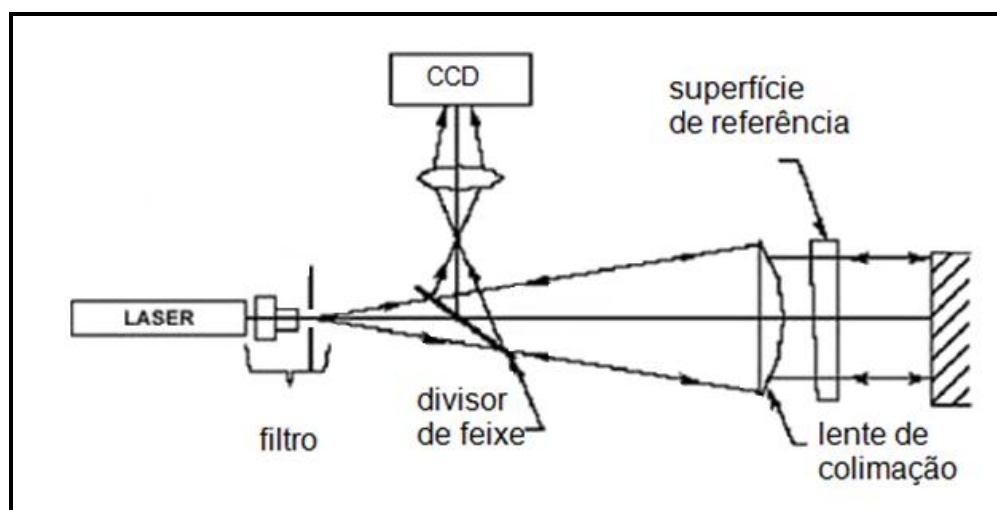


FIGURA 20 – INTERFERÔMETRO DE FIZEAU
FONTE: NASA, 1999

2.4.1.3 Interferômetro de March-Zehnder

O interferômetro de March-Zehnder apresenta o funcionamento similar ao interferômetro de Michelson. Na Figura 21 apresenta-se o funcionamento deste, em que a radiação proveniente da fonte “L” é colimada e dividida pelo divisor de feixes “DF₁”. Esses são refletidos pelos espelhos “M₁” e “M₂” em direção a outro divisor de feixes “DF₂”. O padrão de interferência é observado na saída 1 ou 2, variando a posição de um dos espelhos. A principal característica desse interferômetro é a possibilidade de mudar a posição de saída, fato esse importante em comunicações ópticas por possibilitar a alteração do tráfego do sinal, Figura 21.

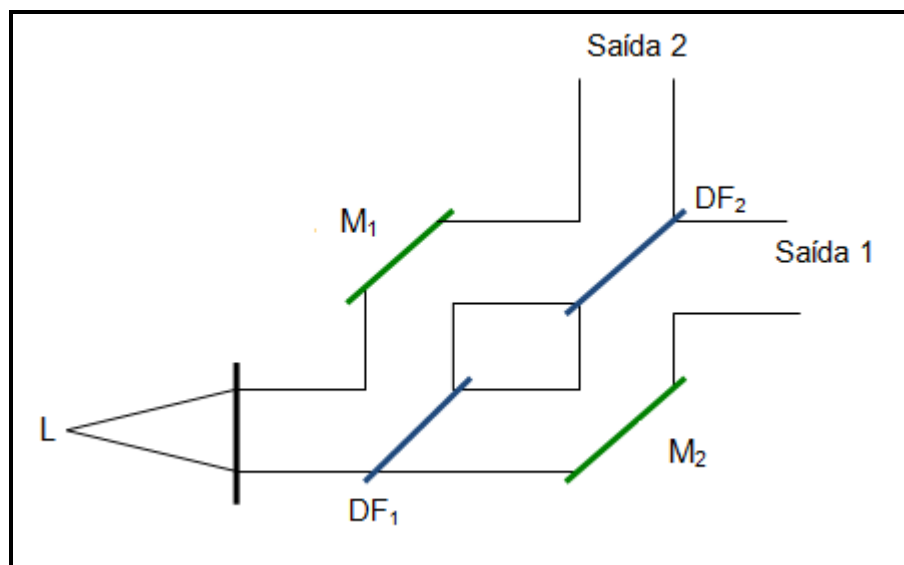


FIGURA 21 – INTERFERÔMETRO DE MACH-ZEHNDER
ADAPTADO DE: ZILO, 2007

2.4.2 Estação Total

Estação total é um equipamento constituído por um teodolito eletrônico (medida de direções horizontais e ângulos verticais), um distânciometro eletrônico (medida de distâncias) e um processador matemático (KAHMEN, 1988).

2.4.2.1 Medida angular

Aos leitores interessados em maiores detalhes sobre o fato recomenda-se Kahmen e Faig, 1988.

2.4.2.2 Distânciometro

Na Topografia e Geodésia uma das maiores dificuldades sempre foi a mensuração da distância com a precisão necessária. Em 1968, surgiu o primeiro distânciometro óptico-eletrônico, cujo princípio de funcionamento baseia-se no tempo e na velocidade que a onda eletromagnética leva para percorrer a distância a ser mensurada (FAGGION, 2001).

O sinal parte do emissor (MED) atinge o alvo ou refletor e retorna ao MED,

Figura 22. A distância é calculada utilizando-se a Equação (15) (RUEGER, 1996).

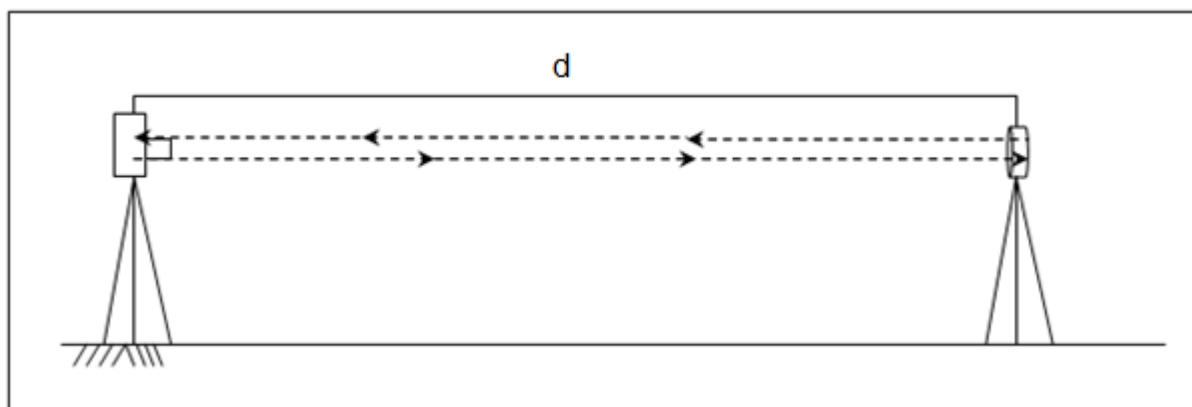


FIGURA 22 – PRINCÍPIO DA MEDIDA ELETRÔNICA DE DISTÂNCIA
 FONTE: O autor

$$2 \cdot d = v \cdot \Delta t \quad (15)$$

Onde:

v – velocidade de propagação da luz no meio;

d – distância entre o emissor e o refletor;

Δt – tempo de percurso, ida e volta, do sinal.

Por não ser possível determinar o valor de “ v ” em campo utiliza-se o valor da velocidade de propagação no vácuo e o índice de refração no meio “ n ”, sendo esse determinado em laboratório durante a fabricação do equipamento para um determinado comprimento de onda, temperatura e pressão atmosférica. Obtendo-se o “ c ” (velocidade de propagação da luz no vácuo) e “ n ” (índice de refração no meio) pode-se calcular a velocidade de propagação da onda eletromagnética no meio “ C ” utilizando-se a Equação (16).

$$C = \frac{c}{n} \quad (16)$$

Outro parâmetro necessário é o tempo de deslocamento do sinal. Extremamente difícil de obter tendo em vista a acuracidade necessária para se determinar distância com precisão milimétrica. Por exemplo, para se obter uma distância com precisão de 10 mm é necessário conhecer o tempo de deslocamento

do sinal na casa de 10^{-11} do segundo. Para contornar esse problema a solução encontrada foi relacionar a variação de tempo com a diferença de fase do sinal (FAGGION, 2001). Aos leitores interessados recomenda-se Faggion, 2001 e Rueger, 1996.

Os primeiros MED utilizam como portadoras uma onda eletromagnética na região do infravermelho. Com a evolução da microeletrônica esses equipamentos passaram a utilizar portadora na região do laser por ter inúmeras vantagens que serão vistas na sequência.

2.5 LASER

2.5.1 Conceitos fundamentais do *laser*

O nome laser é resultante do termo em inglês *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* – amplificação de luz por meio de emissão estimulada de radiação. Historicamente o laser é uma derivação do *maser*, que é um dispositivo similar ao *laser*, porém utilizava microondas no lugar da luz. Em 1950, Alfred Kastler desenvolveu um sistema de bombeamento ótico que usava radiação de frequência para iluminar os átomos. Essa técnica levou ao desenvolvimento do maser e posteriormente ao laser. Em 1958, Arthur H. Schawlow e Hard Towns estabeleceram o princípio do maser óptico que foi chamado de laser. Em 1960, Theodore Harold Maiman desenvolveu o primeiro, bem sucedido, laser baseado nesse princípio (HECHT, 1986; BARTHEM, 2005).

Atualmente o laser pode ser encontrado em diversas aplicações, tais como nas leitoras de CDs e códigos de barra, tratamentos dermatológicos, operações oftalmológicas, comunicação telefônica por fibra ótica e medida eletrônica de distância.

As principais características de seu feixe são: direcionalidade e reduzida largura espectral (menor que 1 nm); monocromático; coerente (as ondas de luz possuem sempre a mesma velocidade e força); intensidade (que é aumentada pelos átomos do meio ativo, permitindo possuir quilômetros de comprimento); colimada (pode percorrer uma longa distância sem um aumento significativo de seu diâmetro); só se afasta do paralelismo perfeito devido aos efeitos de difração determinados

pelo comprimento de onda e pelo diâmetro da abertura de saída. É precisamente focalizado, propriedade relacionada com o paralelismo do feixe (FRAZÃO, 2005; VICENTE e CASTRO, 2002).

2.5.2 Cavityde ressonante

A cavityde ressonante desempenha um papel fundamental no funcionamento do laser, por ser amplificador óptico que atua diretamente no feixe luminoso aumentando sua intensidade. Essa depende da distância percorrida dentro da cavityde ressonante, para tanto utilizam-se dois espelhos paralelos, podendo ser planos ou curvos, entre os quais a luz fica aprisionada como uma onda estacionária. O modo de vibração dentro da cavityde é definido pelo comprimento da cavityde e da velocidade da luz (no interior da mesma). Nessa câmara, os espelhos com níveis de reflexão diferentes estão posicionados em suas extremidades. Um dos espelhos é totalmente refletivo (100%) e o outro, parcialmente refletivo (menor que 95%). A diferença de capacidade de reflexão dos espelhos permite a saída da radiação de dentro da cavityde, formando o raio laser. Mesmo se fosse possível construir a cavityde perfeita, o feixe de luz possui uma espessura que proporciona uma divergência ao feixe tanto pelo cone de luz, relacionado à largura do feixe, como pela auto-difração do feixe por estar confinado a um pequeno diâmetro. Existem muitos tipos de cavityde ressonante dentre elas (BARTHEM, 2005; VICENTE e CASTRO, 2002; HECHT, 2002):

- quase plana (convexa);
- plana;
- quase plana (côncava);
- quase confocal.

O princípio de funcionamento baseia-se no fornecimento de energia que é absorvida pelos átomos do gás fazendo com que os últimos passem do estado fundamental para estados excitados. Cada átomo excitado retorna espontaneamente ao estado fundamental, emitindo um fóton com a energia em excesso e propagando-se numa direção arbitrária. Os fótons emitidos não têm entre

si qualquer relação de fase pelo fato da radiação de cada átomo ser independente dos demais gerando um feixe de luz incoerente (FRAZÃO, 2005).

Na Figura 23 apresenta-se um modelo de cavidade ressonante. Entre os dois espelhos (MM_1 e MM_2) situa-se o meio ativo constituído pelo tubo (TT) no qual existem as moléculas, podendo estar na forma gasosa, líquida ou sólida. A energia fornecida ao meio ativo varia dependendo do tipo de laser. Nesse exemplo a energia é fornecida por meio do bombeamento óptico promovido pela luz de energia $E=hf'$ de duas lâmpadas (R) que se encontram próximas ao tubo (TT).

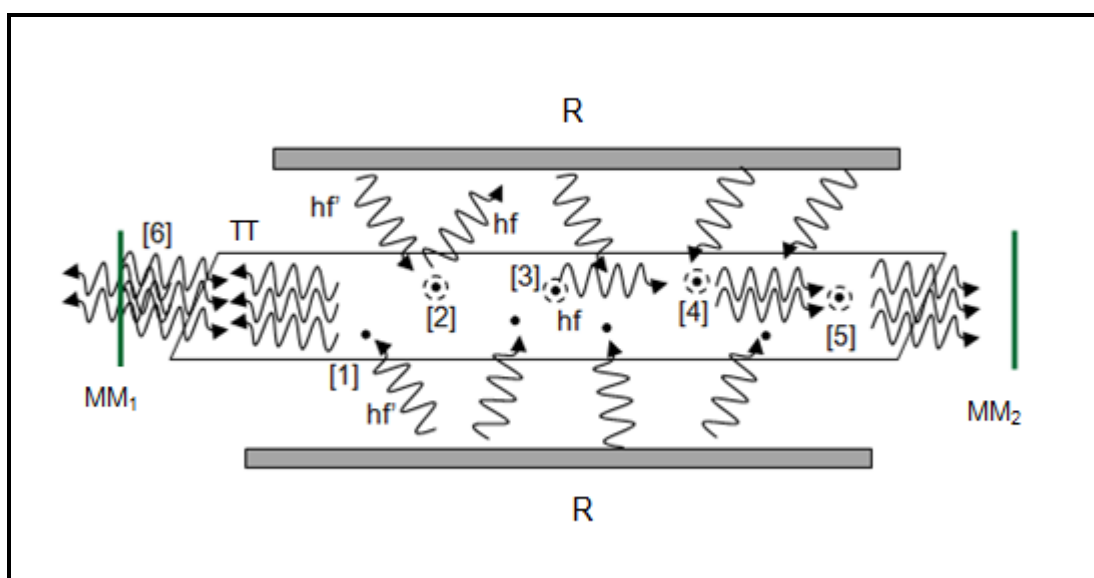


FIGURA 23 – CAVIDADE RESSONANTE
ADAPTADO DE: BARTHEM, 2005

Da Figura 23, pode-se observar que a molécula do meio ativo (TT) absorve o fóton com energia hf' fornecido pela luz (R) em [1]. Em [2], uma molécula que está no estado excitado decai (retornando ao estado normal), assim emite um fóton (hf), que nesse caso está direcionado para fora do meio ativo (T). Esse fóton (hf) emitido é contabilizado como perda para o laser. Em [3], um fóton (hf) é emitido na direção do eixo do meio ativo (T), esse ao passar por uma molécula excitada [4] induz seu decaimento. Com isto essa molécula emite um segundo fóton (hf) que possui a mesma direção e sentido do primeiro fóton, ambos oscilam com a mesma fase, repetindo o processo em [4] e [5]. Esses fótons ao atingir o espelho (E_2) são refletidos, retornando ao interior do meio ativo (T) e assim gerando novas emissões que amplificam a luz.

Ao chegar ao espelho (E_1) parte da radiação retorna para o interior da

cavidade e parte sai, dando origem ao feixe de luz emitido pelo laser. Se nenhuma luz saísse da cavidade após um determinado tempo todos os fótons emitidos teriam a mesma energia do primeiro, propagando-se na mesma direção e com mesma fase. Isso se chama de coerência (BARTHEM, 2005). O laser segundo o sistema de bombeio pode ser: pulsado ou contínuo.

No laser pulsado a fonte de bombeio é um disparo de uma lâmpada flash ou uma descarga elétrica. O meio ativo só é alimentado por um período de tempo curto, logo o número de passagens dentro da cavidade é pequeno, sendo assim o espelho de saída não deve possuir uma refletividade muito grande. O tempo de duração do pulso pode ser diminuído através de um processo de controle de ganho na cavidade gerando pulsos da ordem de alguns nanossegundos de duração. Esses concentram muita energia atingindo potências como 1GW (10^9 watts), possuindo pouca resolução espectral (BARTHEM, 2005).

O laser contínuo possui uma alta resolução espectral com $\delta\lambda < 10^{-15}$ m ($\delta f < 1$ MHz), uma coerência grande e seu feixe possui um forte paralelismo. O meio amplificador pode ser entre outros (BARTHEM, 2005; HECHT, 2002):

- gasoso – laser de HeNe;
- líquido - laser de corante;
- sólido - laser de rubi;
- semicondutor - laser de GaAs;
- químicos – laser de fluoreto de deutério – dióxido de carbono DF-CO₂.

O meio ativo dos primeiros lasers é um pequeno cristal sintético de rubi rosa pálido – Al₂O₃ com cerca de 0,05% de Cr₂O₃. É ainda utilizado como meio ativo de muitos lasers sólidos. As faces desse são paralelas entre si, perpendiculares ao eixo da cavidade ressonante, bem polidas e espelhadas sendo que uma das faces parcialmente espelhada de modo a constituir a cavidade ressonante (HECHT, 2002), Figura 24.

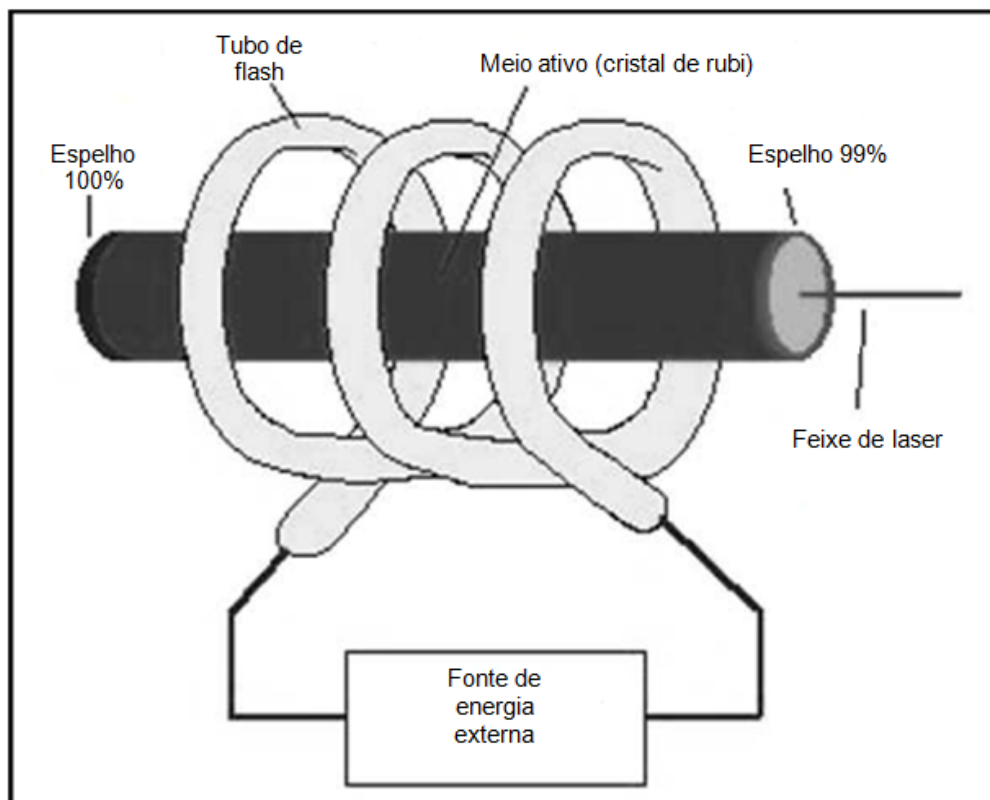


FIGURA 24 – LASER DE CRISTAL
FONTE: SCHIEL, 2009

A emissão de fótons também pode ser desencadeada por emissão estimulada, sendo esses os responsáveis pelo funcionamento do laser e possuindo a mesma fase, polarização, energia e direção de propagação do fóton estimulante. O fóton emitido adiciona-se de maneira coerente ao fóton incidente gerando um processo em cadeia que produz o aumento da radiação luminosa. O Quadro 2 apresenta exemplos de laser na faixa visível, infravermelha e também na faixa ultravioleta (HALLIDAY, RESNIECK E MERRILL, 1995; BARTHEM, 2005).

Faixa	Tipo	Meio	λ (nm)	Radiação
UV	<i>KrCl:Excímero</i>	GS	222	PS
	<i>KrF:Excímero</i>	GS	248	PS
	<i>XeCl:Excímero</i>	GS	308	PS
	<i>HeCd</i>	GS	325,0	CT
	N_2	GS	337,1	PS
	<i>Kr</i>	GS	350,7 e 356,4	CT
	<i>XeF:Excímero</i>	GS	351	PS
	<i>Ar</i>	GS	351,1 e 363,8	CT / PS
VS	<i>HeCd</i>	GS	441,6 e 537,8	CT
	<i>Ar</i>	GS	457,9 e 514,5	CT / PS
	<i>Kr</i>	GS	461,9 e 676,4	CT / PS
	<i>Xe</i>	GS	460,3 e 627,1	CT
	<i>ArKr</i>	GS	467,5 e 676,4	CT
	<i>Cu: vapor</i>	GS	511 e 518	PS
	<i>GaP: GaAs</i>	SL (diodo)	550 a 560	CT / PS
	<i>Rodamina 6G</i>	LQ	570 a 610	CT / PS
	<i>HeNe</i>	GS	632,8	CT
	$Al_2O_3: Ti$	SL	660 a 1050	CT / PS
	$Al_2O_3: Cr$ (rubí)	SL	694,3	PS
IN	<i>Kr</i>	GS	753 e 799	CT
	<i>GaAlAs</i>	SL (diodo)	850	CT
	<i>GaInAsP</i>	SL (diodo)	900 a 1 700	CT / PS
	<i>GaAs</i>	SL (diodo)	904	CT
	<i>Nd</i>	SL (vidro)	1 064	PS
	<i>Nd</i>	S (YAG)	1 064	CT / PS
	<i>HeNe</i>	GS	1150 e 3 390	CT
	<i>HF, DF</i>	GS	2 600 a 4 000	PS
	CO_2	GS	10 600	CT / PS
	H_2O	GS	1 180 000	CT / PS
	<i>HCN</i>	GS	337 000	CT / PS

QUADRO 2 – TIPOS DE LASER
 FONTE: BARTHEM, 2005

Sendo:

- PS – pulsada
- CT – contínua
- UV – ultravioleta
- VS – visível
- IN – invisível
- I V – infravermelho
- GS – gás
- SL – sólido
- LQ – líquido

Como pode ser visto na tabela acima, o laser invisível é compreendido entre os comprimentos de onda: $180 \text{ nm} \leq \lambda \leq 400 \text{ nm}$ e $710 \text{ nm} < \lambda \leq 1,0 \cdot 10^6 \text{ nm}$ e visível em comprimentos de onda maior que 400 nm e menor ou igual a 710 nm. No Quadro 3 apresentam-se alguns lasers usados em equipamentos topográficos e geodésicos, sendo o meio ativo desses de GaAs.

E.Total	Laser					
	Divergência Feixe	Duração Impulso	Frequência modulação	Potência Máxima Saída	Comprimento Onda	
Leica TC403 L	2,5 mrad	10 ns		200 μ W		IN
Trimble .Zeiss Elta S	2 mrad	10 ns		0,22 mW	850 nm	IN
Trimble 3300 sem prisma	0,4 mrad		300 MHz	1mW	660 nm	
Trimble 3300 com prisma	0,4 mrad		300 MHz	10 μ W	660 nm	
Leica TPS 1200 com prisma			100 MHz		780 nm	
Leica TPS 1200 sem prisma R100			100 MHz			VS
Leica TPS 1200 sem prisma R300			100MHz – 150MHz			VS

QUADRO 3 – LASERS UTILIZADOS EM EQUIPAMENTOS TOPOGRÁFICOS
 FONTE: LEICA TC403L, 1998; TRIMBLE 3300, 2001; TRIMBLE ZEISS, 2001; LEICA TPS 1200, 2004

Onde:

IN– invisível;

VS – visível.

2.5.2.1 Laser HeNe

O laser HeNe foi utilizado em alguns equipamentos com portadora laser empregados na topografia e geodésia. Esse necessita de uma cavidade ressonante longa, aproximadamente 30cm com 2mm de diâmetro. Inicialmente a excitação afeta somente os átomos de Hélio que colidem com o Neônio, transferindo energia a esses e conseqüentemente os excitando. Esse laser é emitido no fase do vermelho e do infravermelho com um comprimento de onda de 632,8 nm, e potência de saída que varia entre 1mW e 10mW, com um feixe coerente, monocromático com alta densidade e pequena divergência (MEYER-ARENDT, 1995; RUEGER, 1996).

2.5.2.2 Laser GaAlAs

O grau de coerência desse laser depende da sua estrutura e modo de operação. Seu comprimento de onda está entre 800 e 950 nm a potência de saída pode ser de até 30W. Esse possui menor temperatura, maior linearidade da energia de saída versus a característica da corrente de entrada, menor custo, menor degradação, permite operar em alta temperatura (RUEGER, 1996).

2.6 SISTEMA DE COORDENADAS

Define-se sistema coordenado como “uma relação de regras que especifica univocamente a posição de cada ponto do espaço através de um conjunto ordenado de números reais denominados coordenadas”. Na Figura 25 o ponto “P” é representado pelas coordenadas (x_P, y_P, z_P) , ou seja a projeção da reta \overline{OP} sobre os eixos X, Y e Z (CASTAÑEDA, 1986).

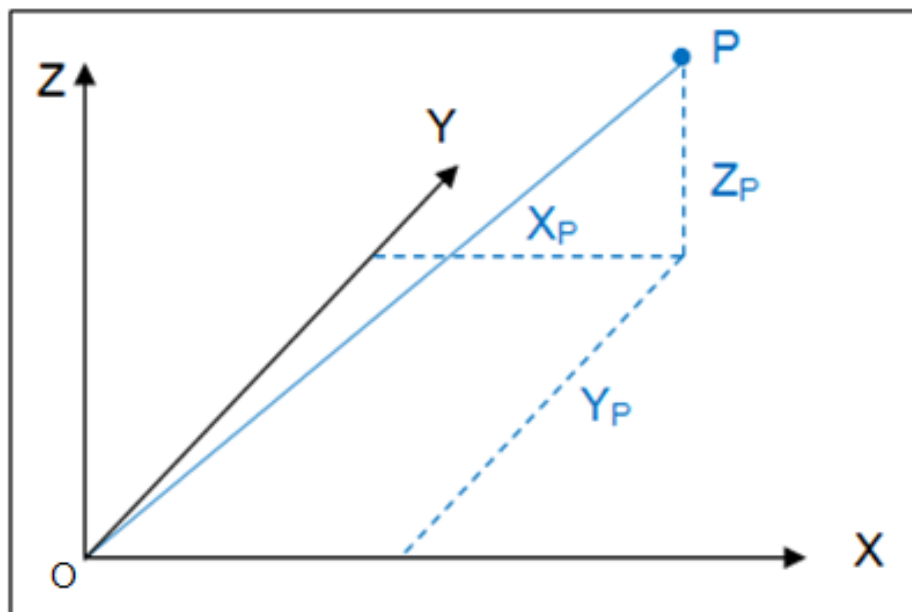


FIGURA 25 – SISTEMA CARTESIANO DEXTRÓGIRO
FONTE: O autor

2.7 DETERMINAÇÃO DE COORDENADAS TRIDIMENSIONAIS

Para determinar as coordenadas tridimensionais de um ponto é necessário medir a direção horizontal entre as estações consideradas, transformar essas direções em orientações (rumo ou azimuth), distância zenital e a distância inclinada.

Na Figura 26 mostra-se um ponto P, cujas coordenadas tridimensionais são determinadas a partir da mensuração da direção horizontal, entre o ponto P e o eixo Y (H_{z_p}), da distância zenital (Z_p) e da distância inclinada (d_i).

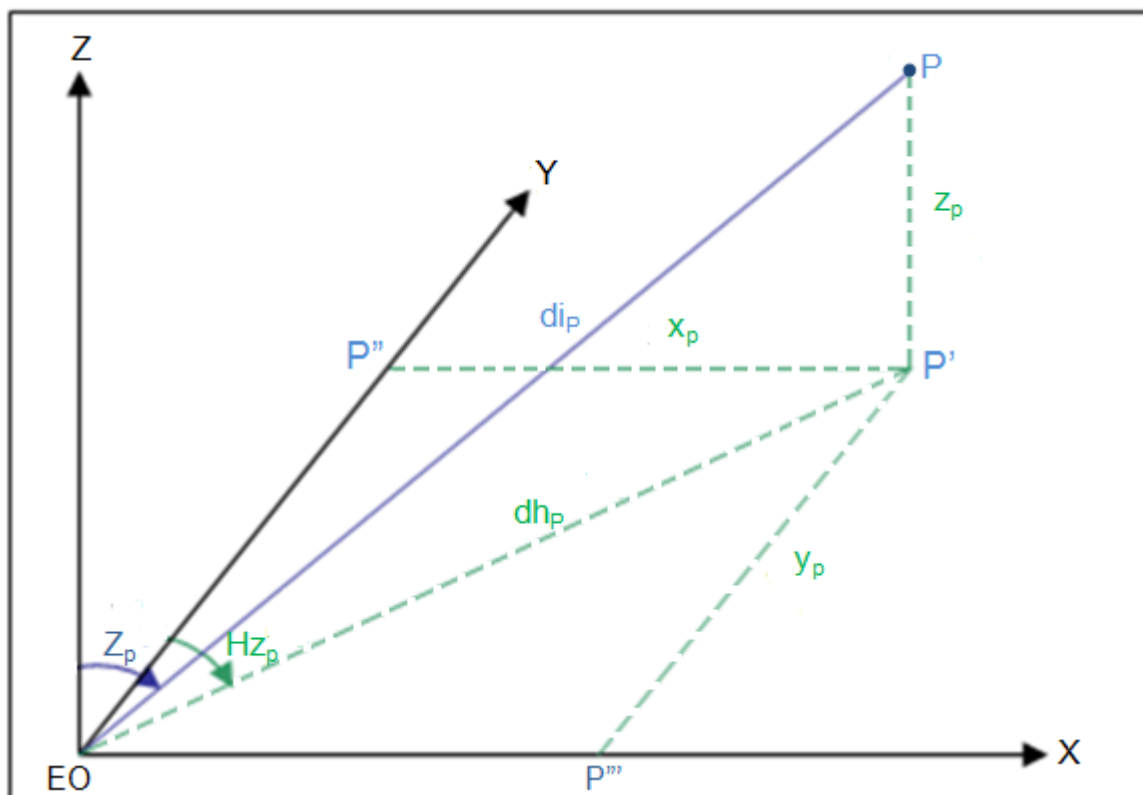


FIGURA 26 – COORDENADAS CARTESIANAS DE UM PONTO P
 FONTE: O autor

Onde:

- Z_p – distância zenital do ponto P;
- HZ_p – direção horizontal do ponto P;
- dh_p – distância horizontal do ponto P;
- x_p, y_p, z_p – coordenadas do ponto P;
- di_p – distância inclinada do ponto P.

Do triângulo $\widehat{PP'O}$ retângulo em P':

$$\text{sen}(90 - Z_p) = \frac{z_p}{di_p} \quad (17)$$

ou,

$$\text{cos}(Z_p) = \frac{z_p}{di_p} \quad (18)$$

∴

$$z_p = di_p \cdot \cos(Z_p) \quad (19)$$

Da Figura 26,

$$dh_p = di_p \cdot \text{sen}(Z_p) \quad (20)$$

Do triângulo $\widehat{P'P''O}$ retângulo em P'':

$$\text{sen}(Hz_p) = \frac{x_p}{dh_p} \quad (21)$$

∴

$$x_p = dh_p \cdot \text{sen}(Hz_p) \quad (22)$$

Substituindo a equação (20) na (22), tem-se:

$$x_p = di_p \cdot \text{sen}(Z_p) \cdot \text{sen}(Hz_p) \quad (23)$$

Ainda do triângulo $\widehat{P'P''O}$:

$$\cos(Hz_p) = \frac{y_p}{dh_p} \quad (24)$$

∴

$$y_p = dh_p \cdot \cos(Hz_p) \quad (25)$$

Substituindo a equação (20) na (25), tem-se.

$$y_p = di_p \cdot \text{sen}(Z_p) \cdot \cos(Hz_p) \quad (26)$$

A partir dessas informações é possível determinar coordenadas de pontos de interesse utilizando as equações (19), (23) e (26).

3 MÉTODO

Em pesquisas realizadas na literatura nacional e internacional existem alguns experimentos para determinação de coordenadas de pontos inacessíveis visualmente utilizando técnicas topográficas e geodésicas. Baseando-se nisso, desenvolveu-se uma metodologia para a solução desse problema, utilizando espelho e estação total.

O método consiste em utilizar um espelho para desviar a visada da estação total e com isso determinar as coordenadas do ponto de interesse. Na Figura 27 mostram-se esquematicamente o posicionamento da estação total, da mira horizontal de invar e do espelho no momento do levantamento dos dados. Nela pode-se observar um obstáculo entre a estação total e a mira.

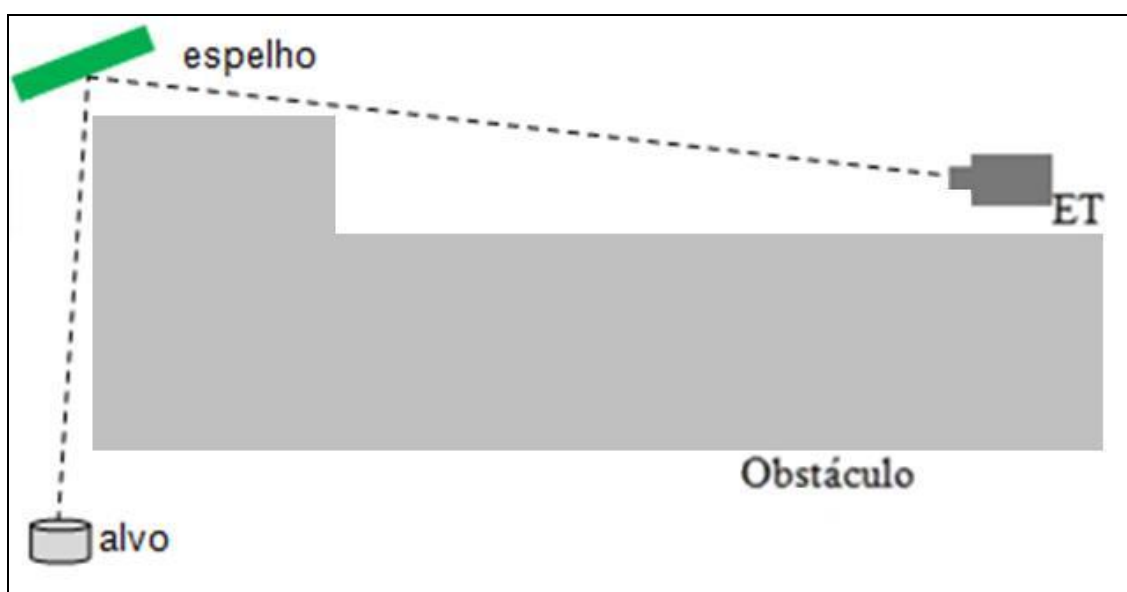


FIGURA 27 – VISTA EM PLANTA DO LEVANTAMENTO
FONTE: O autor

Para viabilizar esse projeto foi necessário desenvolver alguns equipamentos.

3.1 ESPELHO

O espelho utilizado nesse trabalho pertence ao Laboratório de Instrumentação Geodésica – LAIG. Nesse espelho o metal prateado é espalhado sobre uma base de cristal, na parte frontal desta, Figura 28.

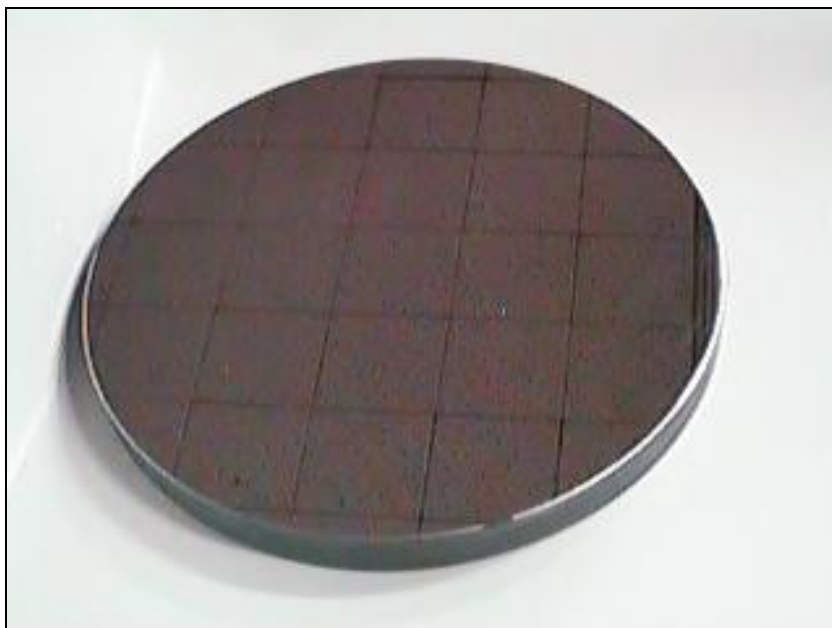


FIGURA 28 – ESPELHO UTILIZADO NOS EXPERIMENTOS

3.2 REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS

No decorrer do trabalho foram realizados diversos experimentos, sempre em busca de uma solução viável, a seguir serão apresentados os testes desenvolvidos.

3.2.1 Experimento 1

No primeiro experimento realizado foi utilizado o suporte do espelho que existe no Laboratório de Instrumentação Geodésica. Esse suporte é fixado em uma placa metálica que está presa na parede do corredor, em frente ao laboratório. Na Figura 29 mostra-se o espelho fixado nesse suporte.



FIGURA 29 – PRIMEIRO SUPORTE DO ESPELHO

Para calcular as coordenadas tridimensionais de pontos de forma indireta, ou seja, através do espelho, é necessário determinar sua atitude no espaço. Para tanto, é preciso conhecer três pontos na superfície do espelho, definindo dessa forma o plano. Na determinação desse plano foram levantados três pontos da superfície do espelho, medindo-se as direções horizontais, distâncias zenitais e distância inclinadas. O primeiro ponto levantado foi no canto superior esquerdo do espelho (esquerda do operador da estação total). Para o segundo ponto foi fixado o movimento vertical da estação total e a luneta foi movimentada até o canto superior direito, onde foram realizadas as medições dos ângulos e distâncias. Para o terceiro ponto fixou-se o movimento horizontal e a luneta foi movimentada até o canto inferior direito onde novamente foram realizadas as medições.

A ideia inicial foi de determinar esses ângulos de inclinação do espelho utilizando a trigonometria. Nesse experimento a estação total e o alvo estavam posicionados a aproximadamente 2 metros do espelho. Na Figura 30 mostra-se a posição ocupada pelo espelho, estação total e o alvo.



FIGURA 30 – POSICIONAMENTO DO ESPELHO, ESTAÇÃO TOTAL E ALVO NO EXPERIMENTO 1

Após realizar os testes, observou-se a necessidade de gravar alvos no suporte do espelho, buscando não danificar a superfície do mesmo.

3.2.2 Experimento 2

Esse experimento possui uma modelagem semelhante a do anterior, porém foram gravados alvos no suporte do espelho, para determinar a posição desse no espaço, Figura 31.



FIGURA 31 – ALVOS DO SUPORTE DO ESPELHO

Essa configuração também não apresentou resultados satisfatórios, em função da dificuldade da verticalização do espelho, mesmo utilizando um nível de cantoneira e da instabilidade do suporte do espelho utilizado. Na Figura 32 mostra-se o espelho sendo posicionado na vertical.

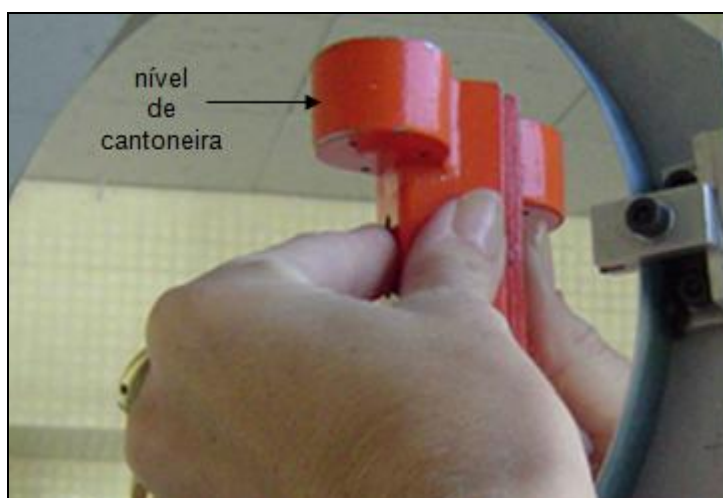


FIGURA 32 – ESPELHO POSICIONADO NA VERTICAL

3.2.3 Experimento 3

Neste, o suporte do espelho foi posicionado sobre um bancada, no interior do Laboratório de Instrumentação Geodésica, buscando maior estabilidade. Outro teste realizado foi reduzir a área de visada no espelho, para isso foi colocado sobre ele um anteparo de papel, com um círculo vazado no centro, Figura 33.

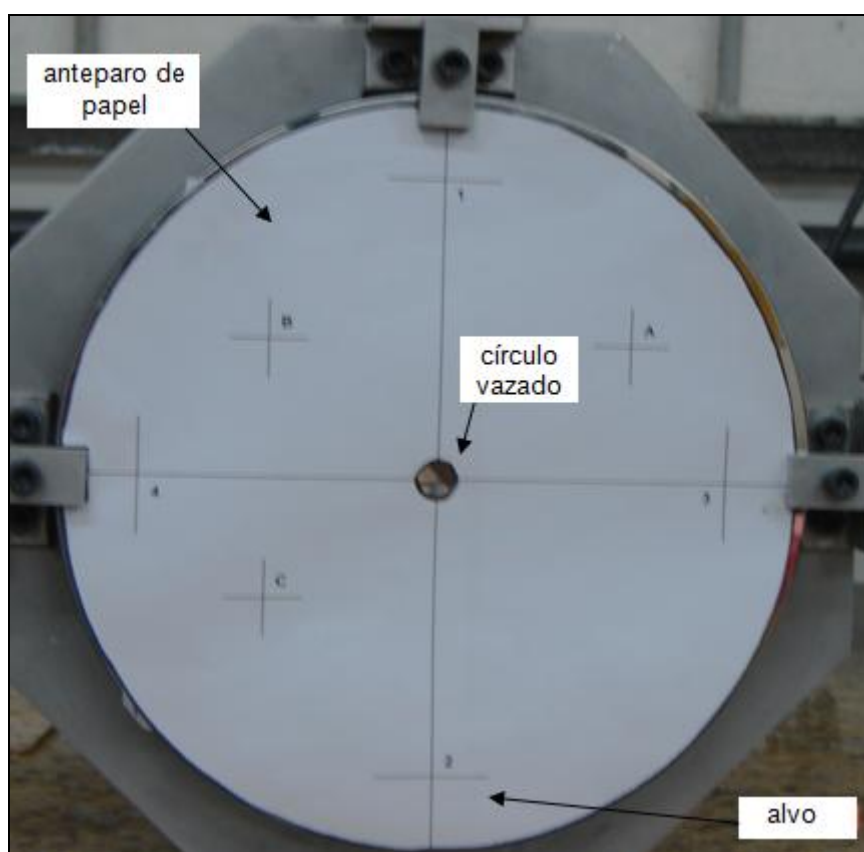


FIGURA 33 – ANTEPARO DE PAPEL SOBRE O ESPELHO

3.2.4 Experimento 4

Buscando aumentar a precisão no deslocamento horizontal e vertical do espelho, construiu-se um suporte para adaptar o espelho na objetiva do teodolito. Com isso, foi possível utilizar o movimento micrométrico do teodolito para realizar pequenos movimentos no espelho, Figura 34.

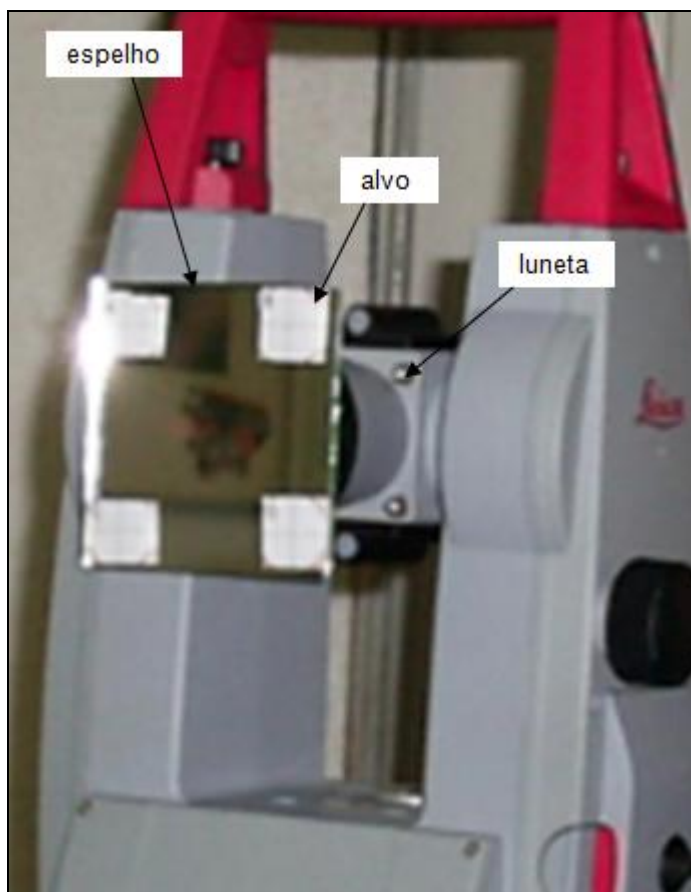


FIGURA 34 – ESPELHO ACLOPADO NA LUNETEA DA ESTAÇÃO TOTAL

Todos os testes citados demonstraram a necessidade de construção de um suporte com maior rigidez, pois pequenos movimentos horizontais e verticais no espelho, buscando desviar a visada para atingir outro alvo mudavam a posição da superfície refletora perdendo a configuração adotada no início do experimento. Em função disso, desenvolveu-se um suporte para o espelho que atendesse as necessidades de rigidez e permitisse pequenos movimentos horizontais e verticais.

3.3 SUPORTE DO ESPELHO

Nos levantamentos iniciais foi utilizado um suporte, para o espelho, pertencente ao Laboratório de Instrumentação Geodésica. Esse suporte foi desenvolvido para a determinação do erro cíclico em estações totais (Faggion, 2001).

Na sequência dos levantamentos foi necessário desenvolver um projeto de uma estrutura rígida que permitisse a fixação do espelho em um tripé. Para tanto, foram realizados diversos estudos e discussões para determinar quais características seriam essenciais para permitir a varredura de grandes áreas sem retirar o tripé do lugar.

O projeto do suporte do espelho foi concebido permitindo movimentos horizontais e verticais, e com isso viabilizando o levantamento de objetos maiores, simplesmente rotacionando o conjunto, no sentido horizontal ou vertical, dependendo da necessidade.

O suporte possui duas características necessárias para o desenvolvimento do método (Figura 35):

- fixação do suporte do espelho num tripé, utilizando uma base nivelante e um adaptador com parafuso de rosca;
- permitir o movimento vertical e horizontal do espelho.



FIGURA 35 – SUPORTE DO ESPELHO

3.4 ALVOS GRAVADOS NA SUPERFÍCIE DO ESPELHO

Foram gravados quatro alvos diretamente no espelho (E1, E2, E3 e E4), dispostos próximos as bordas, com uma distância aproximadamente igual entre eles, permitindo posicionar o espelho espacialmente, ou seja, determinar a posição do plano do espelho no espaço.

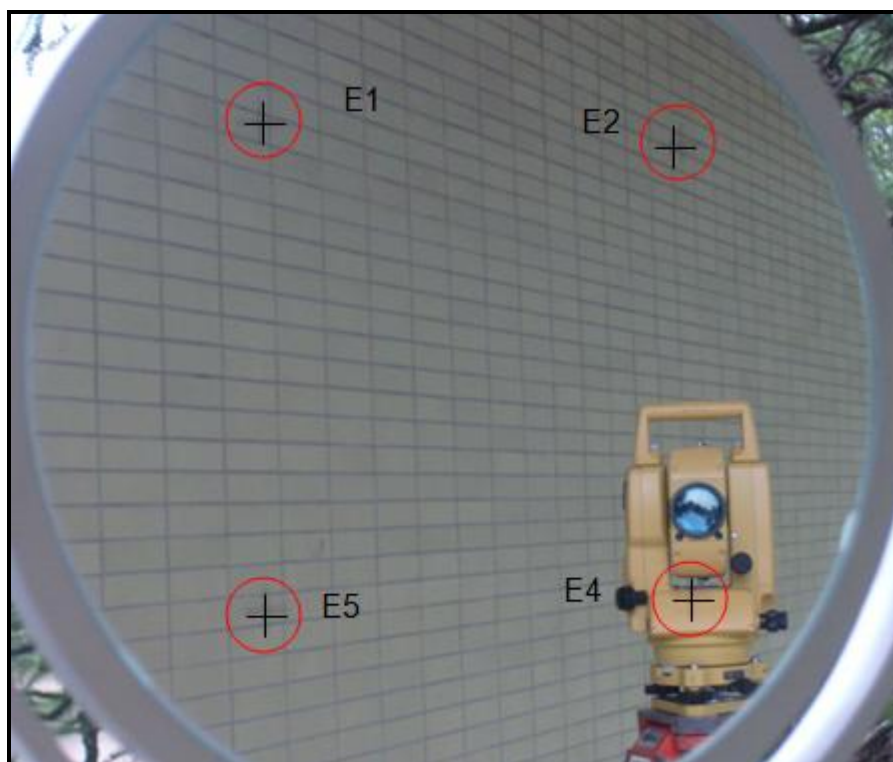


FIGURA 36 – ALVOS GRAVADOS NO ESPELHO

Utilizando interferômetro laser do LAIG realizou-se a calibração⁴, ou seja, a determinação do afastamento entre os alvos com precisão micrométrica. No processo de calibração o espelho foi posicionado no interferômetro de maneira a permitir a medida da distância entre dois alvos. Esse processo foi repetido até que a medição entre todos os alvos fossem realizadas. Na Figura 37, mostra-se o espelho posicionado na base do interferômetro durante o processo de calibração.

⁴ “Calibração: conjunto de operações que estabelece, em condições específicas, a correlação entre valores de quantidades indicados por um instrumento de medida, ou sistema de medida, ou uma medida materializada e os valores convencionais da grandeza medida. Obs.: 1) o resultado de uma calibração permite determinar os valores das medidas indicadas ou as correlações relativas aos valores indicados; 2) uma calibração também pode determinar outras propriedades metrológicas como, por exemplo, a influência da aplicação das correções da medição” ISBN, 1993 apud FAGGION, 2001 ISBN.....

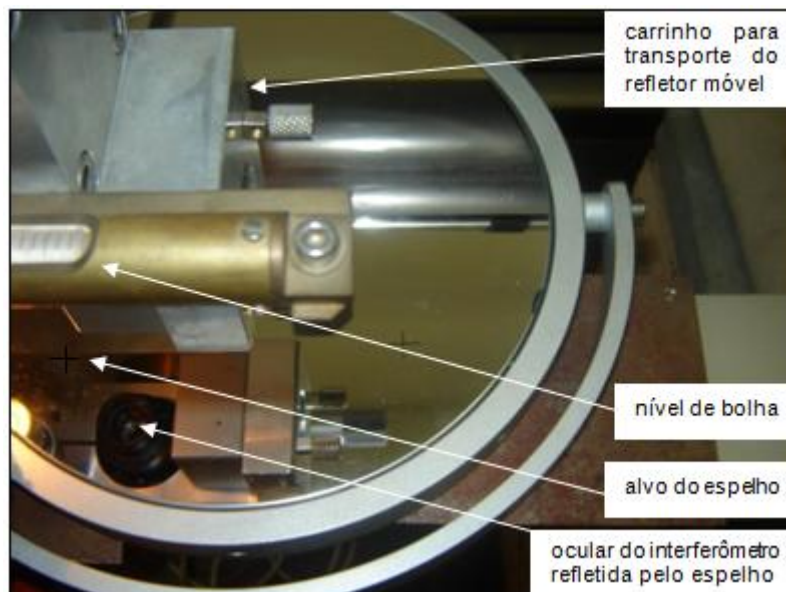


FIGURA 37 – DETERMINAÇÃO DO AFASTAMENTO ENTRE OS ALVOS DO ESPELHO

Na Figura 38 mostra-se a imagem através da ocular do interferômetro no momento da medição da distância diagonal entre os alvos E1 e E4 do espelho.

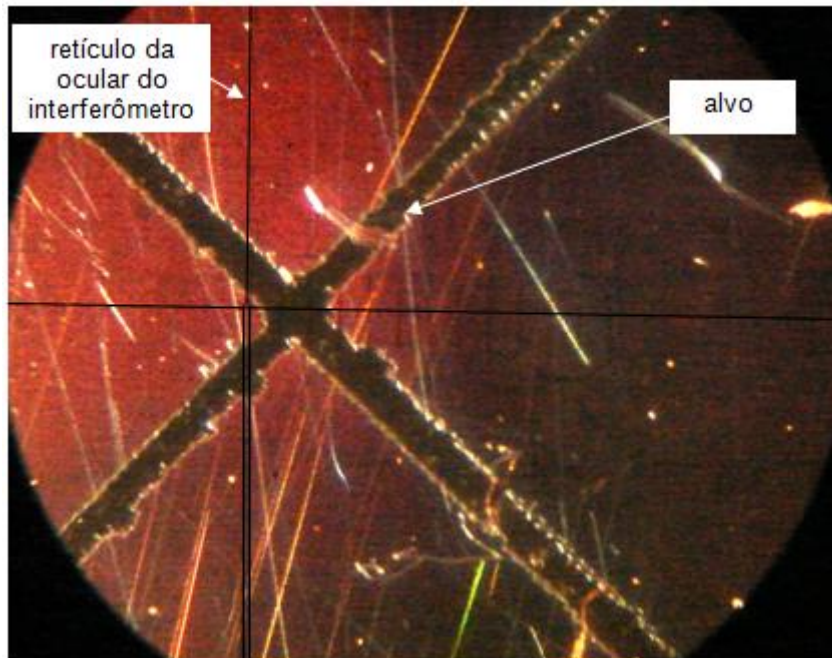


FIGURA 38 – SOBREPOSIÇÃO DO RETÍCULO DA OCULAR DO INTERFERÔMETRO COM O ALVO DO ESPELHO

Observando a Figura 38 percebe-se que o alvo possui uma espessura maior que o fio do retículo do interferômetro. Por esse motivo optou-se em fazer uma

leitura à direita e outra à esquerda, calculando a média para obter o centro do alvo. Na Figura 39 demonstra-se uma pontaria à esquerda do alvo.

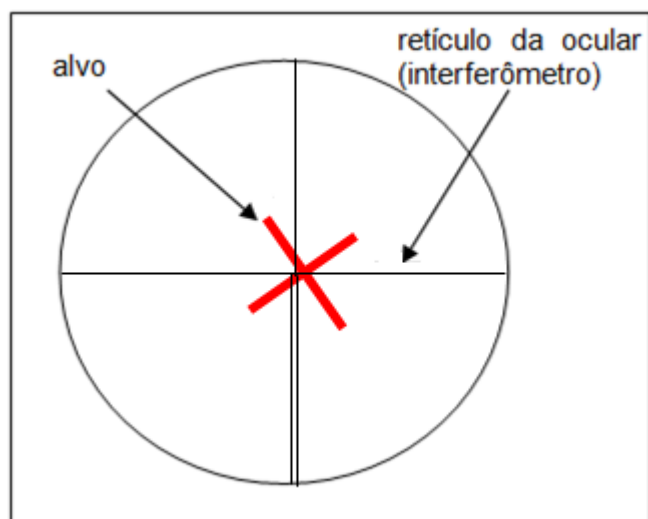


FIGURA 39 – LEITURA DO ALVO
FONTE: O autor

Para determinar a posição do espelho, no espaço, é necessário medir as direções horizontais, distâncias zenitais e as distâncias inclinadas dos alvos de referência gravados no espelho. Quando da realização do experimento um problema encontrado foi determinar a distância estação total e os quatro alvos gravados no espelho, uma vez que o espelho tem reflexão especular. Para contornar o problema e obter retorno do sinal de medida da distância, foi necessário fixar no espelho, em torno dos alvos, sem cobrir suas linhas, um material que permitisse reflexão difusa e com isso a determinação das distâncias. O material utilizado foram etiquetas adesivas na cor branca, Figura 40.

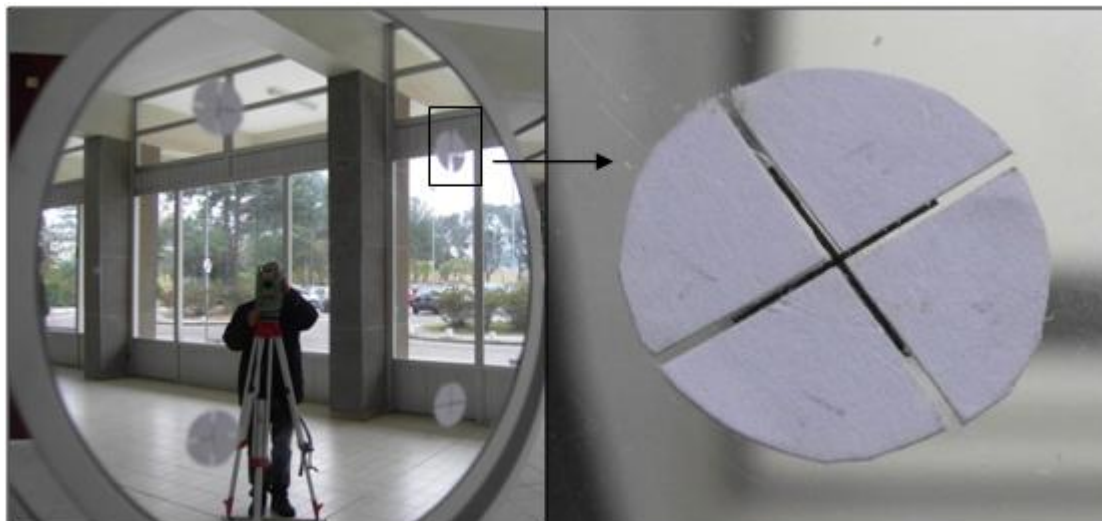


FIGURA 40 – ALVO GRAVADO NO ESPELHO

3.5 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS LEVANTAMENTOS

Os pontos foram materializados fixando alvos em uma mira horizontal de ínvar, previamente calibrada no LAIG.

3.5.1 Mira horizontal de ínvar

A mira horizontal de ínvar, apresentada na Figura 41, possui comprimento nominal de 2 m e é utilizada na determinação da distância horizontal indireta entre duas estações (NADAL, 2000).



FIGURA 41 – MIRA HORIZONTAL DE ÍNVAR

Para a determinação da distância horizontal entre dois pontos utilizando-se a mira horizontal de ínvar é necessário medir o ângulo paralático entre os dois alvos da mira. Na Figura 42, mostra-se a estação ocupada pelo teodolito (G), os dois alvos da mira horizontal de ínvar (MA e MB), a distância horizontal que deseja-se calcular (d) e o ângulo paralático (ϕ).

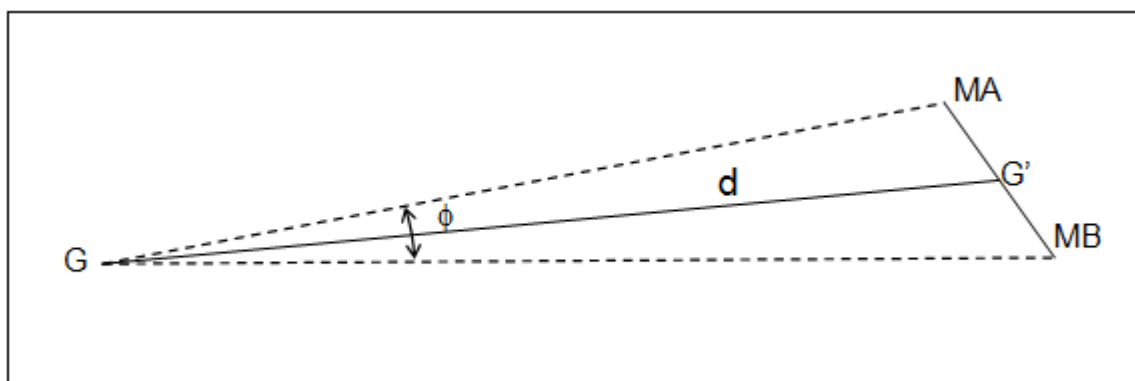


FIGURA 42 – ÂNGULO PARALÁTICO
 FONTE: CORDINI, 2009

Para a determinação da distância horizontal (d), instala-se o tripé em que a mira horizontal de ínvar está fixa em uma das extremidades da distância que pretende-se calcular e na outra extremidade instala-se o teodolito. Mede-se o ângulo paralático (ϕ), sabendo-se que o comprimento nominal da mira é de 2m e com a

Equação (27) calcula-se a distância horizontal (CORDINI, 2009; NADAL, 2000).

$$d = \cotg(0,5\phi) \quad (27)$$

Os alvos dessa mira são confeccionados com uma liga de ínvar formada por metal e níquel (36% de níquel) sendo sua principal característica o baixo coeficiente de dilatação linear.

O objetivo desse trabalho é determinar a posição de pontos, os quais não permitem visualização de forma direta com a estação total. Para simular essa situação utilizou-se a mira horizontal de ínvar, que possui três alvos, sendo dois nas extremidades e um no centro. Após testes executados anteriormente, detectou-se a necessidade de um número maior de alvos na mira horizontal de ínvar, por não ser possível a visualização dos alvos existentes, nas extremidades desta, sem modificar a posição do espelho. Por tanto, foram fixados outros alvos, em posições aleatórias ao longo de toda a mira, procurando simular variações em x, y e z.

Utilizando o interferômetro determinou-se a distância entre eles. O procedimento adotado foi o mesmo utilizado para determinar o afastamento dos alvos gravados no espelho. Nesse caso, também foi necessário realizar medições nas bordas dos traços dos alvos, devido à espessura destes, e a média aritmética dessas observações define o centro dos mesmos. Com isso é possível determinar as distâncias entre os alvos com precisão de 0,020 mm, ou seja, 20 μm . Essas distâncias servirão utilizadas como padrão de referência para validar a metodologia desenvolvida, Figura 43.

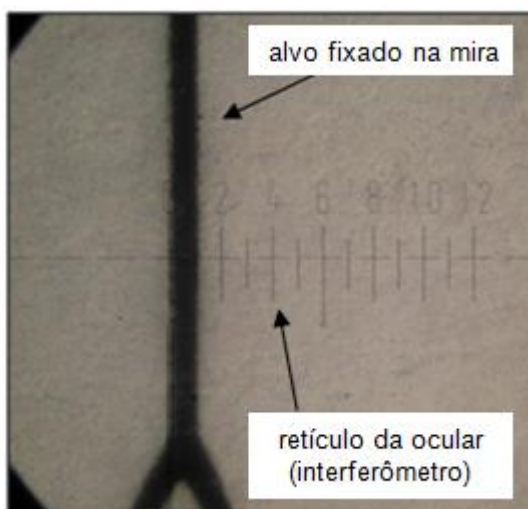


FIGURA 43– ALVO FIXADO NA MIRA HORIZONTAL DE INVAR

Na Figura 44 mostra-se o processo de calibração da mira horizontal de invar já com os alvos fixados, utilizando o interferômetro.

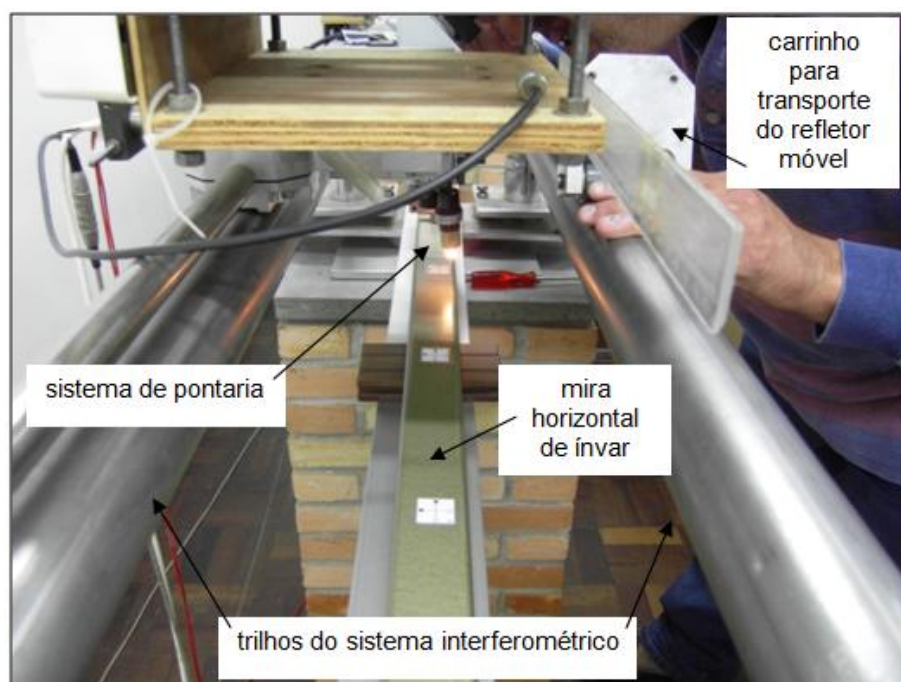


FIGURA 44 – INTERFEROMETRIA DOS FIXADOS ALVOS DA MIRA HORIZONTAL DE ÍNVAR

A mira de invar teve seus alvos medidos em duas etapas, primeiro os alvos pré-existentes na mira (denominados MA, MC e MB) e em uma segunda etapa os alvos fixados posteriormente (M1 à M8). Esse procedimento foi adotado porque os alvos das extremidades da mira horizontal de invar possuem alturas diferentes dos

que foram gravados e essa diferença desfocaliza a imagem da ocular do interferômetro e não é possível alterar a focalização durante a calibração.

3.6 MÉTODO DE LEVANTAMENTO PROPOSTO

Os levantamentos foram realizados nas dependências do Centro Politécnico – UFPR, no andar térreo do prédio de Administração Figura 45, utilizando a estrutura disponível nos laboratórios de Instrumentação Geodésica – LAIG e de Topografia – LAPTOP.



FIGURA 45 – SAGUÃO DO BLOCO DE ADMINISTRAÇÃO – CENTRO POLITÉCNICO

3.6.1 Sistema de Posicionamento com Espelho

Nesse método trabalha-se com dois sistemas de coordenadas cartesianas: sistema principal (Figura 46 - a) e sistema do espelho (Figura 46 - b).

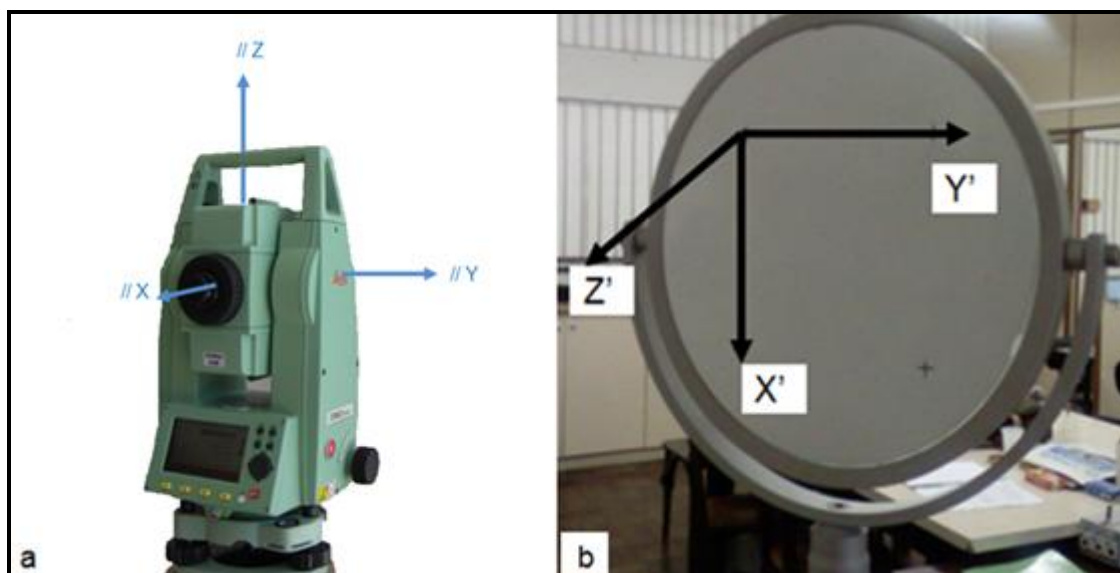


FIGURA 46 – SISTEMA PRINCIPAL E SISTEMA DO ESPELHO

O sistema principal tem como origem o centro cardan da estação total - ET, e a ela foi atribuída as coordenadas $x=100,00\text{m}$; $y=100,00\text{m}$ e $z=100,00\text{m}$. O eixo Y também foi arbitrado como coincidente com a linha de visada quando a ET está colimada em 0° (direção horizontal) e o eixo Z coincide com a vertical local, reproduzindo um sistema dextrógiro.

No espelho o sistema tem como origem o alvo E1 gravado em sua superfície, o eixo Y' coincide com a reta que passa pelos alvos E1 e E2 da superfície, sendo o plano formado pelo eixo Y' e X' coincidente com o plano da superfície do espelho, o eixo Z' é perpendicular ao mesmo.

O método consiste em realizar as medidas necessárias de direções horizontal, ângulos zenitais e distâncias inclinadas através do reflexo do alvo (ponto de interesse) no espelho. É necessário conhecer o plano do espelho, o qual pode ser definido se forem conhecidos três pontos da sua superfície.

Na Figura 47, mostra-se um esquema explicativo do levantamento realizado com o espelho.

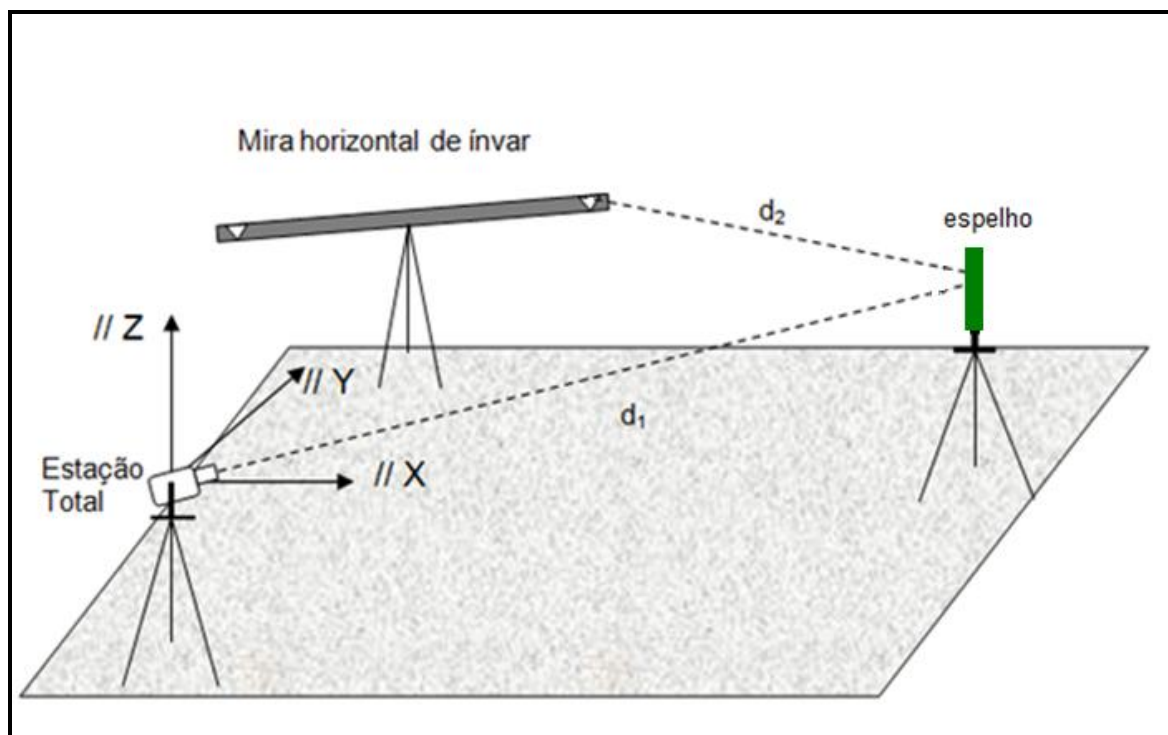


FIGURA 47 – SISTEMA DE POSICIONAMENTO INDIRETO DE PONTOS
 FONTE: O autor

Tomando como base a Figura 47 observa-se que a distância medida entre a estação total e o alvo na mira horizontal de invar, passando pelo espelho, será a soma das distâncias d_1 e d_2 , ou seja, o sinal que parte da estação total chega ao espelho que o desvia até atingir o alvo, retornando à estação total pelo mesmo caminho. Quando a distância necessária é somente a d_1 coloca-se um anteparo sobre o espelho para que ocorra uma reflexão difusa.

3.6.1.1 Levantamento dos pontos materializados na mira horizontal de invar

A mira horizontal de invar, como já descrito anteriormente, possui onze alvos os quais foram levantados objetivando a determinação da posição dos mesmos e, conseqüentemente, outras informações como afastamento entre eles. Como já foi visto essa mira tem dois alvos fixados em seus extremos com 2 m entre eles. Foi visto também que foram fixados outros oito alvos entre eles aumentando assim o número de posições a serem determinadas.

Em função do tamanho da mira horizontal de invar, do diâmetro do espelho e da distância entre eles, não foi possível realizar as medições de todos os alvos

sem movimentar o espelho. Sabe-se também que para cada movimento do espelho mudam as posições no espaço, logo para associar as observações feitas na primeira posição do espelho com a segunda, por exemplo, é necessário determinar a posição de dois alvos comuns nas duas posições do espelho, Figura 48.

- 1ª posição – lê-se os alvos MA, M1, M2, M3 e M4;
- 2ª posição – lê-se os alvos M3, M4, MC, M5 e M6;
- 3ª posição – lê-se os alvos M5, M6, M7, M8 e MB.

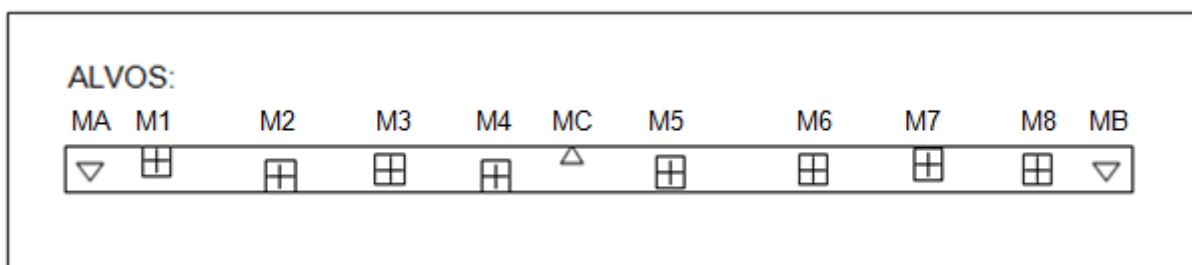


FIGURA 48 – ALVOS DA MIRA HORIZONTAL DE ÍNVAR
 FONTE: O autor

Nos testes anteriormente realizados, detectou-se uma diferença padrão entre as coordenadas obtidas de forma indireta e as de forma direta para a mesma posição do espelho. Devido a isso adotou-se esse procedimento de repetir o levantamento dos dois últimos alvos da posição anterior (posição do espelho). Assim foi possível a correção das coordenadas dos alvos obtidos em diferentes posições do espelho, permitindo a determinação da distância entre os alvos das extremidades da mira horizontal de invar, que foram levantados em uma posição diferente do espelho.

Dessa forma se as coordenadas do alvo MA forem conhecidas pode-se corrigir as coordenadas dos alvos M1, M2, M3 e M4 com a diferença obtida no alvo MA. Na segunda posição do espelho conhece-se as coordenadas do alvo M3 e M4 (obtidas na primeira posição do espelho), com essas corrige-se as demais e assim até chegar ao alvo MB.

3.7 MODELO MATEMÁTICO ADOTADO

3.7.1 Sequência de Cálculos

Para determinação das coordenadas dos alvos materializados na mira horizontal de ínvar desenvolveu-se o seguinte modelo matemático.

- 1) Definição do sistema principal de coordenadas: a estação ocupada para a coleta dos dados foi definida como origem e tendo as coordenadas atribuídas $x_0=100,000$; $y_0=100,000$ e $z_0=100,000$ metros.
- 2) Determinação das coordenadas dos alvos de referência (E1, E2, E3 e E4) e do ponto de visada, denominado “esp”, em relação ao sistema principal, utilizando as equações (28), (29) e (30).

$$x_i = x_0 + di_i \cdot \sin(Az_i) \cdot \sin(Z_i) \quad (28)$$

$$y_i = y_0 + di_i \cdot \cos(Az_i) \cdot \sin(Z_i) \quad (29)$$

$$z_i = z_0 + di_i \cdot \cos(Z_i) \quad (30)$$

Para cada alvo levantado da mira horizontal é definido um ponto “esp” distinto dos demais, Figura 49.

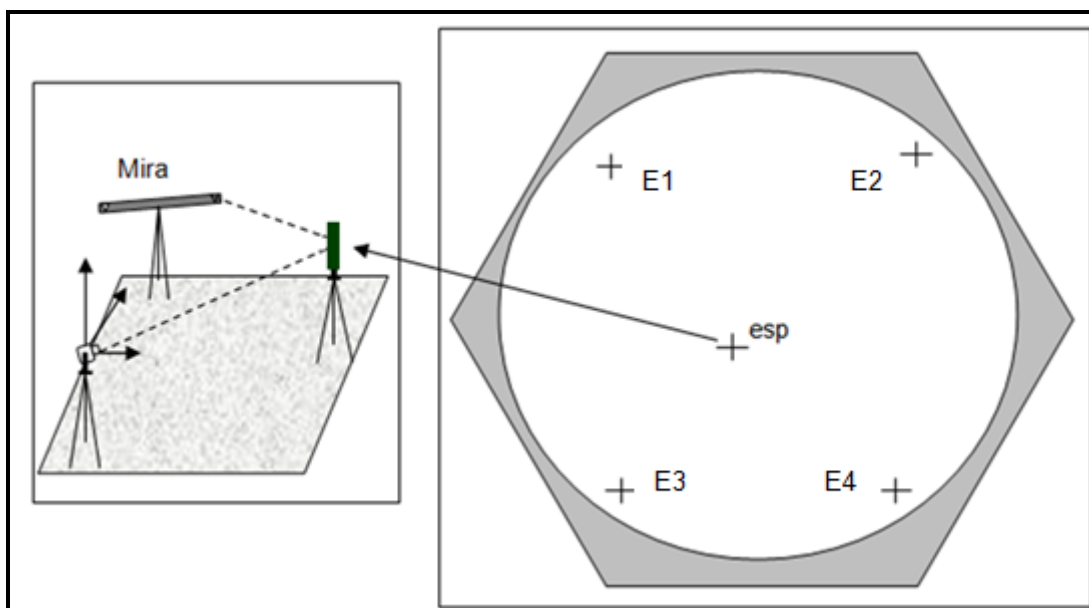


FIGURA 49 – ALVOS DE REFERÊNCIA E PONTO “ESP”
 FONTE: O autor

O ponto “esp” é materializado na superfície do espelho no momento da visada indireta do alvo da mira horizontal de ínvar, sendo d_1 a distância entre esse ponto e a ET.

- 3) Determinação da coordenada do alvo virtual, imagem do alvo da mira horizontal de ínvar projetada atrás do espelho, foi determinada com as equações (28), (29) e (30) apresentadas no item anterior, porém, a distância inclinada é a distância total (d_1+d_2), a distância zenital e direção horizontal é a mesma do “esp” do referido alvo. É importante enfatizar que cada alvo da mira horizontal de ínvar possui um ponto “esp” diferente dos demais (Figura 50).

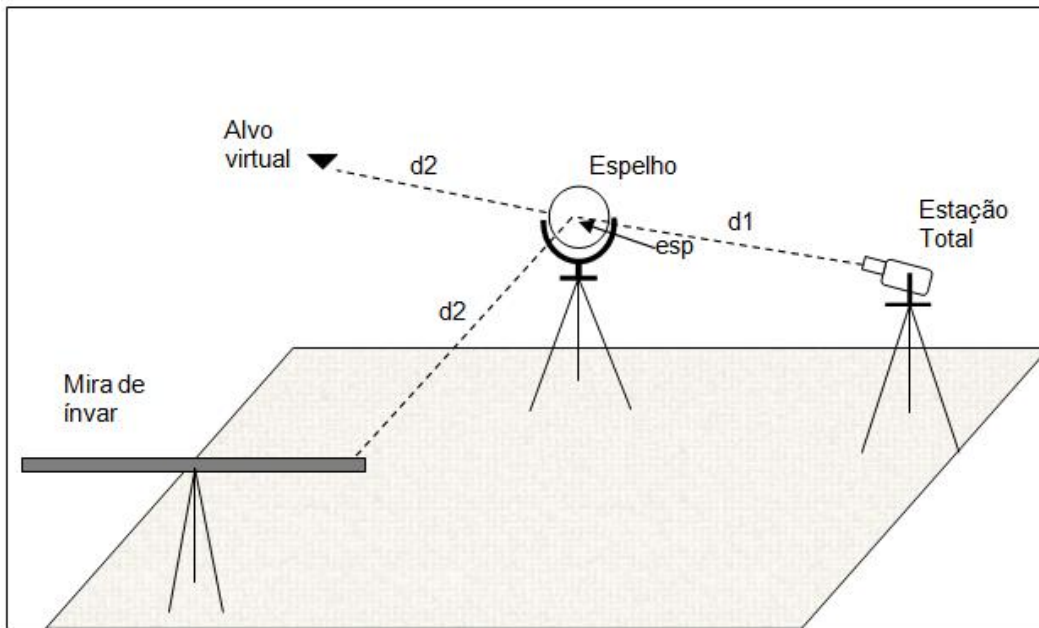


FIGURA 50 – POSIÇÃO DO ALVO VIRTUAL
 FONTE: O autor

- 4) Determinação dos vetores e versores formados pelos alvos E1- E2 e E1 - E3. A partir desses dados foram obtidos os parâmetros do versor normal ao plano do espelho. Esse versor coincide com o eixo Z' do sistema do espelho, Figura 51.

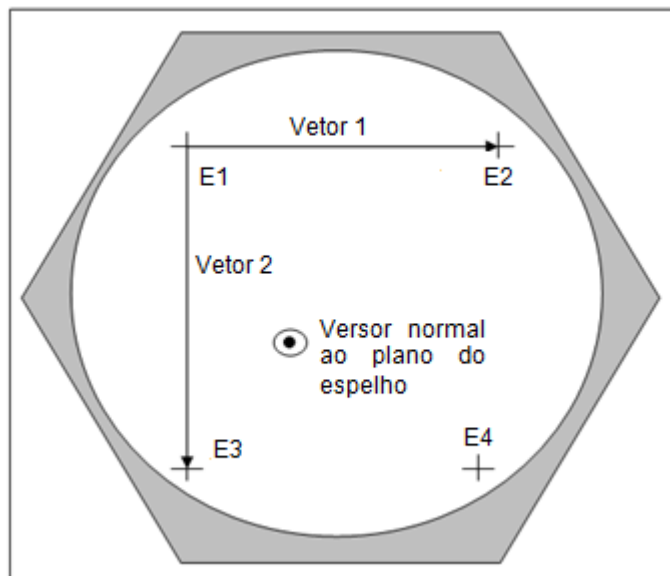


FIGURA 51 – VETORES E VERSOR DO PLANO DO ESPELHO
 FONTE: O autor

$$\text{Vetor1} = (x_{E2} - x_{E1}; y_{E2} - y_{E1}; z_{E2} - z_{E1})$$

$$\text{Vetor2} = (x_{E3} - x_{E1}; y_{E3} - y_{E1}; z_{E3} - z_{E1})$$

Utilizando-se os parâmetros dos vetores 1 e 2 calcula-se o vetor normal ao plano do espelho com a Equação (31) (VENTURI, 1990).

$$\vec{u} \times \vec{v} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \end{vmatrix} \quad (31)$$

Onde:

x_1, y_1 e z_1 – são os parâmetros do vetor \vec{u} ;

x_2, y_2 e z_2 – são os parâmetros do vetor \vec{v} ;

Os parâmetros da equação geral do plano são os mesmos parâmetros do vetor normal ao plano. Deve-se ter o cuidado de observar a regra da multiplicação de vetores (regra da mão esquerda) pelo fato de a multiplicação de vetores não possuir propriedade comutativa, ou seja, $\vec{u} \times \vec{v} \neq \vec{v} \times \vec{u}$. Na Figura 52, apresenta-se um desenho que representa a regra da mão esquerda mencionada anteriormente.

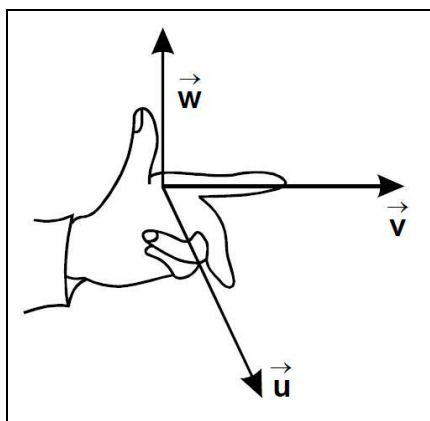


FIGURA 52 – REGRA DA MÃO ESQUERDA

FONTE: VENTURI, 1990

$$\vec{w} = \vec{u} \times \vec{v} \quad (32)$$

O versor \vec{w} perpendicular ao plano é calculado utilizando-se a equação (33).

$$\text{versor } \vec{w} = \frac{\vec{w}}{|\vec{w}|} \quad (33)$$

Definiu-se os eixos X' , Y' e Z' do sistema do espelho, sendo o eixo X' formado pelo versor perpendicular aos eixos Y' e Z' , o eixo Y' formado pelo Vetor 1 e o eixo Z' definido como o versor normal ao plano do espelho. A origem desse sistema é o alvo de referência E1 cujas coordenadas, nesse sistema, foram arbitradas $x'_{E1}=0$ m, $y'_{E1}=0$ m e $z'_{E1}=0$ m;

5) Determinação das coordenadas, no sistema de espelho, da estação origem, do ponto “esp” referente a cada alvo da mira horizontal de ínvar e dos alvos E2, E3 e E4. Na transformação das coordenadas do sistema principal para o sistema do espelho e vice-versa é necessário conhecer ao menos as coordenadas de quatro pontos nos dois sistemas. Os pontos utilizados foram os alvos de referência E1, E2, E3 e E4, porém como encontram-se sobre a superfície do espelho, ou seja, sobre um plano, foi necessário usar ao menos um ponto externo (origem) a esse plano para que a transformação de coordenadas possuísse caráter tridimensional.

Foram calculados os coeficientes dos vetores “origem”-E1, “esp”-E1, E2-E1, E3-E1 e E4-E1. Para tanto utilizou-se as coordenadas, no sistema principal, dos referidos pontos. As coordenadas dos pontos, no sistema do espelho, foram calculadas pela equação (34) que retorna a medida algébrica da projeção de um vetor sobre o outro.

$$\text{proj}_{\vec{u}} \vec{v} = \frac{\vec{u} \cdot \vec{v}}{|\vec{u}|} \quad (34)$$

Onde:

\vec{u} – vetor que define o eixo do sistema cartesiano do espelho

\vec{v} – vetor que terá sua medida algébrica projetada

A equação (34) determina a medida algébrica de um vetor sobre outro, quando a origem dos dois vetores é a mesma. Sabendo-se que um vetor é formado por dois pontos, origem e extremidade, essa medida retorna o valor do módulo do vetor (comprimento do vetor) sobre o eixo utilizado como base para a projeção. Como é conhecida a coordenada, no sistema do espelho, do ponto inicial do vetor ($x_{E1}=0$ m, $y_{E1}=0$ m e $z_{E1}=0$ m) para obter a coordenada do ponto final (extremidade) do vetor no mesmo sistema, adiciona-se essa medida algébrica à coordenada do ponto inicial, no eixo utilizado como base para a projeção. Esse procedimento é repetido para determinar as coordenadas dos pontos, citados acima, nos três eixos do sistema do espelho.

- 6) Transformação das coordenadas obtidas para o alvo no sistema do espelho precisam ser transformadas para o sistema principal. Optou-se por determinar as matrizes de rotação e translação da transformação afim, utilizando-se novamente as coordenadas dos alvos E1, E2, E3, E4 e da estação origem os quais têm as coordenadas conhecidas nos dois sistemas.
- 7) Coordenadas do alvo virtual no sistema do espelho – foi realizada a transformação das coordenadas do alvo virtual do sistema principal para o do espelho.
- 8) Reflexão do alvo virtual – foi calculada as coordenadas do alvo, no sistema de espelho, através da reflexão do alvo virtual nos eixos X' e Z' , sendo a origem dessa o ponto “esp”, Figura 53.

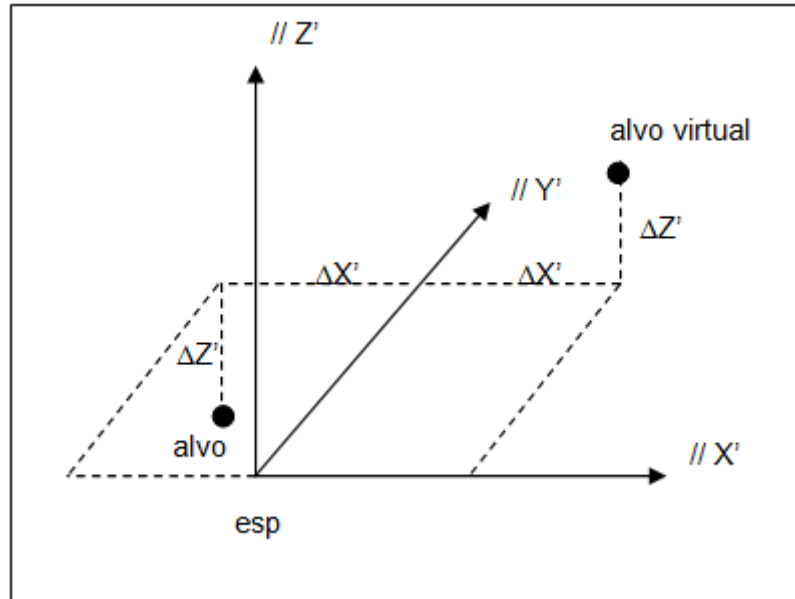


FIGURA 53 – REFLEXÃO DO ALVO VIRTUAL
 FONTE: O autor

Para determinar as coordenadas do alvo virtual no sistema do espelho é necessário realizar uma reflexão do alvo virtual em relação aos eixos X' e Z' sendo que essa tem como origem o ponto “esp”.

O cálculo dessa reflexão foi realizado obedecendo a sequência a seguir:

- Cálculo das diferenças entre as coordenadas X e Z dos pontos “esp” e alvo virtual.

$$\Delta x' = x'_{esp} - x'_{alvovirtual} \quad (35)$$

$$\Delta z' = z'_{esp} - z'_{alvovirtual} \quad (36)$$

- Adicionou-se os valores ΔX e ΔZ às respectivas coordenadas do ponto “esp” obtendo-se as coordenadas do alvo desejado no sistema cartesiano do espelho.

$$x'_{alvo} = x'_{esp} + \Delta x' \quad (37)$$

$$z'_{alvo} = z'_{esp} + \Delta z' \quad (38)$$

A reflexão do alvo ocorre no plano de incidência e reflexão, porém como só se conhece três pontos alinhados do referido alvo realiza-se a reflexão sobre um

plano ortogonal ao plano do espelho. Cada alvo, da mira horizontal de ínvar, levantado pertence a um plano de incidência e reflexão distinto do respectivo plano dos demais alvos, mesmo que a posição do espelho permaneça inalterada.

- 9) Cálculo das coordenadas do alvo no sistema principal - as coordenadas do alvo, no sistema principal, foram calculadas através da transformação afim.

Para a determinação das coordenadas do alvo no sistema principal utilizou-se novamente os parâmetros da transformação afim retornando o valor das coordenadas do alvo desejado no sistema principal. A sequência de cálculos apresentada até o momento foi adotada para obtenção das coordenadas de todos os alvos da mira horizontal de ínvar.

3.7.1.1 Conexão das coordenadas obtidas para diferentes posição

Os valores obtidos para as coordenadas dos alvos da mira horizontal de ínvar precisam passar por uma correção, pois a mudança na posição do espelho acarreta uma alteração no sistema, como foi dito anteriormente. Para determinar essa correção foram realizados quatro testes distintos:

- 1) um dos alvos da mira possuía as coordenadas tridimensionais conhecidas e foram realizados dois levantamentos para cada alvo (MA - MB e MB - MA);
- 2) um dos alvos da mira possuía as coordenadas tridimensionais conhecidas e foi realizado um levantamento para cada alvo;
- 3) nenhum dos alvos da mira horizontal de ínvar possui suas coordenadas tridimensionais e foram realizados dois levantamentos para cada alvo;
- 4) nenhum dos alvos da mira horizontal de ínvar possui suas coordenadas tridimensionais conhecidas e foi realizado um levantamento para cada alvo.

Para exemplificar a sequência de correção adotou-se o exemplo citado

anteriormente Figura 54:

- 1ª posição – lê-se os alvos MA, M1, M2, M3 e M4;
- 2ª posição – lê-se os alvos M3, M4, MC, M5 e M6;
- 3ª posição – lê-se os alvos M5, M6, M7, M8 e MB.

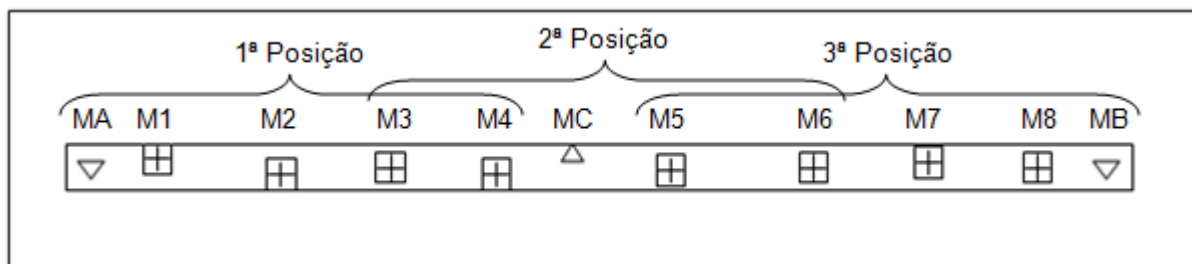


FIGURA 54 – ALVOS DA MIRA HORIZONTAL DE ÍNVAR
 FONTE: O autor

No primeiro e segundo procedimentos inicia-se as correções calculando a diferença entre as coordenadas absolutas e as indiretas do alvo MA (Δx , Δy e Δz). Com o valor obtido, corrige-se as coordenadas dos demais alvos levantados na mesma posição do espelho (M1, M2, M3 e M4). No terceiro e quarto procedimentos não será efetuada nenhuma alteração nos valores das coordenadas obtidas para a primeira posição do espelho.

Na sequência de cálculos, os alvos M3 e M4 possuem as coordenadas obtidas na primeira posição do espelho e coordenadas obtidas na segunda posição. Visando corrigir as coordenadas referentes à segunda posição do espelho, determina-se a diferença entre as coordenadas destes, calculando em seguida a média entre os valores encontrados, essa será utilizada como correção para os demais alvos da mesma posição (MC, M5 e M6). Esse processo é repetido para todas as posições do espelho.

Nos testes que possuem dois levantamentos para cada alvo, após a correção das coordenadas dos alvos calcula-se a média entre os valores obtidos na ida e os obtidos na volta.

4 RESULTADOS

4.1 TESTE DE PLANICIDADE DO ESPELHO

Realizou-se um teste de planicidade da superfície do espelho no Laboratório de Física da Universidade Federal do Paraná, o qual possui um modelo plano padrão. Neste, encontrou-se dificuldade de visualização das franjas de interferência, devido a iluminação utilizada ser refletida pela superfície do espelho. Depois de testes com diferentes tipos de iluminação foi possível observar algumas franjas de interferência, Figura 55.

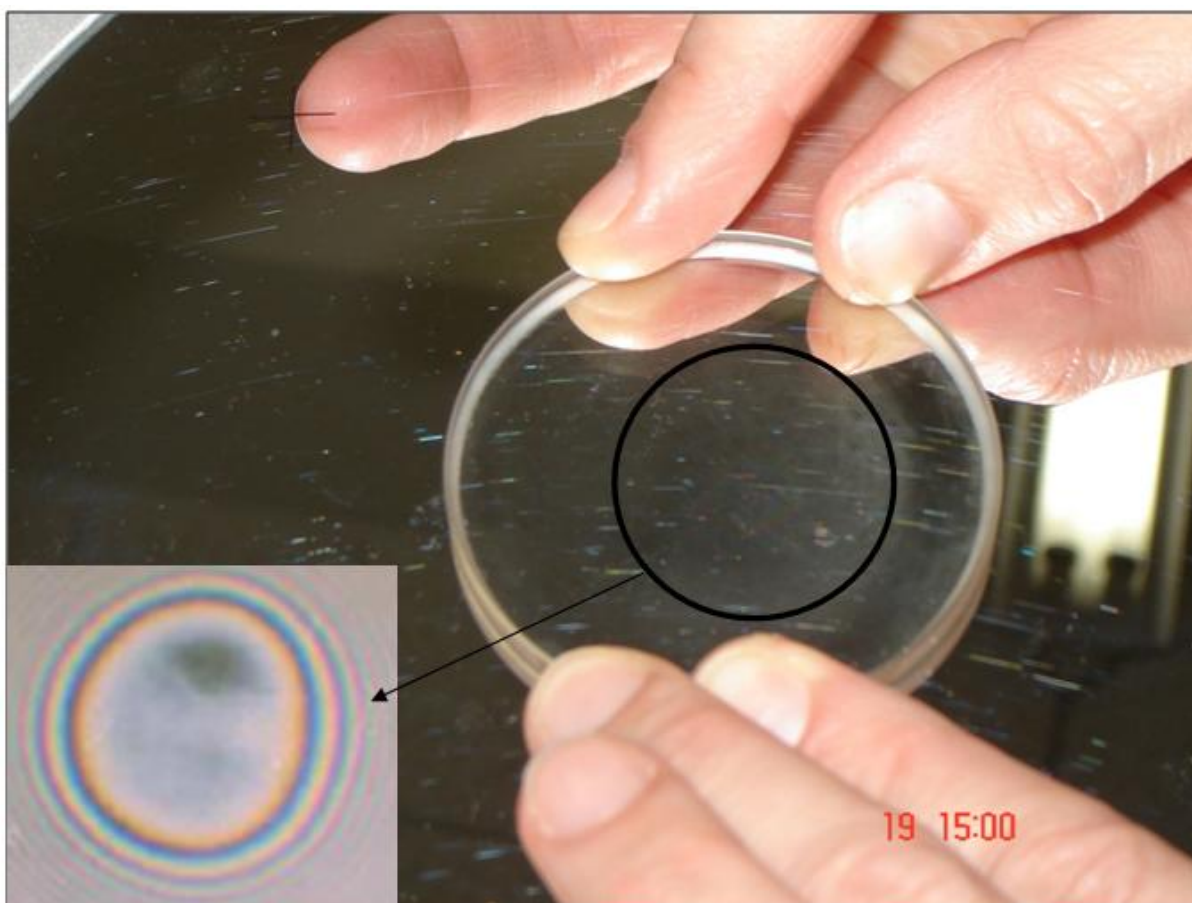


FIGURA 55 – TESTE DE PLANICIDADE REALIZADO COM O ESPELHO

4.2 CALIBRAÇÃO DOS ALVOS GRAVADOS NO ESPELHO

Os valores obtidos na calibração, com o interferômetro são apresentados na Tabela 1 a seguir, foram realizadas três séries de medidas para cada alvo.

Alvos	Leituras (mm)				Valor Médio (mm)		Distância (mm)
	Alvo 2		Alvo 1		Alvo 2	Alvo 1	
E2 – E1	E	8,801	E	108,170	8,970	108,329	99,358
	D	9,140	D	108,488			
	E	8,822	E	108,166	8,956	108,330	99,374
	D	9,090	D	108,494			
	E	8,795	E	108,166	8,937	108,321	99,383
	D	9,080	D	108,476			
Distância Média = 0,099372 m							
	Alvo1		Alvo 3		Alvo 1	Alvo 3	
E1 – E3	E	64,899	E	165,533	65,057	165,695	100,637
	D	65,216	D	165,857			
	E	64,878	E	165,534	65,041	165,708	100,667
	D	65,205	D	165,883			
	E	64,902	E	165,564	65,052	165,724	100,672
	D	65,202	D	165,885			
Distância Média = 0,100659 m							
	Alvo 3		Alvo 4		Alvo 3	Alvo 4	
E3 – E4	E	72,537	E	172,208	72,700	172,337	99,637
	D	72,863	D	172,466			
	E	72,566	E	172,228	72,713	172,346	99,633
	D	72,860	D	172,464			
	E	72,569	E	172,208	72,714	172,329	99,614
	D	72,860	D	172,451			
Distância Média = 0,09928 m							

continua

Alvos	Leituras (mm)				Valor Médio (mm)		Distância (mm)
	Alvo 4		Alvo 2		Alvo 4	Alvo 2	
E4 – E2	E	84,270	E	184,936	84,409	185,085	100,676
	D	84,548	D	185,234			
	E	84,270	E	184,935	84,406	185,091	100,685
	D	84,542	D	185,247			
	E	84,277	E	184,942	84,407	185,095	100,688
	D	84,537	D	185,249			
Distância Média = 0,100683 m							
	Alvo 3		Alvo 2		Alvo 3	Alvo 2	
E3 – E2	E	61,153	E	202,785	61,378	203,020	141,642
	D	61,604	D	203,256			
	E	61,154	E	202,793	61,382	203,031	141,649
	D	61,610	D	203,269			
	E	61,140	E	202,795	61,375	203,019	141,643
	D	61,611	D	203,243			
Distância Média = 0,141645 m							
	Alvo 4		Alvo 1		Alvo 4	Alvo 1	
E4 – E1	E	75,844	E	217,296	76,099	217,549	141,450
	D	76,354	D	217,803			
	E	75,838	E	217,297	76,090	217,559	141,469
	D	76,342	D	217,821			
	E	75,834	E	217,294	76,084	217,557	141,472
	D	76,335	D	217,820			
Distância Média = 0,141464 m							

TABELA 1 – CALIBRAÇÃO DOS ALVOS COM O INTERFERÔMETRO

Onde:

E – esquerda do alvo;

D – direita do alvo;

E1, E2, E3 e E4 – alvos gravados no espelho.

Com as distâncias entre os alvos obtidas em três séries independentes no processo de calibração, foi possível, utilizando as equações (39), (40) e (41) citadas

por GEMAEL, 1994, calcular a média aritmética e os erros associados.

1) Média aritmética:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^k l_i}{k} \quad (39)$$

Sendo:

l_i – observações;

k – número de observações.

2) Erro médio quadrático de uma observação isolada:

$$m = \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (\text{desvio}_i^2)}{k-1}} \quad (40)$$

3) Erro médio quadrático da média aritmética:

$$m_x = \sigma_x = \frac{\sigma}{\sqrt{k}} \quad (41)$$

Nas Tabela 2 são apresentados os resultados obtidos na calibração dos alvos de referência do espelho.

Alvo	Obs.	Distância (mm)	Desvio (mm)	Desvio ² (mm ²)	Média (mm)	m (mm)	m_x (mm)
E1-E2	1	99,358	-0,014	0,000	99,372	0,013	0,007
	2	99,374	0,002	$5,4 \cdot 10^{-06}$			
	3	99,383	0,011	0,000			
	Soma	298,115	$-1,4 \cdot 10^{-14}$	0,000			
E1-E3	1	100,637	-0,022	0,000	100,659	0,019	0,011
	2	100,667	0,008	$6,9 \cdot 10^{-05}$			
	3	100,672	0,013	0,000			
	Soma	301,976	$1,4 \cdot 10^{-14}$	0,001			
E3-E4	1	99,637	0,009	$8,1 \cdot 10^{-05}$	99,628	0,012	0,007
	2	99,633	0,005	$2,5 \cdot 10^{-05}$			
	3	99,614	-0,014	0,000			
	Soma	298,884	0	0,000			
E2-E4	1	100,676	-0,007	$4,9 \cdot 10^{-05}$	100,683	0,006	0,004
	2	100,685	0,002	$4,0 \cdot 10^{-06}$			
	3	100,688	0,005	$2,5 \cdot 10^{-05}$			
	Soma	302,049	$2,8 \cdot 10^{-14}$	$7,8 \cdot 10^{-05}$			
E2-E3	1	141,642	-0,003	$7,1 \cdot 10^{-06}$	141,645	0,004	0,002
	2	141,649	0,004	$1,8 \cdot 10^{-05}$			
	3	141,643	-0,002	$2,7 \cdot 10^{-06}$			
	Soma	424,934	0	$2,8 \cdot 10^{-05}$			
E1-E4	1	141,45	-0,014	0,000	141,464	0,012	0,007
	2	141,469	0,005	$2,8 \cdot 10^{-05}$			
	3	141,472	0,008	$6,9 \cdot 10^{-05}$			
	Soma	424,391	$2,8 \cdot 10^{-14}$	0,000			

TABELA 2 – CALIBRAÇÃO DAS DISTÂNCIAS ENTRE OS ALVOS DE REFERÊNCIA

Após a calibração foram adotadas as distâncias apresentadas na Tabela 3 para os alvos de referência na superfície do espelho.

alvos	Distância (m)	Erro Médio Quadrático (mm)
E1 -> E2	0,09937	0, 007
E1 -> E3	0,10066	0, 011
E3 -> E4	0,09963	0, 007
E2 -> E4	0,10068	0, 004
E2 -> E3	0,14165	0, 002
E1 ->E4	0,14146	0, 007

TABELA 3 – VALORES AJUSTADOS DOS ALVOS DE REFERÊNCIA

4.2 CALIBRAÇÃO DA MIRA HORIZONTAL DE ÍNVAR

Os valores obtidos na calibração dos alvos MA e MB da mira horizontal de ínvar estão listados na Tabela 4.

Observação	Alvo MA (mm)	Alvo MB (mm)	Distância (mm)	Desvio (mm)	Desvio ² (mm ²)
1	55,40355	2055,383	1999,980	-0,006	0,000
2	,409	2055,389	1999,980	-0,006	0,000
3	55,409	2055,402	1999,993	0,007	0,000
4	55,406	2055,399	1999,993	0,007	0,000
5	55,413	2055,397	1999,984	-0,002	0,000
Soma			9999,930	0	0,000
Média =			1999,986		
m =			0,007		
m_x =			0,003		

TABELA 4 – CALIBRAÇÃO DA MIRA HORIZONTAL DE ÍNVAR ALVOS MA E MB

Após a calibração adotou-se o comprimento de 2,000 m \pm 0, 003 mm para a

mira horizontal de ínvar.

Na calibração dos alvos, de M1 à M8, gravados na mira horizontal de ínvar, foi possível determinar a distância linear entre os mesmos. Para tal, foram realizadas três séries de medidas. Na Tabela 5 apresentam-se os valores obtidos das leituras efetuadas no processo e a distância entre a origem do interferômetro e o centro de cada alvo. Com essa informação é possível calcular distância entre eles.

		1ª série		2ª série		3ª série	
		Leitura (mm)	Centro (mm)	Leitura (mm)	Centro (mm)	Leitura (mm)	Centro (mm)
M1	D	1755,740	1755,673	1755,727	1755,660	1755,720	1755,657
	E	1755,605		1755,592		1755,593	
M2	D	1598,543	1598,481	1598,531	1598,472	1598,556	1598,485
	E	1598,419		1598,412		1598,413	
M3	D	1414,422	1414,356	1414,418	1414,352	1414,413	1414,353
	E	1414,289		1414,286		1414,293	
M4	D	1237,662	1237,576	1237,651	1237,561	1237,640	1237,559
	E	1237,489		1237,470		1237,478	
M5	D	792,871	792,808	792,870	792,808	792,856	792,808
	E	792,744		792,746		792,759	
M6	D	612,434	612,359	612,441	612,369	612,423	612,364
	E	612,283		612,297		612,304	
M7	D	426,923	426,829	426,911	426,816	426,907	426,815
	E	426,734		426,720		426,723	
M8	D	246,746	246,637	246,729	246,628	246,731	246,626
	E	246,527		246,526		246,520	

TABELA 5 – MEDIÇÕES REALIZADAS NO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO DOS ALVOS M1 À M8

A distância média entre os alvos e os respectivos desvios são apresentados nas Tabelas 6 e 7.

ALVOS	DISTÂNCIA (mm)			\bar{x} (mm)
	1ª Série	2ª Série	3ª Série	
M1 -> M2	157,192	157,188	157,172	157,184
M2 -> M3	184,125	184,120	184,132	184,126
M3 -> M4	176,780	176,791	176,794	176,788
M4 -> M5	444,768	444,753	444,751	444,757
M5 -> M6	180,449	180,439	180,444	180,444
M6 -> M7	185,530	185,553	185,549	185,544
M7 -> M8	180,192	180,188	180,189	180,190

TABELA 6 – CALIBRAÇÃO DOS ALVOS GRAVADOS NA MIRA HORIZONTAL DE ÍNVAR

	Distâncias Lineares (mm)						
	M1 -> M2	M2 -> M3	M3 -> M4	M4 -> M5	M5 -> M6	M6 -> M7	M7 -> M8
Desvio (mm)	0,008	-0,001	-0,008	0,011	0,005	-0,014	0,002
	0,004	-0,006	0,003	-0,004	-0,005	0,009	-0,002
	-0,012	0,006	0,006	-0,006	0,000	0,005	-0,001
Σ (mm)	0	-0,000	0,000	0,000	0	0	-0,000
desvio ² (mm ²)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	0,000	0,000	0,000	0,000	0	0,000	0,000
Σ (mm)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
m (mm)	0,011	0,006	0,007	0,009	0,005	0,012	0,007
m_x (mm)	0,006	0,003	0,004	0,005	0,003	0,007	0,004

TABELA 7 – VARIAÇÃO ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA OS ALVOS DA MIRA HORIZONTAL DE ÍNVAR

As distâncias lineares adotadas, entre os alvos gravados na mira horizontal de ínvar, são apresentadas na Tabela 8, bem como o desvio médio em relação a média.

ALVOS	DISTÂNCIA (m)	m_x (mm)
M1 -> M2	0,157184	±0,006
M2 -> M3	0,184126	±0,003
M3 -> M4	0,176788	±0,004
M4 -> M5	0,444757	±0,005
M5 -> M6	0,180444	±0,003
M6 -> M7	0,185544	±0,007
M7 -> M8	0,180190	±0,004

TABELA 8 – DISTÂNCIAS ENTRE OS ALVOS

4.3 DETERMINAÇÃO DA POSIÇÃO DOS ALVOS DA MIRA HORIZONTAL DE ÍNVAR

No decorrer dessa pesquisa, foram testadas diversas configurações da posição da estação total, espelho e alvo. Nas tabelas a seguir serão apresentados os dados de campo de um desses testes (ET ± 3m do espelho e mira horizontal de ínvar à ± 25 m do espelho), bem como os valores das coordenadas.

Posição Espelho	Alvo	Direção Horizontal	Distância Zenital	Distância Inclinada (m)	Distância Total (m)	
1	E S P E L H O	E1	13°05'54"	89°15'47"	3,591	
		E2	14°31'41"	89°16'06"	3,548	
		E3	14°31'05"	90°52'41"	3,549	
		E4	13°05'03"	90°51'14"	3,592	
	M I R A	MA	14°39'02"	90°02'32"	3,545	28,681
		M1	14°07'23"	90°02'11"	3,560	28,692
		M2	13°48'38"	90°02'47"	3,569	28,694
		M3	13°26'41"	90°02'46"	3,580	28,699
		M4	13°05'31"	90°03'06"	3,590	28,704
2	E S P E L H O	E1	13°05'42"	89°15'45"	3,590	
		E2	14°31'12"	89°16'03"	3,548	
		E3	14°30'41"	90°52'39"	3,550	
		E4	13°05'00"	90°51'15"	3,592	
	M I R A	M3	14°34'56"	90°02'31"	3,546	28,698
		M4	14°13'47"	90°02'52"	3,556	28,703
		MC	13°47'54"	90°00'13"	3,569	28,695
		M5	13°20'54"	90°02'46"	3,583	28,724
		M6	12°59'22"	90°02'36"	3,595	28,734
3	E S P E L H O	E1	13°05'58"	89°15'48"	3,592	
		E2	14°30'52"	89°16'03"	3,547	
		E3	14°30'19"	90°52'43"	3,548	
		E4	13°05'10"	90°51'12"	3,592	
	M I R A	M5	14°26'54"	90°02'35"	3,549	28,724
		M6	14°05'24"	90°02'22"	3,560	28,735
		M7	13°43'20"	90°02'10"	3,572	28,747
		M8	13°21'54"	90°02'26"	3,583	28,761
		MB	12°54'50"	90°02'03"	3,597	28,774

TABELA 9 – DADOS DE CAMPO DO TESTE 2A

Posição Espelho	Alvo	Coordenadas Sistema Principal (m)		
		x	y	z
P O S I Ç Ã O 1	E1	100,8137	103,4973	100,0462
	E2	100,8900	103,4343	100,0453
	E3	100,8131	103,4984	99,9465
	E4	100,8896	103,4353	99,9456
	Mira Espelho			
	MA	100,8966	103,4297	99,9974
	M1	100,8687	103,4524	99,9977
	M2	100,8520	103,4658	99,9971
	M3	100,8324	103,4819	99,9971
	M4	100,8132	103,4967	99,9968
	Mira Virtual			
	MVA	107,2541	127,7485	99,9789
	MV1	107,0010	127,8247	99,9818
	MV2	106,8496	127,8645	99,9768
	MV3	106,6727	127,9125	99,9769
	MV4	106,5019	127,9579	99,9741
P O S I Ç Ã O 2	E1	100,8133	103,4964	100,0462
	E2	100,8895	103,4344	100,0454
	E3	100,8130	103,4984	99,9465
	E4	100,8894	103,4363	99,9456
	Mira Espelho			
	M3	100,8928	103,4318	99,9974
	M4	100,8741	103,4469	99,9970
	MC	100,8512	103,4660	99,9998
	M5	100,8272	103,4862	99,9971
	M6	100,8081	103,5030	99,9973
M3	107,2253	127,7736	99,9790	

continua

Posição Espelho	Alvo	Coordenadas Sistema Principal (m)		
		x	y	z
P O S I Ç Ã O 2	Mira Virtual			
	MV3	107,2253	127,7736	99,9790
	MV4	107,0555	127,8223	99,9761
	MVC	106,8439	127,8669	99,9982
	MV5	106,6315	127,9480	99,9769
	MV6	106,4586	127,9987	99,9783
P O S I Ç Ã O 3	E1	100,8140	103,4982	100,0462
	E2	100,8889	103,4335	100,0453
	E3	100,8132	103,4983	99,9465
	E4	100,8886	103,4345	99,9456
	Mira Espelho			
	M5	100,8855	103,4368	99,9973
	M6	100,8667	103,4529	99,9975
	M7	100,8473	103,4700	99,9977
	M8	100,8282	103,4860	99,9975
	MB	100,8039	103,5060	99,9979
	Mira Virtual			
	MV5	107,1668	127,8155	99,9784
	MV6	106,9954	127,8705	99,9802
	MV7	106,8192	127,9265	99,9819
MV8	106,6482	127,9821	99,9796	
MVB	106,4306	128,0462	99,9828	

TABELA 10 – COORDENADAS DO TESTE 2A

Posição Espelho	Alvo	Direção Horizontal	Distância Zenital	Distância Inclinada (m)	Distância Total (m)	
1	E S P E L H O	E1	13°05'51"	89°16'08"	3,591	
		E2	14°30'45"	89°16'01"	3,547	
		E3	14°30'18"	90°52'41"	3,548	
		E4	13°05'12"	90°51'10"	3,593	
	M I R A	MB	13°01'55"	90°02'17"	3,594	28,774
		M8	13°28'53"	90°02'41"	3,579	28,761
		M7	13°50'20"	90°02'22"	3,565	28,747
		M6	14°12'25"	90°02'34"	3,556	28,735
		M5	14°33'54"	90°02'45"	3,546	28,724
2	E S P E L H O	E1	13°05'55"	89°15'47"	3,591	
		E2	14°31'20"	89°16'02"	3,548	
		E3	14°30'47"	90°52'42"	3,550	
		E4	13°05'10"	90°51'12"	3,591	
	M I R A	M6	12°56'13"	90°02'46"	3,596	28,734
		M5	13°17'45"	90°02'54"	3,585	28,725
		M4	14°10'45"	90°03'00"	3,558	28,704
		M3	14°31'51"	90°02'43"	3,548	28,699
3	E S P E L H O	E1	13°05'40"	89°15'46"	3,591	
		E2	14°31'32"	89°16'03"	3,549	
		E3	14°31'03"	90°52'40"	3,549	
		E4	13°04'50"	90°51'15"	3,592	
	M I R A	M4	12°56'26"	90°03'23"	3,595	28,704
		M3	13°17'32"	90°03'03"	3,584	28,698
		M2	13°39'29"	90°03'08"	3,574	28,694
		M1	13°58'14"	90°02'37"	3,564	28,692
		MA	14°29'51"	90°02'49"	3,550	28,681

TABELA 11 – DADOS DE CAMPO DO TESTE 2B

Posição Espelho	Alvo	Coordenadas Sistema Principal (m)		
		x	y	z
P O S I Ç Ã O 1	E1	100,814	103,497	100,046
	E2	100,889	103,434	100,045
	E3	100,814	103,499	99,947
	E4	100,889	103,435	99,946
	Mira Espelho			
	MB	100,810	103,501	99,998
	M8	100,834	103,480	99,997
	M7	100,853	103,462	99,998
	M6	100,873	103,447	99,997
	M5	100,892	103,432	99,997
	Mira Virtual			
	MVB	106,489	128,033	99,981
	MV8	106,705	127,969	99,978
	MV7	106,876	127,913	99,980
	MV6	107,052	127,856	99,979
	MV5	107,224	127,801	99,977
P O S I Ç Ã O 2	E1	100,814	103,497	100,046
	E2	100,890	103,434	100,045
	E3	100,813	103,497	99,9465
	E4	100,890	103,436	99,9456
	Mira Espelho			
	M6	100,805	103,505	99,9971
	M5	100,8245	103,489	99,997
	M4	100,872	103,450	99,997
	M3	100,890	103,435	99,997

continua

Posição Espelho	Alvo	Coordenadas Sistema Principal (m)		
		x	y	z
P O S I Ç Ã O 2	Mira Virtual			
	MV6	106,433	128,005	99,977
	MV5	106,606	127,955	99,976
	MV4	107,031	127,830	99,975
	MV3	106,200	127,781	99,977
P O S I Ç Ã O 3	E1	100,814	103,497	100,046
	E2	100,890	103,435	100,045
	E3	100,813	103,498	99,947
	E4	100,890	103,435	99,946
	Mira Espelho			
	M4	100,805	103,504	99,997
	M3	100,824	103,488	99,997
	M2	100,844	103,473	99,997
	M1	100,860	103,459	99,997
	MA	100,889	103,437	99,997
	Mira Virtual			
	MV4	106,428	127,975	99,972
	MV3	106,598	127,929	99,975
MV2	106,775	127,883	99,974	
MV1	106,927	127,843	99,978	
MVA	107,180	127,768	99,977	

TABELA 12 – COORDENADAS DO TESTE 2B

Nos testes 2A e 2B as coordenadas tridimensionais do alvo MA são previamente conhecidas e os outros alvos foram levantados duas vezes. Na Tabela 13, apresentam-se os resultados obtidos nas coordenadas do teste 2A, teste 2B e da média dos dois e são comparados com as coordenadas tridimensionais obtidas de forma direta.

ALVO		COORDENADAS TRIDIMENSIONAIS (METROS)						
		2ª	2B	MEDIA	DIRETO	dif 2A	dif 2B	dif média
MA	x	78,547	78,547	78,547	78,547	0,000	0,000	0,000
	y	92,041	92,041	92,041	92,041	0,000	0,000	0,000
	z	99,832	99,832	99,832	99,832	0,000	0,000	0,000
M1	x	78,424	78,419	78,421	78,422	0,002	-0,003	0,000
	y	92,274	92,271	92,273	92,272	0,002	-0,001	0,001
	z	99,834	99,834	99,834	99,836	-0,002	-0,001	-0,002
M2	x	78,356	78,350	78,353	78,350	0,006	0,000	0,003
	y	92,415	92,412	92,414	92,412	0,003	0,000	0,002
	z	99,839	99,840	99,839	99,831	0,008	0,009	0,009
M3	x	78,275	78,267	78,271	78,265	0,010	0,002	0,006
	y	92,579	92,575	92,577	92,575	0,004	0,000	0,002
	z	99,842	99,841	99,842	99,832	0,010	0,009	0,010
M4	x	78,198	78,187	78,192	78,184	0,014	0,004	0,009
	y	92,737	92,732	92,735	92,732	0,006	0,001	0,003
	z	99,846	99,846	99,846	99,830	0,016	0,016	0,016
M5	x	77,987	77,986	77,986	77,978	0,009	0,008	0,009
	y	93,127	93,127	93,127	93,125	0,002	0,001	0,002
	z	99,852	99,851	99,851	99,831	0,020	0,019	0,020
M6	x	77,903	77,905	77,904	77,895	0,008	0,010	0,009
	y	93,288	93,287	93,288	93,285	0,002	0,002	0,002
	z	99,853	99,852	99,853	99,833	0,020	0,019	0,020
M7	x	77,825	77,817	77,821	77,810	0,015	0,007	0,011
	y	93,455	93,448	93,451	93,450	0,005	-0,002	0,001
	z	99,854	99,852	99,853	99,835	0,019	0,016	0,017
M8	x	77,745	77,737	77,741	77,726	0,019	0,011	0,015
	y	93,616	93,611	93,613	93,609	0,006	0,002	0,004
	z	99,858	99,855	99,856	99,833	0,026	0,022	0,024
MB	x	77,649	77,639	77,644	77,623	0,026	0,016	0,021
	y	93,820	93,816	93,818	93,812	0,008	0,003	0,006
	z	99,859	99,854	99,856	99,838	0,021	0,016	0,019

TABELA 13 – COORDENADAS OBTIDAS NOS TESTES 2A E 2B

Na Tabela 14, apresentam-se as relações das distâncias entre os alvos da mira horizontal de invar, obtidas através do espelho, e as distâncias obtidas de forma direta. Cabe salientar que essas diferenças entre as distâncias incluem os extremos da mira.

DISTÂNCIA ENTRE OS ALVOS (METRO)							
Alvos	2A	2B	MÉDIA	DIRETO	dif 2A	dif 2B	dif média
MA -> M1	0,264	0,263	0,264	0,263	0,001	0,000	0,001
M1 -> M2	0,156	0,157	0,157	0,157	-0,001	0,000	0,000
M2 -> M3	0,183	0,183	0,183	0,184	-0,001	-0,002	-0,001
M3 -> M4	0,176	0,176	0,176	0,176	0,000	0,000	0,000
M5 -> M6	0,181	0,180	0,181	0,180	0,001	0,000	0,000
M6 -> M7	0,185	0,183	0,184	0,185	-0,001	-0,002	-0,002
M7 -> M8	0,180	0,182	0,181	0,180	-0,001	0,002	0,001
M8 -> MB	0,226	0,227	0,226	0,228	-0,001	-0,001	-0,001
MA -> MB	1,994	1,994	1,994	1,998	-0,004	-0,004	-0,004

TABELA 14 – DISTÂNCIAS OBTIDAS NOS TESTES 2A E 2B

Na Tabela 15, constam as distâncias horizontais entre os alvos da mira horizontal de ínvar, e a diferença entre essas distâncias, obtidas através do espelho e no processo de calibração da mira, no interferômetro de Michelson.

Alvos	DISTÂNCIAS HORIZONTAIS (METROS)						
	2A	2B	MÉDIA	INTERFERÔMETRO	dif 2A	dif 2B	dif média
M1 -> M2	0,156	0,157	0,157	0,157	-0,001	0,000	-0,001
M2 -> M3	0,183	0,183	0,183	0,184	-0,001	-0,002	-0,001
M3 -> M4	0,176	0,176	0,176	0,177	-0,001	0,000	-0,001
M4 -> M5	0,443	0,443	0,443	0,445	-0,002	-0,002	-0,002
M5 -> M6	0,181	0,180	0,181	0,180	0,001	0,000	0,000
M6 -> M7	0,185	0,183	0,184	0,186	-0,001	-0,002	-0,002
M7 -> M8	0,179	0,182	0,181	0,180	-0,001	0,002	0,000

TABELA 15 – DISTÂNCIAS HORIZONTAIS OBTIDAS NOS TESTES 2A e 2B

Nos testes 1A e 1B não foi realizado o levantamento de forma direta dos alvos da mira horizontal de ínvar. Adotou-se como referência as distâncias entre os alvos obtidas na etapa anterior.

Alvos	DISTÂNCIAS (METROS)						
	1A	1B	MÉDIA	DIRETO	dif 1A	dif 1B	dif média
MA -> M1	0,264	0,264	0,264	0,263	0,001	0,001	0,001
M1 -> M2	0,157	0,156	0,157	0,157	0,000	-0,001	-0,001
M2 -> M3	0,184	0,184	0,184	0,184	-0,001	0,000	0,000
M3 -> M4	0,176	0,177	0,177	0,176	0,000	0,000	0,000
M4 -> MC	0,218	0,217	0,217	0,219	-0,001	-0,002	-0,002
MC -> M5	0,228	0,228	0,228	0,229	-0,001	-0,001	-0,001
M5 -> M6	0,180	0,180	0,180	0,180	-0,001	0,000	0,000
M6 -> M7	0,186	0,184	0,185	0,185	0,000	-0,001	0,000
M7 -> M8	0,179	0,180	0,180	0,180	-0,001	0,000	0,000
M8 -> MB	0,226	0,226	0,226	0,228	-0,002	-0,001	-0,001
MA -> MB	1,994	1,994	1,994	1,998	-0,004	-0,004	-0,004

TABELA 16 – DISTÂNCIAS OBTIDAS NOS TESTES 1A E 1B

Na Tabela 17, comparam-se as distâncias horizontais obtidas através do espelho e as mesmas obtidas na calibração com o interferômetro.

Alvos	DISTÂNCIAS HORIZONTAIS (METROS)						
	1A	1B	MÉDIA	INTERFERÔMETRO	dif 1A	dif 1B	dif média
M1 -> M2	0,157	0,156	0,156	0,157	0,000	-0,001	-0,001
M2 -> M3	0,184	0,184	0,184	0,184	0,000	0,000	0,000
M3 -> M4	0,176	0,177	0,177	0,177	0,000	0,000	0,000
M4 -> M5	0,443	0,443	0,443	0,445	-0,001	-0,002	-0,002
M5 -> M6	0,180	0,180	0,180	0,180	-0,001	0,000	0,000
M6 -> M7	0,186	0,184	0,185	0,186	0,000	-0,001	-0,001
M7 -> M8	0,179	0,180	0,180	0,180	-0,001	0,000	-0,001

TABELA 17 – DISTÂNCIAS HORIZONTAIS OBTIDAS NOS TESTES 1A E 1B

Na TABELA 18, estão as coordenadas tridimensionais obtidas diretamente e através do espelho, dos testes 3 e 4, as coordenadas tridimensionais do alvo MA são conhecidas.

Alvos		COORDENADAS TRIDIMENSIONAIS (METROS)					
		TESTE 3			TESTE 4		
		ESPELHO	DIRETO	diferença	ESPELHO	DIRETO	diferença
MB	x	108,311	108,311	0,000	83,444	83,445	0,001
	y	76,913	76,913	0,000	84,345	84,347	0,001
	z	99,943	99,943	0,000	99,899	99,892	-0,008
M8	x	108,503	108,506	-0,003	83,590	83,590	-0,001
	y	77,034	77,030	0,004	84,208	84,206	-0,001
	z	99,942	99,939	0,003	99,891	99,898	0,008
M7	x	108,654	108,659	-0,005	83,717	83,714	-0,004
	y	77,131	77,126	0,005	84,096	84,094	-0,002
	z	99,937	99,941	-0,005	99,888	99,899	0,011
M6	x	108,811	108,817	-0,006	83,881	83,875	-0,007
	y	77,232	77,223	0,009	83,951	83,946	-0,005
	z	99,934	99,939	-0,005	99,892	99,889	-0,002
M5	x	108,961	108,971	-0,009	84,030	84,022	-0,007
	y	77,331	77,318	0,014	83,817	83,811	-0,006
	z	99,932	99,938	-0,006	99,884	99,895	0,010
MC	x	109,147	109,154	-0,007	84,196	84,189	0,006
	y	77,460	77,453	0,007	83,688	83,681	0,006
	z	99,911	99,959	-0,049	99,872	99,907	-0,036
M4	x	109,344	109,349	-0,005	84,323	84,315	0,008
	y	77,555	77,551	0,004	83,548	83,540	0,008
	z	99,925	99,936	-0,011	99,883	99,888	-0,006
M3	x	109,495	109,500	-0,004	84,442	84,438	0,004
	y	77,646	77,644	0,002	83,430	83,426	0,004
	z	99,920	99,939	-0,019	99,879	99,889	-0,010
M2	x	109,653	109,657	-0,003	84,556	84,552	0,004
	y	77,740	77,739	0,001	83,322	83,321	0,001
	z	99,917	99,937	-0,020	99,877	99,888	-0,011
M1	x	109,786	109,791	-0,005	84,733	84,734	-0,001
	y	77,824	77,822	0,002	83,152	83,152	0,000
	z	99,910	99,942	-0,032	99,870	99,891	-0,022
MA	x	110,008	110,013	-0,005	84,909	84,915	-0,006
	y	77,968	77,963	0,005	82,990	82,996	-0,006
	z	99,908	99,939	-0,031	99,868	99,888	-0,020

TABELA 18 – COORDENADAS OBTIDAS NOS TESTES 3 E 4

Na Tabela 19, lista-se as diferenças entre as distâncias obtidas diretamente e através do espelho para os testes 3 e 4.

alvos	DISTÂNCIAS (METROS)					
	TESTE 3			TESTE 4		
	ESPELHO	DIRETO	diferença	ESPELHO	DIRETO	diferença
MA -> M1	0,265	0,263	0,002	0,201	0,202	-0,001
M1 -> M2	0,157	0,157	0,000	0,169	0,167	0,002
M2 -> M3	0,184	0,184	0,000	0,219	0,219	0,000
M3 -> M4	0,177	0,176	0,000	0,200	0,200	0,000
M4 -> MC	0,219	0,219	0,000	0,211	0,212	-0,001
MC -> M5	0,227	0,229	-0,002	0,189	0,190	0,000
M5 -> M6	0,181	0,180	0,000	0,167	0,168	-0,001
M6 -> M7	0,186	0,185	0,001	0,157	0,155	0,002
M7 -> M8	0,180	0,180	0,000	0,245	0,248	-0,003
M8 -> MB	0,227	0,228	-0,001	0,240	0,240	0,000
MA -> MB	1,999	1,998	0,001	1,996	1,997	-0,001

TABELA 19 – DISTÂNCIAS OBTIDAS NOS TESTES 3 E 4

Na Tabela 20, visualiza-se os resultados obtidos para as distâncias horizontais, entre os alvos da mira horizontal de invar, obtidas através do espelho e na calibração com o interferômetro.

alvos	DISTÂNCIAS HORIZONTAIS (METROS)		
	ESPELHO	INTERFERÔMETRO	diferença
M1 -> M2	0,157	0,157	0,000
M2 -> M3	0,184	0,184	0,000
M3 -> M4	0,176	0,176	0,000
M4 -> M5	0,443	0,444	-0,001
M5 -> M6	0,181	0,180	0,000
M6 -> M7	0,186	0,185	0,001
M7 -> M8	0,180	0,180	0,000

TABELA 20 – DISTÂNCIAS HORIZONTAIS DO TESTE 3

Na Tabela 21, encontram-se os resultados das distâncias, entre os alvos da mira horizontal de ínvar, obtidas diretamente e através do espelho, para o teste 5.

Alvos	DISTÂNCIAS (METROS)		
	ESPELHO	DIRETO	diferença
MA -> M 1	0,201	0,202	-0,001
M1 -> M2	0,169	0,167	0,002
M2 -> M3	0,219	0,219	0,000
M3 -> M4	0,200	0,200	0,000
M4 -> MC	0,211	0,212	-0,001
MC -> M5	0,189	0,190	-0,001
M5 -> M6	0,168	0,168	0,000
M6 -> M7	0,158	0,155	0,002

TABELA 21 – DISTÂNCIAS DO TESTE 5

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES

O espelho utilizado no desenvolvimento do projeto, apesar de ter sido fabricado por um profissional especialista em equipamentos topográficos, apresentou pequenas rugosidades na superfície podendo ser uma causa dos desvios ocorridos nas visadas.

O suporte para o espelho, projetado e desenvolvido para permitir o desvio da visada da estação total e, com isso, visualizar o alvo apresentou-se eficiente. Porém, algumas adaptações, que serão apresentadas nas recomendações, são necessárias para otimizar o levantamento.

Os equipamentos usados para gravar os alvos de referência do espelho não garantiram uma perfeita ortogonalidade (desvio de aproximadamente um minuto de arco), fato detectado no processo de calibração. Por esse motivo para a definição do sistema do espelho, foi utilizado apenas o alinhamento E1-E2 coincidente com o eixo Y' . Os eixos X' e Z' , foram determinados por meio de cálculos. Em virtude disso, utilizou-se somente dois alvos para definir um eixo do sistema do espelho e o complemento do sistema foi determinado através de cálculo.

Os alvos gravados na mira horizontal de ínvar simularam de forma satisfatória os pontos em que desejava-se determinar as coordenadas desviando a visada da estação total. Um inconveniente encontrado nesses alvos refere-se a sua dimensão. Em função da espessura dos traços ortogonais, que definem o alvo, foi necessário um número maior de leituras durante o processo de calibração, leitura do lado esquerdo e direito do alvo, para definir a distância entre os mesmos. Isso também ocorreu quando da calibração dos alvos de referência gravados no espelho.

Comparando as coordenadas tridimensionais, obtidas de forma direta com as coordenadas obtidas com o desvio da visada utilizando o espelho, foram encontradas diferenças, na maioria dos casos, de poucos milímetros. Porém houve situações em que essas diferenças foram na ordem de centímetros, recomenda-se a

continuidade dos estudos para identificar as causas. Apesar dessas diferenças encontradas nas coordenadas, quando comparam-se as distâncias entre os alvos, observou-se que as diferenças estão na ordem de milímetros, ou seja, dentro da precisão estimada considerando a precisão nominal do equipamento utilizado.

Os testes realizados mostraram a necessidade de repetir a leitura de pelo menos um alvo quando realiza-se a rotação do espelho. Com essa informação é possível calcular um fator de correção que deve ser aplicado nas leituras obtidas na segunda posição do espelho para relacioná-las com o conjunto de observações obtidas na primeira posição do espelho.

Nos testes realizados detectou-se que quando ocorre uma variação significativa no ângulo vertical (superior a aproximadamente dois graus para uma distância de até cinquenta metros), existe a necessidade de conhecer as coordenadas tridimensionais de pelo menos um alvo de interesse, nessa nova linha de alvos, cujas coordenadas serão determinadas. Se o objetivo é a determinação de distâncias horizontais entre alvos, é necessário repetir a observação de pelo menos um alvo a cada mudança de posição do espelho, como visto anteriormente.

Outro fato detectado é que quanto mais próxima a estação total estiver do espelho e os alvos afastados (acima de vinte metros) os resultados são melhores. Atribui-se isso a menor necessidade de mudança da posição do espelho, e com isso minimizar os efeitos da falta de planicidade do mesmo.

5.2 RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se o desenvolvimento de um sistema micrométrico para o movimento vertical e horizontal do suporte do espelho. Isto viabiliza pequenos deslocamentos do sistema facilitando a pontaria de diferentes alvos.

Indica-se a utilização de um espelho com diâmetro menor (dois centímetros) para minimizar os efeitos da rugosidade e planicidade do espelho.

Aconselha-se a realização de testes utilizando dois sistemas de reflexão, um em cada extremidade do objeto a ser medido e integrá-las no mesmo sistema objetivando modelar o objeto.

Recomenda-se a aplicação do método para determinar coordenadas de um

conjunto de pontos alinhados e outros alinhamentos com variações significativas do ângulo vertical ($< 5^\circ$) e avaliar os resultados.

Continuar o desenvolvimento matemático, utilizando diversas disposições de pontos a serem observados buscando uma generalização da aplicação da metodologia trabalhada.

6 COOPERAÇÃO E/OU SUPORTE PARA SUA REALIZAÇÃO

- a) Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas;
- b) Conselho Nacional de Ensino e Pesquisa – CNPQ, com a disponibilização da bolsa de estudo;
- c) Literatura disponível na biblioteca do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná;
- d) Literatura disponível na Internet;
- e) Infra-estrutura do Laboratório de Instrumentação Geodésica;
- f) Projeto de automação da instrumentação de auscultação geodésica de controle e segurança da barragem de Salto Caxias;
- g) A estrutura proporcionada pelo LAIG e pelo do grupo de pesquisa Geodésia Aplicada a Engenharia.

8 REFERÊNCIAS

AHAMED, F. A., **Range determination using target images**. Journal of Surveying Engineering, Volume 120, Issue 4, pp. 135-144. 1994

ALONSO, M., FINN, E. J., **Física um curso universitário**. Tradução: Giorrio Moscati. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1972. 365p.

BARTHEM, R. **A luz**. 1ª edição. São Paulo: Livraria da Física, 2005. 114 p.

BOSCHI FILHO., H. **[O espectro eletromagnético]**. Disponível em: <http://omnis.if.ufrj.br/~boschi/ensino/basico/Fisica4/2006-/Fisica_4_IFA+OV1_2006_2.html> Acesso em: 25/04/2007.

CABRAL, A., REBORDÃO, J.M., **Metrologia absoluta de comprimento por interferometria de varrimento de frequência**. Disponível em:<http://www.spmet.pt/comunicacoes_2_encontro/Alexandre_Cabral.pdf> Acessado em: 09/10/2008:

CASTAÑEDA FILHO, R. M. **Ensaio para definição de parâmetros de transformação entre o SAD69 e o NSWC 922**. Curitiba, 1986. 170 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná.

CEBRACE, **[Espelho]**. Disponível em: <<http://www.cebrace.com.br/Telas/Produtos/Espelhos.asp>> Acesso em: 20/05/2006.

CENTENO, J. A. S. **Sensoriamento remoto e processamento de imagens digitais**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2004. 219 p.

CESAR, C. D. D. **Curso elementar de física – tomo IV**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1966. 144 p.

CORDINI, J. **Determinação do erro cíclico em distânciômetros eletrônicos**. Curitiba, 1991. 138 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná.

CORDINI, J. **Topografia 1 – planimetria**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <<http://www.topografia.ufsc.br/cap9-5.html>> Acesso em: 17/09/2009

FAGGION, P. L. **Obtenção dos elementos de calibração e certificação de medidores eletrônicos de distância em campo e laboratório**. Curitiba, 2001. 130 p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná.

FRAZÃO, J. M. A., RAMOS, F. M. V., BHATT, M. L. **Laser de corantes e aplicações**. Lisboa: Centro de Física Molecular da Universidade Técnica de Lisboa. 2005. <<http://www.deetc.isel.ipl.pt/jetc05/JETC05/Artigos/Electronica/Poster%20E/026.doc>> Acesso em: 06/03/2007.

GAVINHO, L. G. **Novo método de caracterização de ondulações em superfícies por difração de raios X**. Curitiba, 2005. Dissertação, Universidade Federal do Paraná.

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações**. Curitiba, 1994. 319 p. Editora UFPR.

GOLDEMBERG, J., **Física geral e experimental - volume 3**. São Paulo, 1973. Companhia Editora Nacional. 220p.

HALLIDAY, D., RESNICK, R. **Física – parte II**. Tradução: Euclides Cavallari e Bento Afini Júnior. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico. 1966. 1440 p.

HALLIDAY, D., RESNICK, R., MERRILL, J. **Fundamentos de física: ótica e física moderna**. 4ª edição. Tradução: Denise Helena da Silva Sotero et al. Rio de Janeiro: Livros Técnico e Científicos, 1995. 355 p.

HECHT, E., **Optics second edition**. Adelphi: Addison-Wesley, Adelphi University, 1990. 676 p.

HECHT, E., **Optics**. 3ª edição. Tradução: José Manuel N. V. Rebordão. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian. 2002. 790 p.

HECHT, J., **The laser guidebook**. Singapore: McGraw-Hill, 1986. 380 p.

HORIHARAN, P., **Interferometers**. United States of America: McGraw-Hill, 1995. Handbook of optica, 2ª edição. Chapter 21.

JENKINS, F. A., WHITE, H. E., **Fundamentals of Optics**. 4ª edição. Singapore: McGraw-Hill, 1976. 746 p.

KAHMEN, H., FAIG, W. **Surveying**. Berlim: Walter Gruyter e Co, 1988. 578 p.

KING II, G., EIKLENBORG, M., VILCHECK, M., IOANNOU, S. **Quality control of high precision optical mirrors**. Engineering 801: Engineering Management – Project 2: Quality Control, 1998. San Francisco State University. Disponível em: <<http://online.sfsu.edu/~gtarakji/engr801/wordoc/quality1.htm>> Acesso em: 19/09/2007

LEICA TC403 L, (1998). **Manual de uso**. Heerbrugg: Suíça.

LEICA TPS 1200, (2004). **Manual de uso**. Heerbrugg: Suíça.

MAGALHÃES, R. C. A. **Sistema para erro de medição de planicidade**. São Carlos, 2006. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

MEYER-ARENDET, J. R. **Introduction to classical and modern optics**. Chicago: Prentice Hall, 1995. 431 p.

NADAL, C. A. **Interseção óptica tridimensional aplicada à engenharia de precisão**. Curitiba, 2000. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná.

NASA, **Guideline for Use of Fizeau Interferometer in Optical Testing**. Public Lessons Learned Entry: 0717.GSFC Submitted by: Wilson Harkins. 1999. Disponível em: <<http://www.nasa.gov/offices/oce/llis/0717.html>> Acesso em:

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de física básica – ótica, relatividade e física quântica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1998. v.4 p.3-18.

ONO, L. K., **Introdução à óptica reprodução da experiência : interferômetro de Michelson**. USP – Instituto de Física – FGE 327, 2009.

ÓTICA, Lyon: Universite Claude Bernard. Disponível em: <http://handy.univlyon1.fr/insa/pedago/physique/1a/AM1APhyporfisicaoptica_corrige.doc> Acesso em: 04/05/2006

RESTIVO, M. T., VILLATE, J., CHOUZAL, M. F., MONTEIRO, J., **Avaliação de um objecto de aprendizagem**. In: 5º Congresso de Engenharia Luso-Moçambicana de Engenharia / 2º Congresso de Engenharia de Moçambique. Maputo Artigo ref. 20A011. 2008

RICCI, T. F., **Teoria da relatividade especial**. UFRGS, Porto Alegre. Instituto de Física, 2001. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/~ricci/textos/relatividadederestrta/relatividadegalileana.html>> Acesso em: 26/08/2007.

RUEGER, J. M. **Electronic distance measurement: An introduction**. Berlin: Springer, 1996. 276 p.

SCHIEL, D., **Ótica**. Programa Educar. Universidade de São Paulo, São Carlos. CDCC – Centro de Divulgação Científica e Cultural. Disponível em: <<http://educar.sc.usp.br/optica/reflexao.htm>> Acesso em: 18/05/2009.

SCHIEL, D., **Ótica**. Programa Educar. Universidade de São Paulo, São Carlos. CDCC – Centro de Divulgação Científica e Cultural. Disponível em: <<http://educar.sc.usp.br/licenciatura/2001/laser/index.htm>> Acesso em: 18/05/2009.

TIPLER, P. A. **Física para cientistas e engenheiros– eletricidade e magnetismo, ótica.** New York: W. H. Freeman and Company. 2000. 476 p.

TRASFERETTI, B.C., DAVANZO, C.U., **Introdução às técnicas de reflexão especular e reflexão-absorção no infravermelho: (1) reflexão especular.** Quimica Nova, volume 24, no. 1, 94-98, 2001< <http://www.scielo.br/pdf/qn/v24n1/4455.pdf>> Acesso em: 05/10/2007.

TRIMBLE 3300, (2001). **Manual de uso.** Germany.

TRIMBLE ZEISS ELTA S, (2001). **Manual de uso.** Ohio: U.S.A.

VALLADARES, R. J. C. **Geometria analítica: a álgebra e a geometria do plano e do espaço.** Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 1990. 344 p.

VANÍCEK, P.; KRAKIWSKY, E. J. **Geodesy: the Concepts.** 2. ed., 6. print. Amsterdam: Elsevier, 1986. xv, 697 p.

VEIGA, L. A. K., ZANETTI, M. A. Z., FAGGION, P. L., **Fundamentos de topografia.** Curitiba, 2007. 205 p. Apostila Disciplina de Topografia. Departamento de Geomática, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

VENTURI, J.J.**Álgebra vetorial e geometria analítica.** 3ª edição. Curitiba: Scientia et Labor - UFPR. 1990. 215 p.

VICENTE, F.S., CASTRO, A.C., **Laser: que luz é essa?** São Carlos, 2002. Revista Eletrônica de Ciências no. 07. Disponível em:<http://www.cdcc.usp.br/ciencia/artigos/art_07/laser.html> Acesso em:06/03/2007

ZILO, S. C., **Ótica.** São Paulo, 2007. Disponível em:<<http://efisica.if.usp.br/optica/universitario/interferencia/young/>> Acesso em: 02/02/2009.

ANEXO I

Observações do teste 3 (visadas desviadas pelo espelho).

Posição Espelho	Alvo	Direção Horizontal	Distância Zenital	Distância Inclinada	Distância Total	
1	E S P E L H O	E1	268°05'56"	89°09'26"	3,202	
		E2	269°37'11"	89°09'55"	3,151	
		E3	268°04'44"	90°57'28"	3,204	
		E4	269°36'19"	90°59'45"	3,152	
	M I R A	MB	268°06'12"	89°52'28"	3,202	28,901
		M8	268°33'04"	89°52'53"	3,186	28,885
		M7	268°54'25"	89°52'36"	3,174	28,872
		M6	269°16'26"	89°52'46"	3,161	28,859
		M5	269°37'51"	89°52'58"	3,149	28,846
	2	E S P E L H O	E1	268°05'32"	89°09'28"	3,203
E2			269°37'42"	89°09'51"	3,151	
E3			268°04'33"	90°57'27"	3,204	
E4			269°36'47"	90°59'44"	3,152	
M I R A		M6	267°48'24"	89°52'58"	3,211	28,858
		M5	268°09'52"	89°53'03"	3,199	28,847
		MC	268°36'44"	89°50'25"	3,184	28,817
		M4	269°02'43"	89°53'06"	3,169	28,826
		M3	269°23'43"	89°52'48"	3,157	28,819
		M2	269°45'39"	89°52'50"	3,145	28,813

Posição Espelho	Alvo	Direção Horizontal	Distância Zenital	Distância Inclinada	Distância Total	
3	E S P E L H O	E1	268°05'41"	89°09'27"	3,202	
		E2	269°38'18"	89°09'54"	3,152	
		E3	268°04'27"	90°57'29"	3,203	
		E4	269°37'23"	90°59'46"	3,152	
	M I R A	E3	268°18'12"	89°52'57"	3,195	28,819
		E2	268°40'06"	89°53'03"	3,182	28,813
		E1	268°58'49"	89°52'25"	3,172	28,809
		EA	269°30'15"	89°52'44"	3,154	28,798

Observações do teste 3 (visada direta).

Alvos	Direção Horizontal	Distância Zenital	Distância Inclinada
MB	160°12'07"	90°07'57"	24,537
M8	159°40'49"	90°08'32"	24,494
M7	159°15'58"	90°08'15"	24,458
M6	158°50'21"	90°08'32"	24,424
M5	158°25'19"	90°08'47"	24,392
MC	157°54'09"	90°05'44"	24,335
M4	157°23'24"	90°09'00"	24,318
M3	156°58'42"	90°08'40"	24,291
M2	156°32'56"	90°08'53"	24,265
M1	156°10'50"	90°08'14"	24,243
MA	155°33'47"	90°08'42"	24,205

Observações do teste 4 (visadas desviadas pelo espelho).

Posição Espelho	Alvo	Direção Horizontal	Distância Zenital	Distância Inclinada	Distância Total	
1	E S P E L H O	E1	360°00'14"	88°46'44"	3,519	
		E2	1°30'59"	88°46'44"	3,487	
		E3	1°30'38"	90°25'09"	3,485	
		E4	359°59'36"	90°24'05"	3,518	
	M I R A	MB	0°11'02"	89°31'11"	3,514	28,905
		M8	0°34'47"	89°30'16"	3,505	28,918
		M7	0°54'51"	89°30'08"	3,498	28,925
		M6	1°20'47"	89°31'09"	3,488	28,935
		M5	1°44'29"	89°30'25"	3,480	28,948
	2	E S P E L H O	E1	0°00'15"	88°46'41"	3,519
E2			1°31'27"	88°46'44"	3,487	
E3			1°31'03"	90°25'08"	3,486	
E4			359°59'35"	90°24'04"	3,519	
M I R A		M6	0°14'46"	89°31'03"	3,513	28,935
		M5	0°38'19"	89°30'19"	3,504	28,948
		MC	1°03'23"	89°28'45"	3,495	28,943
		M4	1°25'27"	89°30'53"	3,487	28,973

Posição Espelho	Alvo	Direção Horizontal	Distância Zenital	Distância Inclinada	Distância Total	
3	E S P E L H O	E1	359°59'54"	88°46'40"	3,518	
		E2	1°31'38"	88°46'49"	3,486	
		E3	1°31'16"	90°25'07"	3,486	
		E4	359°59'27"	90°24'08"	3,521	
	M I R A	MC	359°47'15"	89°28'37"	3,522	28,942
		M4	0°09'20"	89°30'43"	3,514	28,974
		M3	0°29'09"	89°30'35"	3,507	28,988
		M2	0°47'47"	89°30'35"	3,501	29,002
		M1	1°16'41"	89°30'01"	3,491	29,026
		MA	1°44'59"	89°30'20"	3,482	29,047

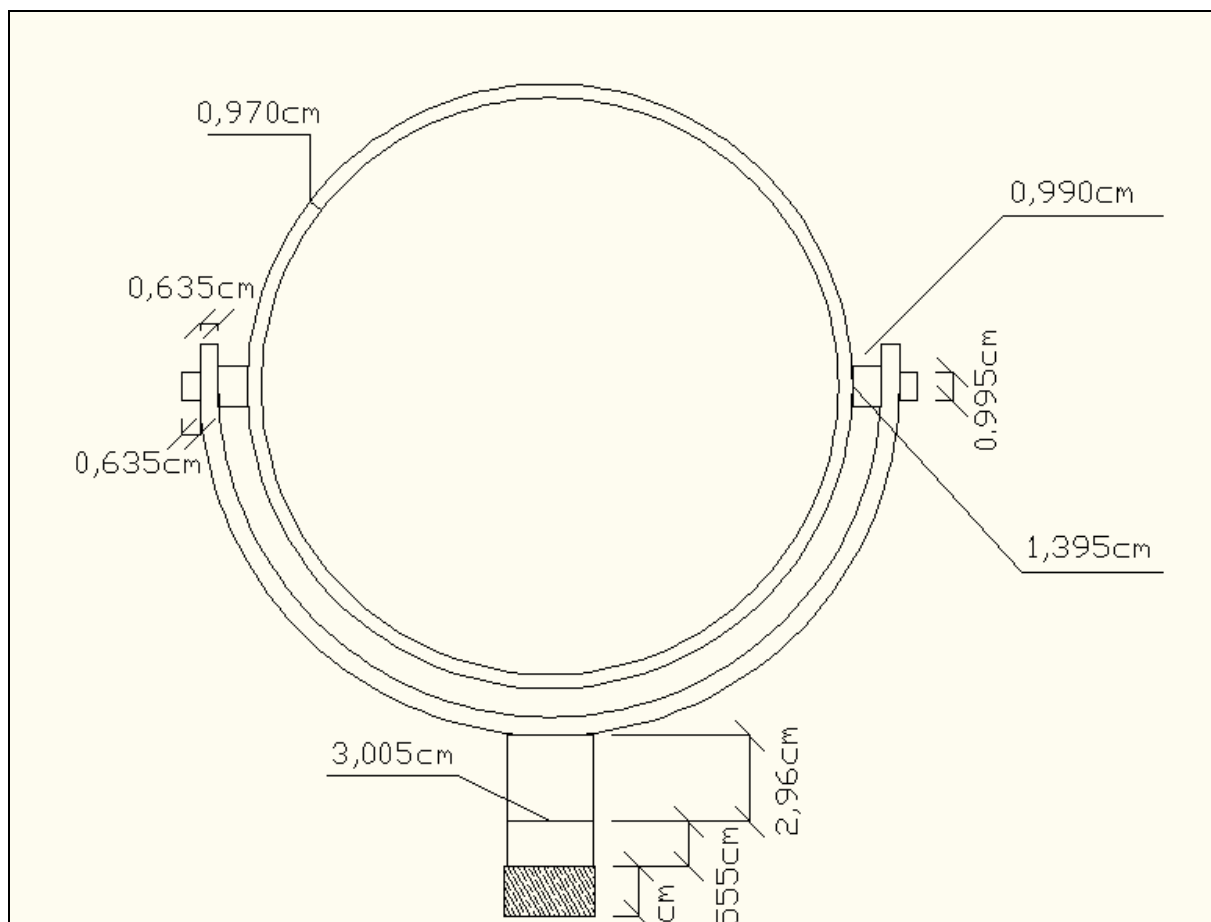
Observações do teste 4 (visada direta).

Alvos	Direção Horizontal	Distância Zenital	Distância Inclinada
MB	226°36'12"	90°16'22"	22,784
M8	225°53'15"	90°15'18"	22,776
M7	225°53'11"	90°15'20"	22,765
M6	225°07'35"	90°16'44"	22,755
M5	224°37'24"	90°15'57"	22,746
MC	224°05'40"	90°14'01"	22,722
M4	223°37'11"	90°16'53"	22,737
M3	223°11'48"	90°16'50"	22,735
M2	222°48'19"	90°16'58"	22,734
M1	222°10'52"	90°16'26"	22,736
MA	221°34'36"	90°16'58"	22,731

Observações do teste 5 (visadas desviadas pelo espelho).

Posição Espelho	Alvo	Direção Horizontal	Distância Zenital	Distância Inclinada	Distância Total	
1	E S P E L H O	E1	332°18'00"	88°06'35"	2,717	
		E2	334°10'53"	88°06'10"	2,674	
		E3	332°17'06"	89°12'27"	2,717	
		E4	334°10'20"	90°14'09"	2,675	
	M I R A	MA	333°22'51"	89°08'49"	2,691	29,128
		M1	333°46'19"	89°07'49"	2,683	29,095
		M2	334°06'01"	89°07'38"	2,675	29,067
		M3	334°31'36"	89°08'34"	2,666	29,032
2	E S P E L H O	E1	332°18'00"	88°06'32"	2,716	
		E2	334°11'50"	88°06'12"	2,675	
		E3	332°16'52"	90°12'30"	2,717	
		E4	334°11'05"	90°14'10"	2,675	
	M I R A	M3	332°05'19"	89°08'05"	2,720	29,066
		M4	332°30'54"	89°08'58"	2,710	29,032
		M5	332°54'16"	89°08'09"	2,701	29,001
		MC	333°18'39"	89°06'26"	2,693	28,954
		M6	333°40'55"	89°08'33"	2,684	28,946
		M7	334°00'45"	89°08'22"	2,678	28,923

ANEXO II



ANEXO III

Rotina computacional desenvolvido utilizando o matlab.

```
clear all
%%
%% *****
%% *
%% *           ESPELHO DOIS ALVOS           *
%% *
%% *****

pto1=[332.1737;
      88.0632;
      2.715];

pto2=[334.1217;
      88.0617;
      2.675];

pto4=[334.1135;
      90.1406;
      2.675];

pto3=[332.1636;
      90.1227;
      2.715];

esp=[333.1646;
     89.0802;
     2.693];

disT=28.878;

apoio=[0;
       0;
       0];
```

```

apoioes=[333.4454;
          89.0818;
          2.684];

disTapoio=28.847;

alvo=[ 0.0000;
       0.0000;
       0.0000];

%
% *****
% *
% *          TRANSFORMAR GRAUS EM RADIANS          *
% *
% *
% *****

pto1rad(1,1)=radianos (pto1 (1,1) , 2) ;
pto1rad(2,1)=radianos (pto1 (2,1) , 2) ;
pto1rad(3,1)=pto1 (3,1) ;

pto2rad(1,1)=radianos (pto2 (1,1) , 2) ;
pto2rad(2,1)=radianos (pto2 (2,1) , 2) ;
pto2rad(3,1)=pto2 (3,1) ;

pto3rad(1,1)=radianos (pto3 (1,1) , 2) ;
pto3rad(2,1)=radianos (pto3 (2,1) , 2) ;
pto3rad(3,1)=pto3 (3,1) ;

pto4rad(1,1)=radianos (pto4 (1,1) , 2) ;
pto4rad(2,1)=radianos (pto4 (2,1) , 2) ;
pto4rad(3,1)=pto4 (3,1) ;

esprad(1,1)=radianos (esp (1,1) , 2) ;
esprad(2,1)=radianos (esp (2,1) , 2) ;
esprad(3,1)=esp (3,1) ;

apoiorad(1,1)=radianos (apoio (1,1) , 2) ;
apoiorad(2,1)=radianos (apoio (2,1) , 2) ;
apoiorad(3,1)=apoio (3,1) ;

apoioesrad(1,1)=radianos (apoioes (1,1) , 2) ;
apoioesrad(2,1)=radianos (apoioes (2,1) , 2) ;
apoioesrad(3,1)=apoioes (3,1) ;

alvorad(1,1)=radianos (alvo (1,1) , 2) ;
alvorad(2,1)=radianos (alvo (2,1) , 2) ;
alvorad(3,1)=alvo (3,1) ;

```



```

function radi=radianos(ang,n)

i=1;
while i<n
    %Transformação angulo horizontal pd
    % e pi em grau minuto e segundo (separados)
    gHH(i)=fix(ang(i));
    mHHaux(i)=(ang(i)-gHH(i))*100;
    mHH(i)=fix(mHHaux(i));
    sHH(i)=(mHHaux(i)-mHH(i))*100;
    %grau em grau sexagesimal
    gsHH(i)=(((sHH(i)/60)+mHH(i))/60)+gHH(i);
    %em radianos
    radi(i)=gsHH(i)*pi/180;

    i=i+1;
end

function PTO=coor(ori,rad)

PTO(1,1)=ori(1,1)+rad(3,1)*sin(rad(2,1))*sin(rad(1,1));
PTO(2,1)=ori(2,1)+rad(3,1)*sin(rad(2,1))*cos(rad(1,1));
PTO(3,1)=ori(3,1)+rad(3,1)*cos(rad(2,1));

function [alvofinal,apoiofinal]=espelho(origem,coo1,coo2,coo3,coo4,alvoaux,
    apoio,cooesp,apoioesp,apoioaux,alvo)

%%
%%
%% *****
%% *
%% *
%% *
%% *
%% *
%% *
%% *****
%%
%%
%% *****
%% *
%% *
%% *
%% *
%% *****

vetor12=coo2-coo1;
vetor13=coo3-coo1;

```

```

%
% *****
% *
% *          VERSOR NORMAL AO PLANO DO ESPELHO          *
% *
% *****
versor=versornormal(vetor12,vetor13);

%
% *****
% *
% *   COORDENADA DOS PONTOS NO SISTEMA DO ESPELHO   *
% *
% *****

% Definir eixo X, Y e Z

[eixoX,eixoY,eixoZ]=deteixo(vetor12,versor);
origemp=projecao(eixoX,eixoY,eixoZ,cool,origem);
alvoauxp=projecao(eixoX,eixoY,eixoZ,cool,alvoaux);
apoioauxp=projecao(eixoX,eixoY,eixoZ,cool,apoioaux);
espp=projecao(eixoX,eixoY,eixoZ,cool,cooesp);
apoioespp=projecao(eixoX,eixoY,eixoZ,cool,apoioespp);
coolp=projecao(eixoX,eixoY,eixoZ,cool,cool);
coo2p=projecao(eixoX,eixoY,eixoZ,cool,coo2);
coo3p=projecao(eixoX,eixoY,eixoZ,cool,coo3);
coo4p=projecao(eixoX,eixoY,eixoZ,cool,coo4);
alvop=projecao(eixoX,eixoY,eixoZ,cool,alvo)

%
% *****
% *
% *   TRANSFORMACAO AFIM                               *
% *
% *****

[matrizro,matriztrans]=afim(origem,cool,coo2,coo3,
                             coo4,origemp,coolp,coo2p,coo3p,coo4p);

coolafim=(matrizro*cool)+matriztrans;
coo2afim=(matrizro*coo2)+matriztrans;
coo3afim=(matrizro*coo3)+matriztrans;
coo4afim=(matrizro*coo4)+matriztrans;
cooespafim=(matrizro*cooesp)+matriztrans;

```

```

apoioespafim=(matrizro*apoioesp)+matriztrans;
origemafim=(matrizro*origem)+matriztrans;
alvoauxafim=(matrizro*alvoaux)+matriztrans;
apoioauxafim=(matrizro*apoioaux)+matriztrans;

% *****
% *
% *   DETERMINACAO DAS COORDENADAS FINAIS DO ALVO   *
% *
% *****

delta=alvoauxafim-cooespafim;

deltaap=apoioauxafim-apoioespafim;

alvo=[cooespafim(1,1)-delta(1,1);
      alvoauxafim(2,1);
      cooespafim(3,1)-delta(3,1)];

apoioooo=[apoioespafim(1,1)-deltaap(1,1);
          apoioauxafim(2,1);
          apoioespafim(3,1)-deltaap(3,1)];

alvofinal=inv(matrizro)*(alvo-matriztrans);
apoiofinal=inv(matrizro)*(apoioooo-matriztrans);

difapoio=apoio-apoiofinal;
difesp=alvo-alvofinal;

function [versor,n]=versornormal(vetor12,vetor13)

n=[vetor13(2,1)*vetor12(3,1)-vetor13(3,1)*vetor12(2,1);
   vetor13(3,1)*vetor12(1,1)-vetor13(1,1)*vetor12(3,1);
   vetor13(1,1)*vetor12(2,1)-vetor13(2,1)*vetor12(1,1)];

versor=n/sqrt(dot(n,n));

```



```

function [eixox,eixoy,eixoz]=deteixo(vetor1,versor)

eixox=[vetor1(2,1)*versor(3,1)-vetor1(3,1)*versor(2,1);
       vetor1(3,1)*versor(1,1)-vetor1(1,1)*versor(3,1);
       vetor1(1,1)*versor(2,1)-vetor1(2,1)*versor(1,1)];

eixoy=vetor1;

eixoz=versor;

```

```

function pro=projecao(ex,ey,ez,ptol,ptoi)
pto=ptoi-ptol;
pro=[(dot(ex,pto))/(sqrt(dot(ex,ex)));
     (dot(ey,pto))/(sqrt(dot(ey,ey)));
     (dot(ez,pto))/(sqrt(dot(ez,ez)))]];

```

```

function [rota,trans]=afim(origem,coo1,coo2,coo3,coo4,
                           origemp,coo1p,coo2p,coo3p,coo4p)

A(1,1)=origem(1,1);
A(1,2)=origem(2,1);
A(1,3)=origem(3,1);
A(1,4)=1;

A(2,5)=origem(1,1);
A(2,6)=origem(2,1);
A(2,7)=origem(3,1);
A(2,8)=1;

A(3,9)=origem(1,1);
A(3,10)=origem(2,1);
A(3,11)=origem(3,1);
A(3,12)=1;

A(4,1)=coo1(1,1);
A(4,2)=coo1(2,1);
A(4,3)=coo1(3,1);
A(4,4)=1;

```

```
A(5,6)=coo1(2,1);  
A(5,7)=coo1(3,1);  
A(5,8)=1;
```

```
A(6,9)=coo1(1,1);  
A(6,10)=coo1(2,1);  
A(6,11)=coo1(3,1);  
A(6,12)=1;
```

```
A(7,1)=coo2(1,1);  
A(7,2)=coo2(2,1);  
A(7,3)=coo2(3,1);  
A(7,4)=1;
```

```
A(8,5)=coo2(1,1);  
A(8,6)=coo2(2,1);  
A(8,7)=coo2(3,1);  
A(8,8)=1;
```

```
A(9,9)=coo2(1,1);  
A(9,10)=coo2(2,1);  
A(9,11)=coo2(3,1);  
A(9,12)=1;
```

```
A(10,1)=coo3(1,1);  
A(10,2)=coo3(2,1);  
A(10,3)=coo3(3,1);  
A(10,4)=1;
```

```
A(11,5)=coo3(1,1);  
A(11,6)=coo3(2,1);  
A(11,7)=coo3(3,1);  
A(11,8)=1;
```

```
A(12,9)=coo3(1,1);  
A(12,10)=coo3(2,1);  
A(12,11)=coo3(3,1);  
A(12,12)=1;
```

```
A(13,1)=coo4(1,1);  
A(13,2)=coo4(2,1);  
A(13,3)=coo4(3,1);  
A(13,4)=1;
```

```
A(14,5)=coo4(1,1);  
A(14,6)=coo4(2,1);  
A(14,7)=coo4(3,1);  
A(14,8)=1;
```

```
A(15,9)=coo4(1,1);  
A(15,10)=coo4(2,1);  
A(15,11)=coo4(3,1);  
A(15,12)=1;
```

```
P(15,15)=0;
i=1;

while i<16
    P(i,i)=1;
    i=i+1;
end

L=[origemp; coolp; coo2p; coo3p; coo4p];

NN=A'*P*A;
U=A'*P*L;
X=(inv(NN))*U;

rota=[X(1,1) X(2,1) X(3,1);
      X(5,1) X(6,1) X(7,1);
      X(9,1) X(10,1) X(11,1)];

trans=[X(4,1); X(8,1); X(12,1)];
```