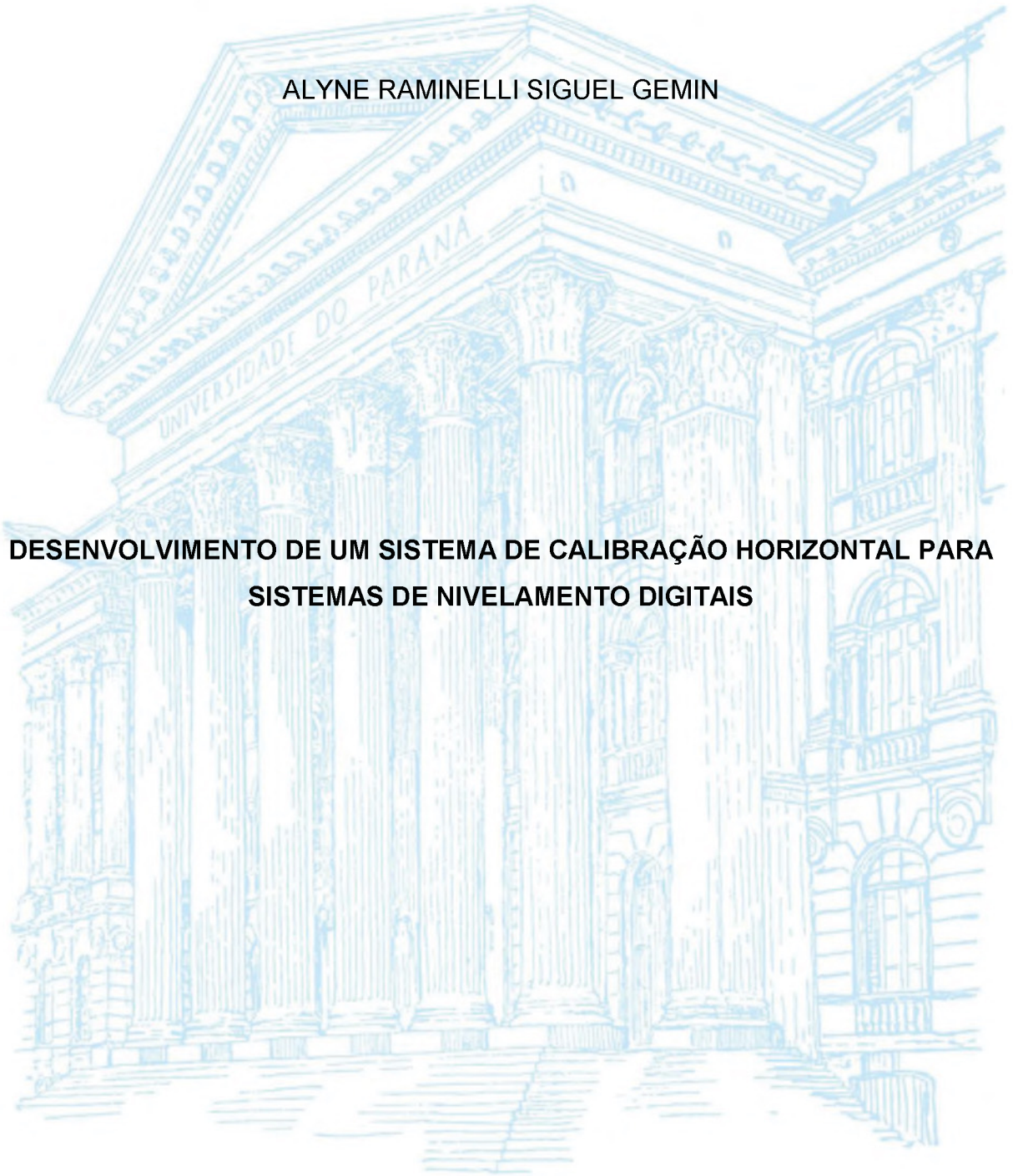


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ALYNE RAMINELLI SIGUEL GEMIN

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CALIBRAÇÃO HORIZONTAL PARA
SISTEMAS DE NIVELAMENTO DIGITAIS**



CURITIBA

2017

ALYNE RAMINELLI SIGUEL GEMIN

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CALIBRAÇÃO HORIZONTAL PARA
SISTEMAS DE NIVELAMENTO DIGITAIS**

Tese apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor em Ciências Geodésicas, no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Geomática, da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Luís Faggion
Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Érica Santos Matos

CURITIBA
2017

G322d

Gemin, Alyne Raminelli Siguel
Desenvolvimento de um sistema de calibração horizontal para sistemas de nivelamento digitais /
Alyne Raminelli Siguel Gemin. – Curitiba, 2017.
134 f. : il. color. ; 30 cm.

Tese - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação
em Ciências Geodésicas, 2017.

Orientador: Pedro Luís Faggion.
Coorientadora: Érica Santos Matos.

1. Sistema de nivelamento digital. 2. Instrumentação. 3. Sistema de calibração horizontal.
I. Universidade Federal do Paraná. II. Faggion, Pedro Luís. III. Matos, Érica Santos. IV. Título.

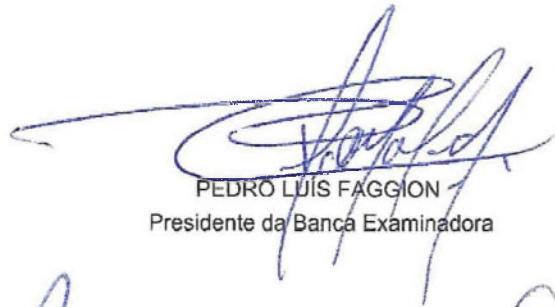
CDD: 526.1

TERMO DE APROVAÇÃO


Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS GEODÉSICAS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **ALYNE RAMINELLI SIGUEL GEMIN** intitulada: **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CALIBRAÇÃO HORIZONTAL PARA SISTEMAS DE NIVELAMENTO DIGITAIS**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 20 de Dezembro de 2017.



PEDRO LUÍS FAGGION
Presidente da Banca Examinadora



CARLOS AURÉLIO NADAL
Avaliador Externo



SILVIO HENRIQUE DELLESPOSTE ANDOLFATO
Avaliador Externo



LUÍS AUGUSTO KOENIG VEIGA
Avaliador Interno



IRINEU DA SILVA
Avaliador Externo

AGRADECIMENTOS

À Deus pelas conquistas, força e proteção.

À minha família, pelo carinho e incentivo, lembrando principalmente do meu marido Luiz Gabriel, dos meus pais Luiz e Luzia, meu irmão Luiz Henrique e também meu sogro e sogra João e Irene.

Ao Prof. Dr. Pedro L. Faggion, agradeço por sua dedicação, amizade, orientação e incentivo, contribuindo inestimavelmente para o desenvolvimento deste projeto.

A Prof.^a Dr.^a Érica Santos Matos pela grande amizade, apoio e contribuição ao longo destes anos, resultando no enriquecimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Luís A. Koenig Veiga por suas considerações, desenhos, ajuda e concelhos inestimáveis ao desenvolvimento deste projeto.

Ao Prof. Dr. Carlos A. Nadal, Prof. Dr. Irineu da Silva e Silvio Henrique Dellesposte Andolfato, pelas avaliações, contribuições e sugestões.

À Universidade Federal do Paraná, através do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas (CPGCG), por disponibilizar os laboratórios de Instrumentação Geodésica (LAIG) e Laboratório de Topografia (LABTOPO), bem como todos os equipamentos e instalações constantes nestes locais.

Aos demais professores que ministram aulas no CPGCG, pois foram alicerces essenciais para a minha formação e construção desta tese.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) pelo incentivo à qualificação profissional.

Ao Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura (ITTI) da UFPR e a Leica Geosystems junto a empresa Manfra pelo empréstimo e disponibilização de equipamentos necessários ao desenvolvimento desta pesquisa. À empresa AVR Instrumental Técnico e Científico Ltda., especialmente ao engenheiro Rogério da Rocha pela contribuição e fabricação dos acessórios utilizados neste projeto. À empresa Saraiva Retrovisores pelas informações técnicas e construção do espelho.

Enfim, à todos os meus amigos e alunos do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, que direta e indiretamente contribuíram para a realização desta tese.

*“Pensar é o trabalho mais difícil que existe,
e esta é provavelmente a razão por que tão
poucos se dedicam a ele.”*

Henry Ford

RESUMO

Com o avanço da tecnologia os sistemas de nivelamento digitais têm substituído os níveis ópticos mecânicos em diversas aplicações, principalmente devido à eficiência e automatização. Estes sistemas são compostos basicamente pelo nível digital e a mira de ínvar gravada em código de barras, onde a precisão das observações estão relacionadas com a escala da mira, bem com os dispositivos constantes nos níveis, por exemplo, o sensor CCD e o sistema de lentes. Com o passar do tempo, seja pelo desgaste ou devido a avarias que estes equipamentos podem sofrer, tanto a escala do nível (função dos elementos que compõem o instrumento) quanto da mira podem variar, degradando o resultado das observações. Deste modo, para alcançar e garantir precisão é necessário que os instrumentos sejam verificados e calibrados simultaneamente em laboratório, possibilitando a avaliação da influência dos componentes do sistema sobre o resultado das medidas. Nos últimos anos, diversos sistemas foram construídos para a calibração simultânea dos sistemas de nivelamento digitais em vários países, sendo denominados de comparadores verticais ou horizontais. Contudo, na bibliografia pesquisada, não foram encontrados no Brasil indícios sobre a investigação e construção destes sistemas, assim, propõem-se nesta pesquisa a adequação de uma estrutura de calibração existente no Laboratório de Instrumentação Geodésica (LAIG) da Universidade Federal do Paraná (UFPR), para transformá-la em um sistema de calibração horizontal, sendo proposta uma nova metodologia para o processo de calibração. Como resultados foram discutidas e apresentadas todas as fases do projeto e execução de um acessório para adequação do sistema de calibração horizontal, bem como analisados os fatores que possam influenciar as observações. Além disso, foram calibrados sete diferentes sistemas de nivelamento digitais, onde foram derivados seus respectivos desvios das leituras e fatores de correção. Tais investigações indicaram a potencialidade no processo de calibração proposto, cujos resultados são comparáveis com os sistemas empregados no exterior. Por fim, gerou-se o certificado de calibração dos sistemas analisados e investigou-se a aplicação destes certificados nos resultados das observações de dois nivelamentos geométricos de primeira ordem, aplicados no monitoramento de estruturas e em uma rede geodésica de primeira ordem, localizados na Usina Hidrelétrica Governados José Richa (UHGJR) e no campus centro politécnico da UFPR, respectivamente. Ressalta-se que a partir da calibração dos sistemas de nivelamento digitais é possível conhecer o comportamento dos instrumentos, quantificando os erros e alcançando resultados mais fiáveis devido a aplicação do certificado de calibração, sendo este, um documento oficial que possibilita ao usuário atender as obrigações e deveres relacionados as normas de qualidade.

Palavras Chave: Sistema de nivelamento digital. Instrumentação. Sistema de calibração horizontal.

ABSTRACT

With the advancement of technology, digital leveling systems have replaced the mechanical optical levels in various applications, mainly due to the efficiency and automation. These systems are basically composed of a digital level and an invar barcode leveling rod, where the precision of the observations are related to the rod scale, as well as the devices in the levels, for example the CCD sensor and the system of lenses. Over time, either by wear or due to damages that these devices may suffer, the scale of the level (function of the elements that form the equipment) and the rod may change, degrading the result of the observations. Thus, in order to achieve and guarantee precision, the instruments must be checked and calibrated simultaneously in laboratory, allowing the evaluation of the influence of the system components on the measurement result. In recent years, several structures were built for the simultaneous calibration of digital leveling systems in several countries and were called vertical or horizontal comparators. However, in the researched bibliography, no evidence was found in Brazil about the investigation and construction of these systems, thus, are proposed in this study the adequacy of an existing calibration structure in Geodetic Instrumentation Laboratory (LAIG) of the Federal University of Paraná (UFPR), to transform it into a horizontal calibration system, and a new methodology for the calibration process is proposed. As results were discussed and presented all phases of the design and construction of the accessory for adequacy of the horizontal calibration system are discussed and presented, as well as the factors that may influence the observations are analyzed. In addition, seven different digital leveling systems were calibrated, where their respective performances and scaling factors were derived. Such investigations indicated the potentiality in the proposed calibration process, whose results are comparable with the systems used foreign. Finally, calibration certificates of the analyzed systems were generated and the application of these certificates was investigated in the results of the observations of two first order differential leveling, applied to the monitoring of structures and a first-order geodetic network, located at the José Richa Governed Hydroelectric Plant (UHGJR) and at the UFPR polytechnic campus, respectively. It should be noted that from the calibration of the digital leveling systems it is possible to know the behavior of the instruments, quantifying the errors and achieving more reliable results due to the application of the calibration certificate. This is an official document that provides the user to meet the obligations and duties related to quality standards.

Keywords: Digital leveling system. Instrumentation. Horizontal calibration system.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	- PRINCÍPIO DE FERMAT	25
FIGURA 2	- PRINCÍPIO DA REFLEXÃO DE RAIOS EM ESPELHOS PLANOS	26
FIGURA 3	- RAIOS DE LUZ REFRAATADOS NA INTERFACE PLANA.....	27
FIGURA 4	- DUPLA REFLEXÃO	27
FIGURA 5	- REFLEXÃO COM ESPELHAMENTO FRONTAL	28
FIGURA 6	- CARÁTER REVERSO DA IMAGEM	29
FIGURA 7	- ELEMENTOS QUE COMPÕEM UM NÍVEL DIGITAL	32
FIGURA 8	- EXEMPLO DA MIRA DE ÍNVAR LEICA GRAVADA EM CÓDIGO DE BARRAS COM TRÊS METROS DE COMPRIMENTO.....	34
FIGURA 9	- DETALHES DA MIRA DE ÍNVAR LEICA MODELO GPCL2 ..	35
FIGURA 10	- SISTEMA DE NIVELAMENTO DIGITAL LEICA DNA03 (A) NÍVEL DIGITAL (B) MIRA GRAVADA EM CÓDIGO DE BARRAS	36
FIGURA 11	- SISTEMA DE NIVELAMENTO DIGITAL LEICA LS15 (A) NÍVEL DIGITAL (B) MIRA GRAVADA EM CÓDIGO DE BARRAS....	37
FIGURA 12	- SISTEMA DE NIVELAMENTO DIGITAL FOIF EL302A (A) NÍVEL DIGITAL (B) MIRA GRAVADA EM CÓDIGO DE BARRAS	37
FIGURA 13	- INTERFERÔMETRO HP 10766A INSTALADO NO LAIG	45
FIGURA 14	- VISTA GERAL DO COMPARADOR VERTICAL DO TUG.....	47
FIGURA 15	- VISTA GERAL DO COMPARADOR VERTICAL DO SLAC ...	48
FIGURA 16	- RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DOS SISTEMAS DE NIVELAMENTO DIGITAIS LEICA (SISTEMA 1) E TRIMBLE (SISTEMA 2) NO SLAC.....	49
FIGURA 17	- RESULTADO DA CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA DE NIVELAMENTO DIGITAL TRIMBLE NO TUG.....	49
FIGURA 18	- SEGUNDO PISO DO LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO DE SISTEMAS DE NIVELAMENTO DIGITAIS DO FGI.....	52
FIGURA 19	- RESULTADO DA CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA DE NIVELAMENTO DIGITAL TRIMBLE NO FGI	53

FIGURA 20	- SISTEMA DE CALIBRAÇÃO HORIZONTAL DO CTU	55
FIGURA 21	- COMPARADOR HORIZONTAL NO JUPEM.....	56
FIGURA 22	- JANELA DO SOFTWARE DE CALIBRAÇÃO DO CTU E O RESULTADO DA CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA DE NIVELAMENTO DIGITAL	57
FIGURA 23	- PLANTA BAIXA DO LAIG	58
FIGURA 24	- (A) SISTEMA DE CALIBRAÇÃO HORIZONTAL PROPOSTO (B) OBSERVAÇÃO COM O NÍVEL DIGITAL DA IMAGEM REFLETIDA PELO ESPELHO DOS CÓDIGOS DE BARRAS DA MIRA (C) SISTEMA LASER DE MEDIÇÃO E REFLETOR MÓVEL FIXO NO SISTEMA DE TRANSPORTE.....	61
FIGURA 25	- INTERVALO MÍNIMO DE VISUALIZAÇÃO DOS CÓDIGOS DE BARRAS DA MIRA PARA QUE O NÍVEL REALIZE LEITURAS AUTOMÁTICAS	64
FIGURA 26	- INDICAÇÃO DA TANGÊNCIA DOS ANTEPAROS NOS FIOS ESTADIMÉTRICOS E RÉGUA USADA COMO REFERÊNCIA.....	64
FIGURA 27	- COMPRIMENTO DO INTERVALO MÍNIMO NA MIRA PARA QUE O NÍVEL DNA03 REALIZE MEDIDAS ELETRÔNICAS EM DIFERENTES DISTÂNCIAS	65
FIGURA 28	- INDICAÇÃO DO ÂNGULO MÍNIMO DO CAMPO DE VISÃO DO NÍVEL	66
FIGURA 29	- PROJEÇÃO DO CAMPO DE VISÃO DO NÍVEL (θ) SOBRE O ESPELHO POSICIONADO A 45° E RESPECTIVA ÁREA DE VISUALIZAÇÃO NA MIRA	75
FIGURA 30	- GEOMETRIA UTILIZADA NA DEDUÇÃO DO COMPRIMENTO L_1	76
FIGURA 31	- GEOMETRIA UTILIZADA NA DEDUÇÃO DO COMPRIMENTO L_2	77
FIGURA 32	- PROJETO DO ACESSÓRIO DE ADEQUAÇÃO DO SISTEMA DE CALIBRAÇÃO HORIZONTAL	67
FIGURA 33	- (A) ACESSÓRIOS 1 E 2 INSTALADOS NO SISTEMA DE TRANSPORTE HORIZONTAL. (B) PEÇA DE APOIO DO	

	ACESSÓRIO 1 NO SISTEMA DE TRANSPORTE HORIZONTAL.....	68
FIGURA 34	- (A) ESPELHO PLANO INSTALADO A 45° NO ACESSÓRIO 2. ACESSÓRIOS 2 E 3 INSTALADOS NO ACESSÓRIO 1	69
FIGURA 35	- SISTEMA DE TRANSPORTE COM OS ACESSÓRIOS DE ADEQUAÇÃO DO SISTEMA DE CALIBRAÇÃO HORIZONTAL PROPOSTO.....	69
FIGURA 36	- (A) TRIPÉ INDUSTRIAL (B) NÍVEL DIGITAL INSTALADO E POSICIONADO NO TRIPÉ INDUSTRIAL PRÓXIMO AOS TRILHOS DO SISTEMA DE CALIBRAÇÃO HORIZONTAL PROPOSTO.....	70
FIGURA 37	- (A) INDICAÇÃO DO CENTRO DO ESPELHO INSTALADO NO SISTEMA DE CALIBRAÇÃO (B) OBSERVAÇÃO DA MARCA NA LATERAL DO ESPELHO COM O NÍVEL WILD N3 (C) COINCIDÊNCIA ENTRE A LUNETAS NO NÍVEL N3 E O SISTEMA ÓPTICO DO NÍVEL DIGITAL.....	72
FIGURA 38	- (A) PERFIL DE ALUMÍNIO UTILIZADO COMO APOIO DOS EQUIPAMENTOS A SEREM CALIBRADOS (B) MIRA POSICIONADA SOBRE OS ANTEPAROS DE APOIO NOS PONTOS DE BESSEL.	73
FIGURA 39	- LUNETAS INSTALADAS NO SISTEMA DE TRANSPORTE DO SISTEMA DE CALIBRAÇÃO PROPOSTO.....	74
FIGURA 40	- (A) PARAFUSO MICROMÉTRICO UTILIZADO PARA A CALAGEM DO NÍVEL TUBULAR DE PRECISÃO E NIVELAMENTO DOS ACESSÓRIOS 2 E 3 (B) NÍVEL TUBULAR DE PRECISÃO	81
FIGURA 41	- EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA VERIFICAR SE O ESPELHO FIXO NO SISTEMA DE TRANSPORTE ESTÁ POSICIONADO A 45°	81
FIGURA 42	- (A) ESPELHO PLANO FIXO NO SISTEMA DE TRANSPORTE E ESPELHO PLANO POSICIONADO SOBRE O PERFIL DE ALUMÍNIO DO SISTEMA DE CALIBRAÇÃO (B) IMAGEM OBSERVADA PELA LUNETAS DA ESTAÇÃO TOTAL INDICANDO A COINCIDÊNCIA DO FEIXE LASER E SISTEMA	

	DE PONTARIA QUANDO O ESPELHO DO SISTEMA DE TRANSPORTE ESTÁ A 45°.....	83
FIGURA 43	- EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA DETERMINAÇÃO DAS ONDULAÇÕES DOS TRILHOS DO SISTEMA DE CALIBRAÇÃO HORIZONTAL E EQUIPAMENTOS AUXILIARES FIXOS NO SISTEMA DE TRANSPORTE.....	84
FIGURA 44	- PAR DE MIRAS UTILIZADAS NAS LEITURAS DE RÉ E VANTE COM NÍVEL DIGITAL LEICA DNA03	85
FIGURA 45	- NÍVEL ELETRÔNICO TALLYVEL 3 UTILIZADO PARA AS LEITURAS DE INCLINAÇÃO	86
FIGURA 46	- ONDULAÇÕES DOS TRILHOS DO SISTEMA DE CALIBRAÇÃO DO LAIG OBTIDOS COM DIFERENTES LEVANTAMENTOS	88
FIGURA 47	- DESVIOS PADRÃO DOS DIFERENTES LEVANTAMENTOS REALIZADOS SOBRE OS TRILHOS DO LAIG.....	89
FIGURA 48	- TRAJETÓRIA DO FIO MÉDIO DO NÍVEL REFLETIDO PELO ESPELHO NAS POSIÇÕES *DE 45° E ROTACIONADO DE A.....	91
FIGURA 49	- RESUMO DO PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO NO SISTEMA DE CALIBRAÇÃO HORIZONTAL PROPOSTO....	92
FIGURA 50	- (A) CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA DE NIVELAMENTO DIGITAL (B) IMAGEM DA MIRA REFLETIDA PELO ESPELHO A 45°	94
FIGURA 51	- RESULTADO DA CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA DE NIVELAMENTO DIGITAL (EXPERIMENTO 1).....	101
FIGURA 52	- RESULTADO DA CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA DE NIVELAMENTO DIGITAL (EXPERIMENTO 2).....	103
FIGURA 53	- RESULTADO DA CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA DE NIVELAMENTO DIGITAL (EXPERIMENTO 3).....	104
FIGURA 54	- RESULTADO DA CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA DE NIVELAMENTO DIGITAL (EXPERIMENTO 4).....	105
FIGURA 55	- RESULTADO DA CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA DE NIVELAMENTO DIGITAL (EXPERIMENTO 5).....	106

FIGURA 56	- RESULTADO DA CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA DE NIVELAMENTO DIGITAL (EXPERIMENTO 6).....	107
FIGURA 57	- RESULTADO DA CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA DE NIVELAMENTO DIGITAL (EXPERIMENTO 7).....	108
FIGURA 58	- USINA HIDRELÉTRICA GOVERNADOR JOSÉ RICHÁ	109
FIGURA 59	- (A) NIVELAMENTO GEOMÉTRICO NA CRISTA DA BARRAGEM DA UHGJR UTILIZANDO O NÍVEL DIGITAL LEICA DNA03 (B) MIRA DE ÍNVAR LEICA GRAVADA EM CÓDIGO DE BARRAS	110
FIGURA 60	- POSIÇÕES APROXIMADAS DAS RRNN UTILIZADAS NO MONITORAMENTO DA BARRAGEM DA UHGJR.....	110
FIGURA 61	- REFERÊNCIAS DE NÍVEL LOCALIZADAS NA CRISTA DA BARRAGEM DA UHGJR (A) RN ABAIXO DO NÍVEL DA PISTA (B) RN SOB A PISTA	111
FIGURA 62	- ESTAÇÃO METEOROLÓGICA PORTÁTIL FIXA EM UM TRIPÉ	112
FIGURA 63	- REFERÊNCIAS DE NÍVEL LOCALIZADAS NA UFPR.....	114

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	- FONTES DE ERROS E INCERTEZAS PADRÃO NA MEDIDA DA DISTÂNCIA REALIZADA COM O INTERFERÔMETRO LASER NO SISTEMA DE CALIBRAÇÃO DO SLAC.....	50
TABELA 2	- FONTES DE ERROS E INCERTEZAS PADRÃO NA MEDIDA DA DISTÂNCIA *REALIZADA COM O NÍVEL DIGITAL NO SISTEMA DE CALIBRAÇÃO DO SLAC	51
TABELA 3	- FONTES DE ERROS E INCERTEZAS PADRÃO DO COMPARADOR DO FGI.....	54
TABELA 4	- ONDULAÇÕES DOS TRILHOS E RESPECTIVOS DESVIOS PADRÃO DAS LEITURAS REALIZADAS COM DIFERENTES LEVANTAMENTOS	88
TABELA 5	- SISTEMAS DE NIVELAMENTO DIGITAIS CALIBRADOS NO SISTEMA DE CALIBRAÇÃO HORIZONTAL PROPOSTO..	100
TABELA 6	- RESULTADOS DOS LEVANTAMENTOS DAS SEÇÕES NIVELADAS NA BARRAGEM DA UHGJR.....	113
TABELA 7	- RESULTADOS DOS LEVANTAMENTOS DAS SEÇÕES NIVELADAS NA BARRAGEM DA UHGJR APÓS A APLICAÇÃO DOS CERTIFICADOS DE CALIBRAÇÃO DOS SISTEMAS DE NIVELAMENTO DIGITAIS	113
TABELA 8	- RESULTADO DO NIVELAMENTO ENTRE AS RRNN 02 E 123 NA UFPR	115
TABELA 9	- RESULTADO DO NIVELAMENTO ENTRE AS RRNN 02 E 123 NA UFPR APÓS APLICAÇÃO DOS CERTIFICADOS DE CALIBRAÇÃO.....	115

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVO GERAL	20
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
1.3 JUSTIFICATIVA	21
2 REVISÃO DE LITERATURA	24
2.1 ÓTICA GEOMÉTRICA: REFLEXÃO E REFRAÇÃO	24
2.1.1 Reflexão simples e dupla	27
2.1.2 Formação da imagem de um objeto em um espelho plano.....	28
2.1.3 Características dos espelhos planos.....	29
2.1.3.1 Planicidade.....	30
2.1.3.2 Revestimento	30
2.2 INSTRUMENTAÇÃO PARA NIVELAMENTO GEOMÉTRICO.....	31
2.2.1 Níveis digitais	31
2.2.2 Miras utilizadas em conjunto com níveis digitais.....	34
2.2.3 Modelos de níveis digitais utilizados nesta pesquisa	36
2.2.4 Aquisição de imagens com níveis digitais	37
2.2.4.1 Distorção do sistema de lentes	39
2.2.4.2 Quantização de imagens digitais.....	39
2.2.4.3 Alinhamento e espaçamento entre os elementos sensores	40
2.2.4.4 Imagem sem foco.....	40
2.2.4.5 Distâncias críticas e seções finais das miras	40
2.2.4.6 Sensor de imagem - CCD	41
2.2.4.7 Outros efeitos	42
2.3 INTERFERÔMETRIA LASER	43
2.3.1 Interferômetro HP 10766A do LAIG	44
2.3.1.1 Compensação do fator refração	45
2.4 CALIBRAÇÃO DE SISTEMAS DE NIVELAMENTO DIGITAIS	46
2.4.1 Sistemas de calibração verticais	46
2.4.1.1 Sistema de calibração vertical do SLAC.....	46
2.4.1.1.1 Incerteza padrão do sistema de calibração do SLAC.....	50
2.4.1.2 Sistema de calibração vertical do FGI.....	52
2.4.1.2.1 Incerteza padrão do sistema de calibração do FGI	53
2.4.2 Sistemas de calibração horizontais	54

3 METODOLOGIA	58
3.1 SISTEMA DE CALIBRAÇÃO DE MIRAS VERTICAIS DE ÍNVAR DO LAIG	58
3.2 CALIBRAÇÃO HORIZONTAL DE SISTEMAS DE NIVELAMENTO DIGITAIS	60
3.2.1 Propriedades físicas do espelho utilizado no sistema de calibração horizontal proposto	62
3.2.2 Projeto de dimensionamento do espelho	62
3.2.2.1 Intervalo e ângulo mínimo de visualização na mira	62
3.2.3 Projeto e execução de um acessório para adequação do sistema de calibração horizontal proposto	66
3.2.4 Características do posicionamento do nível digital	70
3.2.5 Características do posicionamento da mira	72
3.2.5.1 Comprimento do espelho	74
3.2.6 Características do sistema interferométrico	79
3.2.7 Características do posicionamento do espelho	80
3.2.8 Investigação da horizontalidade dos trilhos do sistema de calibração	83
3.2.8.1 Nivelamento geométrico com nível digital	85
3.2.8.2 Nível eletrônico	86
3.2.8.3 Ondulações dos trilhos	87
3.2.8.4 Influência da ondulação dos trilhos na calibração	90
3.3 PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO DE SISTEMAS DE NIVELAMENTO DIGITAIS NO LAIG	92
3.3.1 Estimativa da influência do sistema de calibração no resultado das observações	95
3.3.2 Certificado de calibração	96
4 RESULTADOS	98
4.1 RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DE DIFERENTES SISTEMAS DE NIVELAMENTO DIGITAIS	100
4.1.1 Experimento 1	100
4.1.2 Experimento 2	102
4.1.3 Experimento 3	103
4.1.4 Experimento 4	104
4.1.5 Experimento 5	105

4.1.6 Experimento 6	106
4.1.7 Experimento 7	107
4.2 ESTUDOS DE CASO PARA APLICAR OS CERTIFICADOS DE CALIBRAÇÃO	109
4.2.1 Aplicação do certificado de calibração – Levantamento 1	109
4.2.2 Aplicação do certificado de calibração – Levantamento 2.....	114
5 CONCLUSÕES	116
5.1 RECOMENDAÇÕES	119
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	120
APÊNDICE 1- CERTIFICADOS DE CALIBRAÇÃO	127

1 INTRODUÇÃO

Na década de 60 iniciaram-se os estudos para o desenvolvimento dos níveis digitais na Universidade de Bonn - Alemanha, onde foram realizadas pesquisas para comparar a imagem de uma mira com sua escala reduzida, armazenada na memória interna do instrumento. Avanços nesta área ocorreram somente após o desenvolvimento dos sensores CCD (*Charge-Coupled Device*) que possibilitaram a aquisição de imagens digitais. Entretanto, somente nos anos 90 foi lançado o que se denominou de sistema de nivelamento, composto por uma mira gravada em código de barras e um nível digital (INGENSAND, 1999).

Ao utilizar um sistema de nivelamento geométrico digital a altura da linha de visada horizontal observada é calculada através de um processo de correlação, onde a imagem do código de barras da mira, que esta no campo de visão da luneta do instrumento, é capturada e comparada com uma imagem padrão, armazenada no equipamento (GHILANI; WOLF, 2012). Assim, é possível afirmar que os sistemas de nivelamento de alta precisão estão relacionados principalmente com a escala da mira em código de barras, bem como os dispositivos constantes nos níveis digitais (TAKALO; ROUHIAINEN, 2004).

Por construção, a denominada escala do instrumento, que pode ser definida em função do dispositivo CCD e dos demais elementos que compõem o nível, é igual à da mira, porém com o passar do tempo, seja pelo desgaste ou devido a avarias, ambas podem mudar (TAKALO; ROUHIAINEN, 2004). Além disso, Woschitz e Brunner (2003) afirmam que cada nível digital do mercado possui um erro padrão específico devido ao processo de fabricação, sendo seu conhecimento essencial para obter leituras de alta precisão. Deste modo, um procedimento de calibração deve ser realizado para verificar simultaneamente o desempenho do nível e da mira, de forma a possibilitar a avaliação da influência dos componentes do sistema sobre o resultado das medidas e garantir que a precisão requerida seja atingida (WOSCHITZ; BRUNNER, 2003).

Os fabricantes dos níveis digitais efetuam calibrações, no entanto, quando encontram alguma flutuação, aplicam correções diretamente no software de execução, sendo este processo sigiloso devido a questões comerciais (WOSCHITZ; BRUNNER; HEISTER, 2002). Assim, para que o usuário tenha o controle do

comportamento dos instrumentos é necessário estabelecer e realizar calibrações independentes (WOSCHITZ; BRUNNER, 2003).

Nos últimos anos foram construídas diversas instalações para a calibração de sistemas de nivelamento digitais em vários países, por exemplo: Estados Unidos (Laboratório de Aceleração Nacional - SLAC), Áustria (Laboratório da Universidade Tecnológica da Áustria - TUG), Malásia (Laboratório do Departamento de Topografia e Mapeamento da Malásia - JUPEM), República Tcheca (Laboratório de Geomática da Faculdade de Engenharia Civil), ou ainda, na Finlândia (Laboratório Geodésico Finlandês - FGI). Tais instalações são utilizadas para verificar os desvios das leituras (desempenho), a escala (denominada deste trabalho de fator de correção) e os padrões de incerteza dos sistemas de nivelamento digitais, sendo denominadas de sistemas de calibração verticais ou horizontais (RÜEGER; BRUNNER, 2000; NOVOTNÝ, 2012; VYSKOCIL; LUKEŠ, 2015).

Na concepção básica dos sistemas de calibração monta-se uma estrutura para a fixação e deslocamento de uma mira na posição vertical ou horizontal. O processo de calibração consiste em comparar os deslocamentos realizados na mira, medidos com o nível digital e com um interferômetro laser, cujas leituras são tomadas como referência. Para minimizar imprecisões do sistema, fatores de influência como temperatura, umidade e pressão são levados em consideração. Após o procedimento de calibração, utiliza-se uma análise estatística por regressão para estabelecer o relacionamento entre os valores medidos através do sistema de nivelamento e seus respectivos valores adotados como referência (WOSCHITZ; BRUNNER; HEISTER, 2003). Assim, é possível obter através dos coeficientes do modelo de regressão os valores que irão compor uma equação denominada de fator de correção do sistema de nivelamento. Esta, é função das medições realizadas com o nível e a mira durante o procedimento de calibração, sendo o resultado único para cada sistema de nivelamento digital.

Tais sistemas possuem a premissa de manter inalteradas as posições do nível e do interferômetro durante a calibração (WOSCHITZ; BRUNNER, 2003), tendo como característica a fixação do refletor móvel do sistema de medida laser junto do sistema de transporte da mira. Assim, em um sistema de calibração vertical a mira e o refletor são deslocados verticalmente, enquanto que em um sistema de calibração horizontal utiliza-se um sistema de deslocamento horizontal e um espelho para realizar observações indiretas na mira (TAKALO; ROUHIAINEN, 2004; NOVOTNÝ, 2012).

Durante a calibração dos sistemas de nivelamento digitais com as metodologias existentes podem ocorrer oscilações decorrentes do deslocamento da mira, como verificado por Takalo e Rouhiainen (2004). Assim, propõem-se nesta pesquisa manter a mira em uma posição fixa em relação aos demais instrumentos utilizados durante o procedimento de calibração, sendo esta uma nova abordagem em relação as metodologias atuais.

Portanto, pretende-se adaptar a estrutura de calibração de miras verticais de ínvar utilizadas com níveis ópticos, localizada no Laboratório de Instrumentação Geodésica (LAIG) da Universidade Federal do Paraná (UFPR), para transformá-la em um sistema horizontal de calibração do conjunto nível digital e mira de ínvar em código de barras. Neste caso, um espelho será acoplado sobre um suporte de movimento horizontal juntamente com o refletor do interferômetro, o que possibilitará controlar os movimentos deste conjunto. Deste modo, será possível realizar leituras em toda a extensão da mira sem mover a mesma em relação ao nível e ao interferômetro.

Logo, se os deslocamentos medidos com o interferômetro, obtidos através do movimento do sistema que contém o espelho e o refletor móvel, corresponder a diferenças de deslocamentos na mira, é possível comparar tais leituras com as observações adquiridas com o nível e assim gerar um fator de correção para o sistema de nivelamento.

Assim sendo, além de propor uma alternativa às metodologias de calibração existentes, serão apresentadas todas as fases do projeto construtivo para a adequação do sistema de calibração, a metodologia desenvolvida, a calibração de sete diferentes sistemas de nivelamento digitais e a aplicação dos resultados da calibração em dois nivelamentos geométricos de primeira ordem, empregados no monitoramento de estruturas na Usina Hidrelétrica Governador José Richa (UHGJR) e em uma seção da rede geodésica localizada no campus centro politécnico da UFPR. Ressalta-se que durante os levantamentos foram determinados os desviveis utilizando-se dois pares de sistemas de nivelamento digitais, ou seja, um nível associado a duas miras de ínvar gravadas em código de barras.

1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um sistema para calibração horizontal de sistemas de nivelamento digitais, tendo como característica manter a mira estática durante o procedimento de calibração.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Projetar e fabricar um acessório para a adequação do sistema de calibração de miras verticais de ínvar utilizadas com níveis ópticos instalada no LAIG, para possibilitar a fixação e deslocamento de um espelho plano sobre um sistema de transporte horizontal;
- 2) Desenvolver uma equação para dimensionar o comprimento do espelho plano que será utilizado no sistema de calibração horizontal;
- 3) Desenvolver uma metodologia para posicionar o espelho plano a 45° em relação a linha de visada do nível e a linha normal da mira;
- 4) Investigar a horizontalidade dos trilhos por onde se desloca o sistema de transporte;
- 5) Calibrar através do sistema desenvolvido diferentes sistemas de nivelamento digitais;
- 6) Analisar os desvios das leituras, obtidos através da diferença entre os deslocamentos observados com o nível digital e com o interferométrico laser, bem como o fator de correção para todos os sistemas de nivelamento digitais calibrados;
- 7) Gerar um modelo de certificado de calibração; e
- 8) Aplicar o modelo de certificado de calibração nas observações realizadas em nivelamentos geométricos de primeira ordem, tendo como finalidade comparar os resultados obtidos antes e após a correção das leituras.

1.3 JUSTIFICATIVA

Com o avanço da tecnologia, cada vez mais os instrumentos topográficos e geodésicos são fabricados a partir de componentes eletrônicos, o que levou a um aumento da eficiência através de equipamentos parcialmente automatizados (WOSCHITZ; HEISTER, 2015). Os níveis digitais se enquadram nesta evolução e devido à alta precisão e automatização das leituras, têm substituído os níveis ópticos em diversos campos de aplicação (WOSCHITZ; GASSNER; RULAND, 2006), por exemplo, monitoramento de grandes estruturas, nivelamento de peças industriais e locação de máquinas.

Anteriormente, o controle da qualidade dos instrumentos de nivelamento era realizado através da calibração das miras e da verificação e retificação dos níveis. No entanto, com o surgimento dos sistemas de nivelamento digitais, além de calibrar os erros relacionados com a escala da mira gravada em código de barras é necessário considerar o desgaste do dispositivo CCD (TAKALO; ROUHIAINEN, 2004) e dos demais elementos que compõem o nível.

Segundo Woschitz e Heister (2015) não é suficiente examinar ou calibrar somente os componentes individuais dos diversos sistemas de medição, devendo estes serem considerados como um todo. Desta forma, a calibração tradicional de miras verticais não é adequada para um sistema de nivelamento digital, uma vez que o nível não faz parte deste processo (WOSCHITZ; GASSNER; RULAND, 2006). Além disso, não é possível detectar em campo ou na calibração tradicional os erros oriundos da eletrônica e do sensor CCD do nível (VYSKOCIL, 2008). Deste modo, enfatiza-se a necessidade de realizar a calibração simultânea do sistema de nivelamento digital, termo adotado para caracterizar o conjunto formado pelo nível digital e uma mira de invar gravada em código de barras, pois os resultados das medições são função de ambos os equipamentos. Estas são algumas das razões pelas quais os conceitos para testes e procedimentos de calibração em laboratório são necessários (WOSCHITZ; HEISTER, 2015).

Estudos sobre procedimentos de calibração em diversos tipos de instrumentos já vem sendo desenvolvidos na UFPR há um longo período, entre eles pode-se citar Doubek (1974), Gripp (1986), Cordini (1991), Faggion (1993), Faggion (2001), Martini (2005), Cruz (2010), Werlich (2012) e Huinca (2014). Além disso, há o registro de um grupo de pesquisa da UFPR junto ao Conselho Nacional de

Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) que busca desenvolver metodologias para a verificação, retificação, calibração e classificação de instrumentos topográficos e geodésicos. Assim sendo, pelo fato de não terem sido encontrados na bibliografia pesquisada indícios sobre a investigação e construção de um sistema de calibração vertical ou horizontal no Brasil, é que se propõe o desenvolvimento deste projeto, sendo esta pesquisa importante para a comunidade usuária destes equipamentos no país, bem como para o desenvolvimento dos métodos de calibração existentes.

De acordo com o Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO), a calibração é o conjunto de operações que estabelece sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento de medição ou sistema de medição e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões. O resultado permite o estabelecimento dos valores do mensurando bem como a determinação das correções a serem aplicadas, podendo levar em consideração o efeito de grandezas de influência (INMETRO, 1995).

A calibração de sistemas de nivelamento digitais apresenta papel fundamental na obrigação de atender as normas regulamentares que tratam do controle de dispositivos de medição e monitoramento, como a NBR ISO 9001:2000, onde através da metodologia desenvolvida será possível assegurar os resultados dos sistemas de nivelamento, evidenciando a conformidade do produto contra padrões de medição, e registrando os resultados em um certificado de calibração. Ressalta-se que a metodologia e o sistema desenvolvidos contemplam algumas características metrológicas citadas na norma ABNT NBR ISO/IEC 10012, como repetibilidade, estabilidade, e efeitos de grandezas de influência. Além disso, possibilita que a calibração seja realizada em intervalos periódicos, como recomendado pela norma americana U.S. Department of Defense MIL-STD-45662 A (1988), de modo a garantir exatidão e confiabilidade. Woschitz (2005) também afirma que a calibração deve ser realizada anualmente ou então quando os instrumentos sofrerem avarias.

Portanto, para investigar os desvios das leituras e o fator de correção de um sistema de nivelamento digital é necessário que o controle da qualidade dos equipamentos sejam realizados em laboratório. Complementarmente, o projeto proposto possibilitará que sejam aproveitadas as estruturas utilizadas na calibração convencional de miras, ou ainda, que o espaço necessário para implantar futuros

sistemas sejam reduzidos quando comparados aos sistemas de calibração verticais existentes.

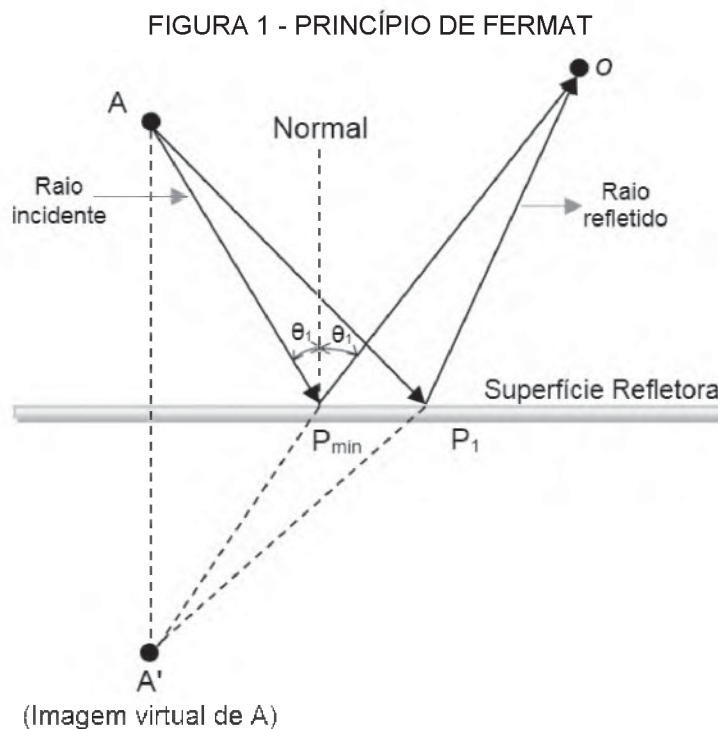
2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo serão apresentados conceitos relacionados com a pesquisa desenvolvida. Inicialmente, são realizadas considerações acerca do processo de formação de imagens em espelhos planos. Em seguida, serão apresentados conceitos sobre os sistemas de nivelamento digitais, os quais englobam a classificação dos níveis, miras de invar e o processo de formação de imagens. Na sequência é apresentado o sistema de medição por interferometria laser. E por fim, apresenta-se uma visão geral sobre as características e peculiaridades dos sistemas de calibração de sistemas de nivelamento digitais verticais e horizontais existentes.

2.1 ÓTICA GEOMÉTRICA: REFLEXÃO E REFRAÇÃO

Para entender o processo de formação de imagens em espelhos planos é preciso recorrer ao estudo da ótica geométrica, onde o modelo da descrição da luz é considerado por meio de raios e se aplica as leis da reflexão e refração (YOUNG; FREEDMAN, 2009). Um dos elementos óticos mais simples utilizados para a geração de imagens é o espelho plano, que pode ser considerado uma superfície que reflete um raio luminoso em uma direção definida, sem absorvê-la ou espalhá-la em todas as direções (HALLIDAY; RESNICK, 2009).

O estudo da trajetória dos raios luminosos, quando se trabalha com espelhos, é baseado na propagação da luz a partir do princípio de Fermat, que pode ser explicado através da Figura 1 (NUSSENZVEIG, 1998). Nos conceitos voltados a este princípio afirma-se que a luz ao se propagar entre dois pontos, A e O, através de uma superfície refletora, percorre o caminho mais curto possível (HETCH, 2002).

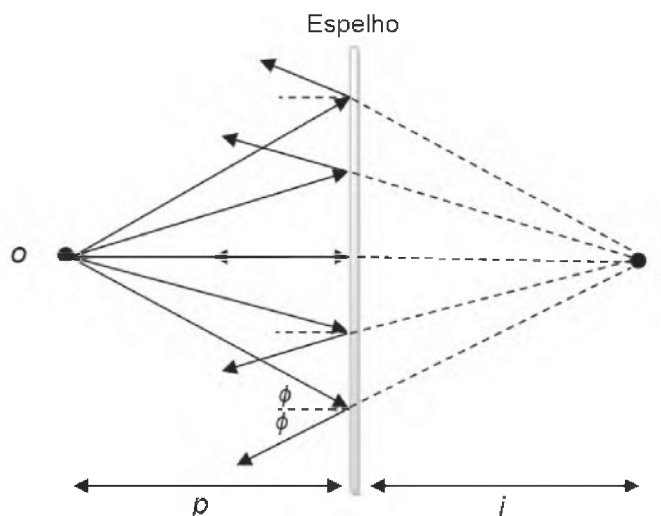


FONTE: Adaptado de HETCH (2002).

Na Figura 1, uma fonte de luz pontual (A) emite uma série de raios que atingem a superfície refletora e direcionam-se para o ponto (O). Para uma melhor visualização é possível verificar que os raios que emergem da imagem virtual (A') seguem uma trajetória retilínea, contudo, somente uma destas trajetórias é possível, ou seja, aquela que percorre o caminho óptico mínimo (P_{min}) (HECHT, 2002; GONÇALVES, 2009).

De acordo com as leis da reflexão, para todo raio proveniente de um ponto objeto que atinge uma superfície refletora plana, o ângulo de incidência será igual ao ângulo de reflexão (YOUNG; FREEDMAN, 2009). Este princípio pode ser analisado a partir da Figura 2, onde uma fonte luminosa pontual O, chamada objeto, está a uma distância p de um espelho plano. Raios luminosos provenientes de O são refletidos pelo espelho e, caso um observador intercepte estes raios, ocorrerá a sensação de que existe uma fonte luminosa pontual I atrás do espelho, a uma distância i . A fonte fictícia I é uma imagem virtual do objeto O (HALLIDAY; RESNICK, 2009).

FIGURA 2 - PRINCÍPIO DA REFLEXÃO DE RAIOS EM ESPELHOS PLANOS



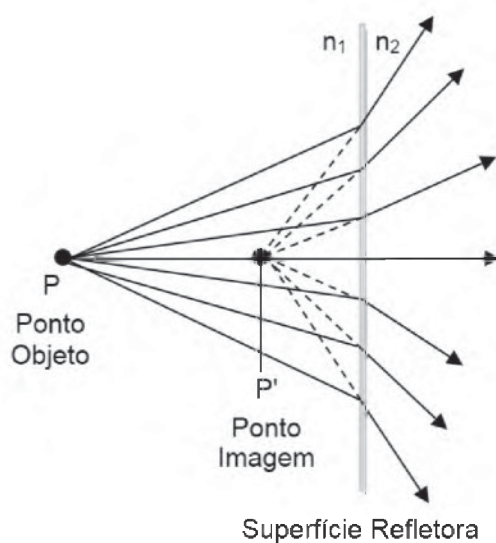
FONTE: Adaptado de HALLIDAY; RESNICK (2009).

Quando a superfície é plana a reflexão é especular, ou seja, os raios são refletidos em uma única direção (HALLIDAY; RESNICK, 2009). Se a superfície apresentada na Figura 2 fosse rugosa, a reflexão seria difusa e os raios refletidos iriam para diversas direções, assim, não haveria a formação de um ponto imagem virtual (YOUNG; FREEDMAN, 2009). Este tipo de reflexão geralmente ocorre quando a superfície não é polida (HECHT, 2002).

Por outro lado, quando a luz passa por uma superfície que separa dois meios diferentes (n_1 e n_2), ocorre o fenômeno de refração e isto acontece a menos que o raio incidente seja perpendicular à superfície, pois a refração muda a direção da propagação da luz (Figura 3) (HALLIDAY; RESNICK, 2009). Contudo, apesar do desvio que a luz pode sofrer, uma imagem também pode ser formada por uma superfície plana refratora.

Na Figura 3 os raios provenientes de um ponto P são refratados na interface plana que separa dois materiais com índices de refração diferentes (n_1 e n_2). Neste caso, os raios refratados vistos pelo observador parecem vir do ponto imagem P' (YOUNG; FREEDMAN, 2009; HALLIDAY; RESNICK, 2009).

FIGURA 3 - RAIOS DE LUZ REFRAATADOS NA INTERFACE PLANA

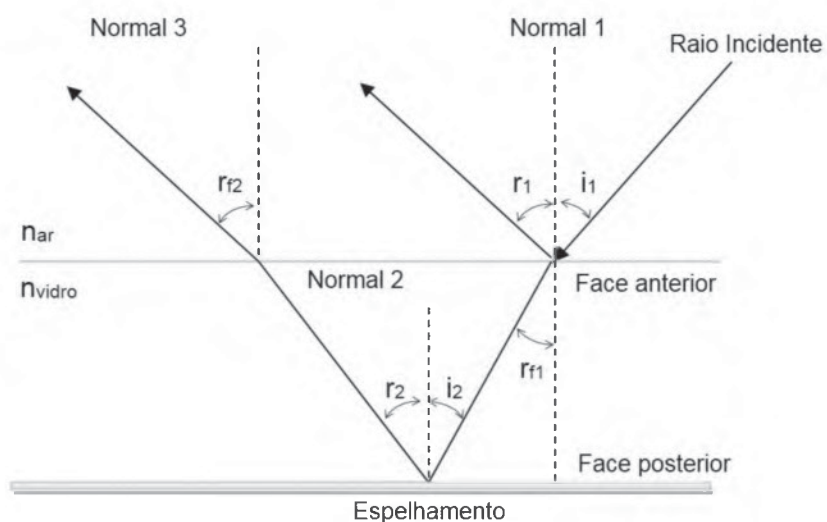


FONTE: Adaptado de YOUNG; FREEDMAN (2009).

2.1.1 Reflexão simples e dupla

A forma de construção das superfícies refletoras pode acarretar em reflexões simples ou dupla. No caso dos espelhos, se o recobrimento (espelhamento) de uma superfície for realizada na parte de trás do vidro, o raio sofrerá dupla reflexão (Figura 4) (CORDINI, 1991).

FIGURA 4 - DUPLA REFLEXÃO



FONTE: Adaptado de CORDINI (1991).

Onde:

i_1 – ângulo de incidência na face anterior;

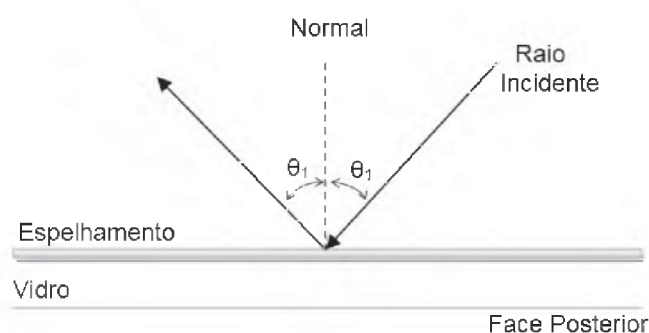
r_1 – ângulo de reflexão na face anterior;

r_1 – ângulo de refração na primeira refração;
 i_2 – ângulo de incidência na face posterior;
 r_2 – ângulo de reflexão na face posterior; e
 r_2 – ângulo de refração na segunda refração.

É possível observar na Figura 4 que o raio incidente é refratado na interface plana e direcionado a superfície espelhada, em seguida, o raio é refletido e novamente refratado. Como dito, este fenômeno ocorre devido a passagem do raio de luz por dois meios com índices de refração diferentes (n_{ar} e n_{vidro}) (HALLIDAY; RESNICK, 2009).

A reflexão simples ocorre quando o espelhamento é frontal, assim o raio incidente é minimizado do efeito de refração (Figura 5) (NUSENZVEIG, 1998).

FIGURA 5 - REFLEXÃO COM ESPELHAMENTO FRONTAL



FONTE: Adaptado de NUSENZVEIG (1998).

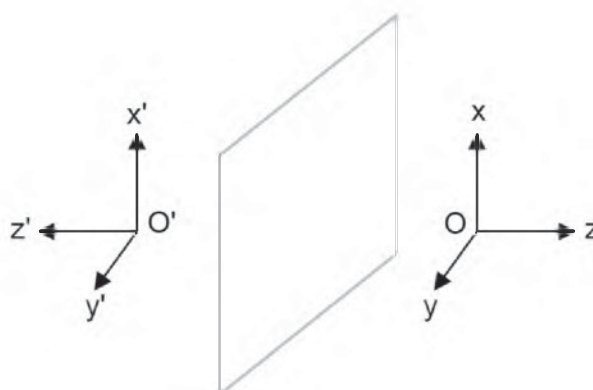
A partir das definições apresentadas é possível justificar o uso do espelho plano com reflexão frontal, uma vez que busca-se a reflexão simples, similar aquelas apresentadas por reflexões especulares. Esta característica é importante para o uso na calibração do sistema de nivelamento, uma vez que a refração deve ser evitada. Hecht (2002) também afirma que a maioria dos espelhos destinados a utilizações de técnicas mais precisas possuem o espelhamento na face frontal.

2.1.2 Formação da imagem de um objeto em um espelho plano

Um espelho é considerado uma superfície plana refletora, pois permite a reflexão dos raios de luz (HALLIDAY; RESNICK, 2009). Desta forma, a imagem formada pelo espelho será virtual, direita, invertida e possui tamanho igual ao do

objeto (YOUNG; FREEDMAN, 2009). Considerando o esquema representado na Figura 6, é possível verificar que a imagem formada por um espelho plano é invertida de trás para frente, ou seja, o eixo do ponto imagem ($O' Z'$) (levógiro) e o eixo do ponto objeto ($O Z$) (dextrogiro) apontam em direções opostas, um em relação ao outro (YOUNG; FREEDMAN, 2009; NUSSENZVEIG, 1998).

FIGURA 6 - CARÁTER REVERSO DA IMAGEM



FONTE: Adaptado de NUSSENZVEIG (1998).

O fato da imagem formada em um espelho plano ter o caráter de ser invertida é importante no desenvolvimento do projeto proposto, pois ao observar com o nível a imagem da mira refletida pelo espelho, ocorrerá uma inversão na visualização dos códigos, sendo necessário utilizar a função de “mira invertida” do equipamento para realizar leituras automáticas.

2.1.3 Características dos espelhos planos

As propriedades físicas apresentadas constituem uma ferramenta para compreender e prever o comportamento da luz em superfícies planas espelhadas (NUSSENZVEIG, 1998; HECHT, 2009). No entanto, as leis da reflexão são válidas apenas em superfícies construídas de forma que as irregularidades superficiais sejam suficientemente pequenas para que possam ser consideradas lisas (HECTH, 2002), assim, é necessário avaliar a quantidade de estrias e cavidades da superfície. Além disso, a qualidade ótica de um espelho deve ser identificada e adequada conforme algumas propriedades, dentre as quais destacam-se a planicidade e o revestimento.

2.1.3.1 Planicidade

A planicidade pode ser entendida como o grau de proximidade existente entre a superfície do espelho plano e um plano ideal (GONÇASVES, 2009). Para verificar esta característica pode ser realizado um teste de interferência baseado nas propriedades ondulatórias da luz, que segundo Santiago Filho (2015), consiste em posicionar em cima do espelho que será aferido um modelo plano padrão. Em seguida, coloca-se uma fonte luminosa, tal que as duas superfícies em contato produzam linhas ou franjas de interferência, causadas pela diferença do caminho percorrido pelas ondas.

Um espelho plano de qualidade deverá apresentar linhas retas e paralelas, no entanto, se a qualidade for baixa podem surgir vários círculos, o que indica que o espelho é côncavo ou convexo. Se as linhas forem irregulares tem-se a indicação de uma superfície ondulada (ZILIO, 2007; SANTIAGO FILHO, 2015).

2.1.3.2 Revestimento

Atualmente, os espelhos podem ser fabricados a partir da deposição de diferentes metais sobre uma face de vidro, onde o tipo de revestimento utilizado é definido de acordo com a utilização do espelho. Dentre os metais mais usados pode-se citar a prata, o alumínio e o ouro, cujos índices de refletividade chegam a 98%, 90%, 99% respectivamente (KING et al.¹, 1998 apud GONÇALVES, 2009).

Durante o processo de calibração de um determinado sistema de nivelamento digital, as medições dependem da reflexão da imagem dos códigos de barras da mira sobre um espelho, assim deve-se utilizar um espelho com um bom índice de refletividade.

¹ KING II, G., EIKLENBORG, M., VILCHECK, M., IOANNOU, S. **Quality control of high precision optical mirrors**. Engineering 801: Engineering Management – Project 2: Quality Control. San Francisco State University. 1998.

2.2 INSTRUMENTAÇÃO PARA NIVELAMENTO GEOMÉTRICO

2.2.1 Níveis digitais

Dentre os métodos voltados para a determinação de desníveis, o nivelamento geométrico é considerado o método mais utilizado (SCHOFIELD; BREACH, 2007). Este, consiste em realizar observações de distâncias verticais através de um nível, utilizado para proporcionar uma linha de visada horizontal sobre miras posicionadas verticalmente em pontos de interesse.

Os níveis são equipamentos classificados de acordo com seu funcionamento e precisão e podem ser denominados de níveis ópticos mecânicos ou níveis automáticos (ópticos ou digitais).

Embora sejam diferentes em termos de construção, todos possuem basicamente dois componentes comuns: (a) uma luneta com sistema de lentes para criar uma linha de visada e permitir que a leitura seja realizada sobre uma mira; e (b) um sistema para orientar a linha de visada em um plano horizontal, por exemplo, níveis de bolha tubular ou compensadores automáticos (GHILANI; WOLF, 2012).

O nível digital é classificado como automático pois utiliza um compensador para se auto nivelar após o operador ter realizado uma calagem aproximada com um nível de bolha circular. Este instrumento permite obter leituras ópticas, mas foi projetado para operar empregando o processamento digital de imagens (GHILANI; WOLF, 2012). Desta forma, a leitura da distância vertical observada pode ocorrer eletronicamente, utilizando um nível digital e uma mira em código de barras (OGUNDARE, 2015).

Para que o instrumento realize leituras automáticas e armazene tais informações, além da mira ser gravada em código de barras, o instrumento deve ser composto por um arranjo linear de sensores CCD, que capturam a imagem da porção visualizada da mira e a compara com uma imagem padrão gravada na memória do instrumento (SILVA; SEGANTINE, 2015). A partir de um método de correlação de imagens, o processador interno do instrumento encontra a melhor correlação e indica o valor da leitura de forma digital (SILVA; SEGANTINE, 2015).

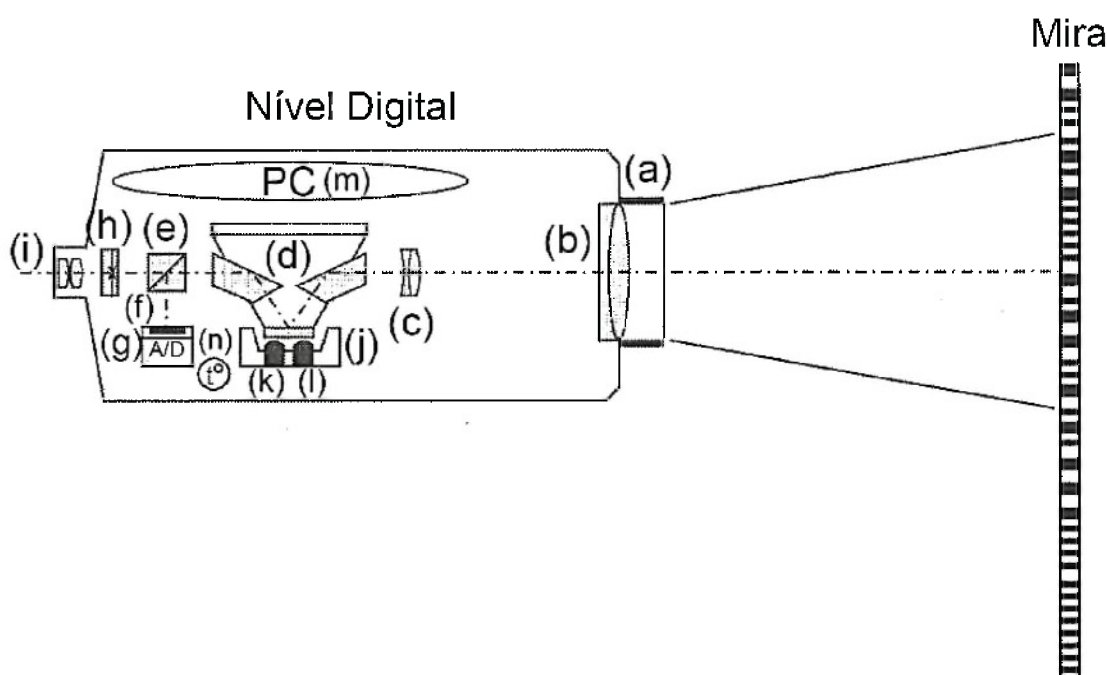
A técnica associada para o processamento das leituras depende do fabricante do instrumento e do código da mira, podendo os algoritmos utilizados serem baseados

em média geométrica, correlação ou análise de Fourier (WOSCHITZ; BRUNNER, 2003).

O comprimento da mira que aparece no campo de visão da luneta e que é lido pelo sensor CCD é função da distância em que a mira se encontra do instrumento, assim, o nível digital pode medir a distância formada entre o instrumento e a mira. Além disso, os níveis digitais possuem programas aplicativos internos que permitem gravar automaticamente os valores medidos (SILVA; SEGANTINE, 2015). Estas são algumas das razões pelas quais houve uma rápida aceitação destes equipamentos (WOSCHITZ, 2003).

Analisando-se a Figura 7 é possível visualizar esquematicamente os principais itens que compõem um nível digital (WOSCHITZ, 2003).

FIGURA 7 - ELEMENTOS QUE COMPÕEM UM NÍVEL DIGITAL



FONTE: Adaptado de WOSCHITZ (2003).

Os itens representados na Figura 7 são identificados como (WOSCHITZ, 2003): (a) acessório para evitar a perturbação da luz; (b) objetiva; (c) conjunto de lentes para focalização; (d) compensador; (e) divisor de feixe; (f) filtro para restringir a radiação que será detectada pelo sensor CCD para uma faixa espectral específica; (g) sensor de imagem (CCD); (h) placas com impressão dos retículos vertical e horizontal; (i) ocular; (j) sistema de controle do compensador; (k) sistema de compensação; (l) sistema de controle do compensador; (m) PC.

compensação de amortecimento; (l) sistema de compensação de vibração, (m) microprocessador (PC); e (n) sensor de temperatura (t°).

Outras considerações podem ser analisadas ao se utilizar um sistema de nivelamento digital (AKSAMITAUSKAS et al., 2008; SILVA; SEGANTINE, 2015):

- a) São eliminados os erros grosseiros oriundos do processo de leitura da mira e de anotação dos dados;
- b) É realizada a leitura automática da distância e da altura observada, o que auxilia na redução do tempo de trabalho devido a agilidade, opção de gravar os dados e segurança no processamento;
- c) Para aumentar o contraste entre os elementos de códigos da mira é necessário iluminação suficiente, possibilitando assim que o instrumento realize medições automáticas;
- d) Além disso, para que o instrumento realize medições automáticas, é preciso visualizar na mira um comprimento maior do que a posição dos fios estadimétricos superior e inferior visualizados através da luneta do nível, onde este comprimento varia de acordo com a distância de observação.

Como comentado, ao utilizar um sistema de nivelamento digital o processo de medição varia de acordo com o fabricante. No caso da empresa Leica Geosystems® a obtenção do desnível ocorre da seguinte maneira (SILVA; SEGANTINE, 2015):

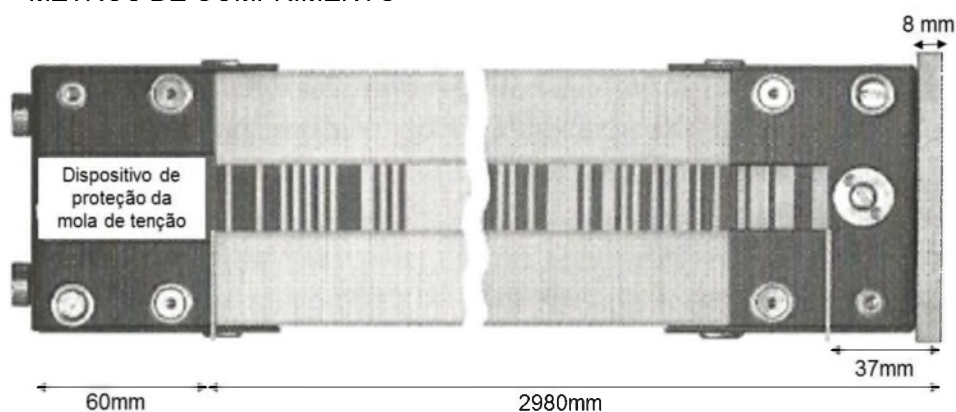
- a) O operador visa a mira, foca a imagem e faz o disparo para a medição;
- b) O instrumento controla se o compensador está ativo;
- c) O instrumento captura uma imagem de parte dos códigos de barras da mira que estão no campo de visão da luneta do instrumento e calcula a distância em função da posição da lente interna de focagem;
- d) A imagem com tons de infravermelho é transformada temporariamente em uma imagem binária para a primeira comparação entre a imagem obtida e a imagem registrada na memória do instrumento (correlação grosseira);
- e) Com a imagem grosseiramente posicionada, o sistema utiliza a imagem completa com tons de infravermelho de 8 bits e realiza uma busca fina da posição mais provável em relação a imagem registrada na memória do instrumento (correlação fina); e
- f) Por fim, indica na tela do instrumento os resultados obtidos, como o desnível e a distância observada.

2.2.2 Miras utilizadas em conjunto com níveis digitais

Existem diversos modelos de miras que podem ser utilizadas durante os procedimentos de nivelamento, podendo ser fabricadas em madeira, alumínio ou ínvar (SILVA; SEGANTINE, 2015). Para levantamentos de precisão, as miras devem ser fabricadas em ínvar, pois minimizam efeitos devido à mudança de temperatura e umidade (GHILANI; WOLF, 2013). O ínvar é uma liga resultante da mistura de 63,8% de aço, 36% de níquel e 0,2% de carbono, o que garante baixo coeficiente de dilatação térmica (AULETE², 1985 apud FAGGION, 1993).

As miras verticais de ínvar utilizadas em nivelamentos geométricos de primeira ordem (Figura 8), em geral são réguas de 3 m ou 2 m de comprimento e são formadas basicamente pela armação, fita de ínvar, nível e alças. Neste caso, a graduação da mira é feita sobre a liga de ínvar, fixada na parte inferior da armação por um sistema de parafusos e na parte superior por uma mola espiral sob tensão, o que mantém a fita isenta de possíveis variações de comprimento da armação, que pode ser fabricada em madeira ou alumínio, e que possui um coeficiente de dilatação diferente do ínvar (FAGGION, 1993).

FIGURA 8 - EXEMPLO DA MIRA DE ÍNVAR LEICA GRAVADA EM CÓDIGO DE BARRAS COM TRÊS METROS DE COMPRIMENTO



FONTE: Adaptado de WOSCHITZ (2003).

Por razões de patente, cada fabricante desenvolveu o seu próprio código de barras e método de processamento. O código de todos os fabricantes é configurado de forma a converter a imagem do arranjo linear CCD em informação digital de

² AULETE, C. Dicionário contemporâneo da língua portuguesa. v. 3. Rio de Janeiro: Editora Delta, 1985.

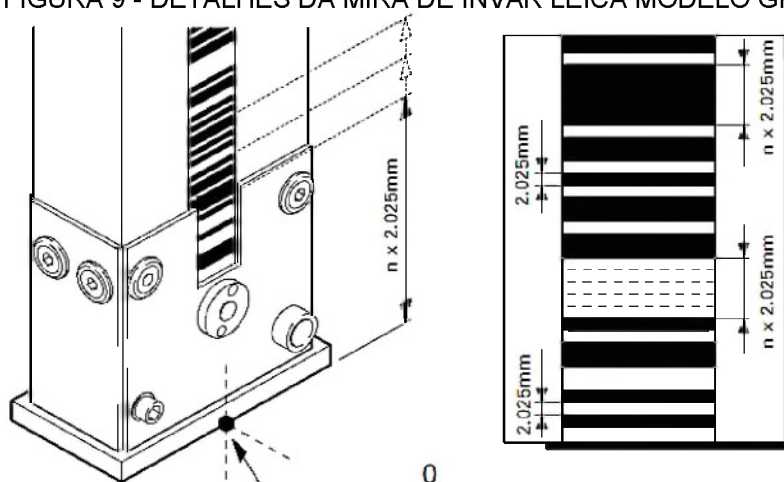
intensidade e posição, por isso, utilizam a transição de dois tons de cor nos traços do código de barras (INGENSAND, 1999).

Durante o processo de fabricação das miras, toda a escala é primeiramente coberta com uma camada para definir a cor dos códigos de barras, geralmente preta, e em seguida, com uma camada de outra cor (comumente amarela). A camada superior (por exemplo, amarela) é removida com um laser de alta energia para tornar visível a cor dos códigos de barras. E, devido a este processo, os elementos de código têm a espessura de alguns micrometros (GASSNER; RULAND; DIX, 2004). Ressalta-se que a maioria dos códigos de barras das miras de ínvar utilizadas com níveis digitais de precisão são produzidas pela empresa NEDO em Dornstetten, na Alemanha (WOSCHITZ, 2003).

O código Leica representa um código binário. As miras da Topcon possuem um código com três padrões individuais de sobreposição. Já o código da Sokkia tem uma variação de largura, onde cada código é definido em relação ao elemento de código básico que tem dimensão de 16 mm (INGENSAND, 1999).

Na Figura 9 é possível visualizar alguns detalhes da mira de ínvar em código de barras utilizada pela empresa Leica Geosystems®. Estas são fabricadas em bandas de 2,025 mm de largura (n), sendo que 15 bandas (30,375 mm) formam um código. Os 134 códigos do sistema são todos diferentes e o instrumento necessita observar pelo menos 2 códigos completos (60,750 mm da mira) para poder realizar medições. Tanto para a mira comum como para a mira em código de barras, a precisão da graduação é estimada como sendo igual a $\pm 0,5$ mm/m e a precisão da posição dos traços é igual a $\pm 0,15$ mm/m (SILVA; SEGANTINE, 2015).

FIGURA 9 - DETALHES DA MIRA DE ÍNVAR LEICA MODELO GPCL2



FONTE: LEICA GEOSYSTEMS® (2007).

2.2.3 Modelos de níveis digitais utilizados nesta pesquisa

Atualmente, existem diversos modelos de níveis digitais disponíveis no mercado, que variam de acordo com o fabricante, precisão, técnica de processamento, dimensão, peso, entre outros. Com o propósito de investigar o desempenho e a escala dos sistemas de nivelamento digitais, serão utilizados nesta pesquisa três diferentes modelos de níveis. Estes, foram produzidos pelas empresas Leica e Foif, contudo, ressalta-se que empresas como Sokkia, Topcon, Trimble, entre outras, também fabricam estes equipamentos.

Entre os instrumentos utilizados está o nível digital Leica DNA03 (Figura 10a), capaz de realizar medições eletronicamente com um desvio padrão de $\pm 0,3$ mm/km para duplo nivelamento, quando utilizada mira de invar gravada em código de barras (Figura 10b). Este equipamento é considerado adequado para levantamentos de primeira ordem e trabalhos de alta precisão, tendo alcance entre 1,8 m a 110 m para medições eletrônicas. Opera entre -20°C a 50°C e possui sensibilidade do nível circular de $8'/2\text{mm}$ (LEICA GEOSYSTEMS, 2006).

FIGURA 10 - SISTEMA DE NIVELAMENTO DIGITAL LEICA DNA03 (A) NÍVEL DIGITAL (B) MIRA GRAVADA EM CÓDIGO DE BARRAS



FONTE: A autora (2017).

Outro modelo de equipamento utilizado foi o nível digital Leica LS15 (Figura 11a). Atualmente, este é considerado um dos equipamentos mais precisos do mercado, atingindo a precisão de $\pm 0,2$ mm/km para duplo nivelamento, quando utilizada mira de invar gravada em código de barras (Figura 11b). Integrado a este instrumento está a função de autofoco, que não só encontra o alvo mais rapidamente, mas também maximiza o contraste da mira. O intervalo de medição fica entre 1,8 m até 110 m e opera entre -20°C a 50°C (LEICA GEOSYSTEMS, 2015).

FIGURA 11 - SISTEMA DE NIVELAMENTO DIGITAL LEICA LS15 (A) NÍVEL DIGITAL (B) MIRA GRAVADA EM CÓDIGO DE BARRAS



FONTE: A autora (2017).

O último sistema de nivelamento digital utilizado foi fabricado pela empresa chinesa Foif, cujo modelo do nível é o EL302A (Figura 12a). A precisão é de $\pm 0,7$ mm/km para duplo nivelamento quando utilizado mira de invar (Figura 12b). O instrumento é capaz de realizar observações em condições de baixa luminosidade, tem alcance para medição de até 105 m, opera entre -20°C a 50°C e possui sensibilidade do nível circular de $8'/2\text{mm}$ (FOIF, [20-?]).

FIGURA 12 - SISTEMA DE NIVELAMENTO DIGITAL FOIF EL302A (A) NÍVEL DIGITAL (B) MIRA GRAVADA EM CÓDIGO DE BARRAS



FONTE: A autora (2017).

2.2.4 Aquisição de imagens com níveis digitais

O processo de formação da imagem digital inicia a partir do momento em que a radiação eletromagnética emitida pela mira atravessa o sistema de lentes do nível e

incide nos elementos sensores. Estes são compostos por fotodetectores³ dispostos em um arranjo linear, podendo com base no tipo da leitura da carga ser classificado como do tipo CCD (GALO, 1993; WOSCHITZ, 2003). Após incidir no elemento sensor, são gerados sinais elétricos proporcionais a intensidade da luz. Estes são armazenados em capacitores e passam por um processo de amplificação, sendo gerado uma série de cargas elétricas. Estas quantidades passam por um conversor analógico/digital (A/D), nome dado ao processo de amostragem de sinais analógicos em uma série de grandezas digitais (GALO, 1993). Em seguida, estes sinais são armazenados em um dispositivo de memória e podem ser utilizados no processamento digital da imagem.

Em cada uma das fases descritas, podem ser introduzidos erros com causas e características diferentes (ALMEIDA, 2001). Assim, uma imagem digital ideal só será obtida quando não houver distorção ou difração no sistema óptico, e ainda, quando houver uma resposta linear dos elementos sensores, ou seja, uma sensibilidade constante de todos os pixels (WOSCHITZ, 2003). Neste sentido, o envelhecimento e as imperfeições do sensor CCD também podem influenciar na qualidade da imagem, degradando o resultado das observações.

As propriedades físicas do nível estão relacionadas com o número de pixels do sensor CCD, ao espaçamento entre os pixels, ao processo de conversão dos sinais analógicos em grandezas digitais, ao comprimento de onda sensível do espectro eletromagnético, a distância focal do sistema de lentes e também a abertura da objetiva (WOSCHITZ, 2003). Cada nível digital do mercado possui uma configuração específica para tais elementos, sendo que estes irão influenciar na aquisição das imagens, pois a dimensão do código de barras da mira que será projetado pelo nível no sensor de imagem é função destas propriedades (WOSCHITZ, 2003).

Dentre os elementos citados, Woschitz (2003) indica que os principais fatores que podem afetar a qualidade da imagem são a distorção do sistema de lentes, a quantização da imagem, o alinhamento e espaçamento entre os elementos sensores, imagens sem foco, distâncias críticas e seções finais das miras, o sensor CCD, entre outros efeitos que serão brevemente discutidos. Tais fatores serão apresentados para que o leitor compreenda as fontes de erros que podem causar imprecisões na obtenção de imagens com níveis digitais, no entanto, devido à complexidade não

³ O fotodetector é um dispositivo que converte luz em sinal elétrico. É o principal elemento de um sensor de imagem, sendo construído com materiais semicondutores (CHMIELEWSKI, 2009).

serão considerados neste momento no processo de calibração dos sistemas de nivelamento.

2.2.4.1 Distorção do sistema de lentes

A distorção do sistema de lentes é decorrente do processo de fabricação, onde, de acordo com Galo (1993), gera perturbações nos raios de luz quando estes atravessam o sistema óptico, prejudicando a qualidade da imagem ou ainda causando o seu deslocamento. Woschitz (2003) afirma que devido à esta distorção, a posição dos códigos de barra da mira desviam da posição calculada no plano da imagem, causando um deslocamento na direção radial. Esta distorção pode ser considerada como uma parcela da refração sofrida pelo raio de luz e pode ser modelada por diferentes polinômios (TOMMASELLI, 2009).

2.2.4.2 Quantização de imagens digitais

No processo de aquisição de imagens há a etapa de conversão A/D que engloba a quantização espacial (discretização) e a quantização em termos de tons de cinza (quantização radiométrica). A quantização espacial pode ser entendida como a conversão da imagem na forma contínua em uma representação discreta. Já a quantização radiométrica está relacionada com a quantidade de níveis de tons que podem ser atribuídos a cada pixel da imagem, sendo estas informações armazenadas em números de bits (GONZALEZ; WOODS, 1993). Por exemplo, a imagem do código de barras da mira pode ser representado por pixels com valores de intensidade que variam de 0 a 256 níveis (8 bits) (WOSCHITZ, 2003). O nível Leica NA3003, Topcon DL101C e Trimble DiNi 12 utilizam um número de 8 bits para armazenar informações, enquanto o nível Leica DNA03 utiliza 10 bits (WOSCHITZ, 2003).

De acordo com Galo (1993), em todo processo de quantização alguma informação é perdida, assim, o erro de quantização espacial e radiométrica pode chegar a meio pixel e meio tom de cinza respectivamente. Portanto, para minimizar estes erros deve-se aumentar o número de elementos sensores e diminuir suas dimensões. Deste modo, pode-se afirmar que quanto maior o número de bits e a

resolução espacial do sensor de imagem, menor os erros de quantização na formação da imagem.

2.2.4.3 Alinhamento e espaçamento entre os elementos sensores

A manutenção do espaçamento e alinhamento entre os pixels no sensor CCD é importante para garantir a qualidade da imagem, pois caso isto não ocorra o resultado será o deslocamento aparente da imagem (GALO, 1993).

2.2.4.4 Imagem sem foco

Uma imagem sem foco pode ser registrada devido a imperfeições do sistema óptico, a não focalização pelo operador do instrumento, ou ainda, devido a vibrações da linha de visada, que podem ser causados por efeitos ambientais, tráfego de veículos ou por vibrações do compensador. Como resultado, leituras imprecisas podem ser obtidas com o sistema de nivelamento (WOSCHITZ, 2003). Segundo Gassner, Ruland e Dix (2004) desvios de cerca de 0,1 mm podem ocorrer ao realizar medições sem foco em distâncias críticas (item 2.2.4.5).

2.2.4.5 Distâncias críticas e seções finais das miras

As propriedades físicas dos níveis digitais são utilizadas pelos fabricantes como parâmetros para o desenvolvimento dos códigos de barra das miras, bem como para as técnicas de processamento das imagens (WOSCHITZ, 2003). Ao variar estas propriedades e também a distância de observação entre o nível e a mira, variam a dimensão da seção da mira vista pelo nível e a dimensão do pixel projetado na mira, podendo resultar em possíveis desvios sistemáticos das leituras (WOSCHITZ, 2003). Estes desvios são inerentes ao sistema e podem relacionar-se com seções específicas da mira, como os extremos (base ou topo), ou com distâncias críticas de observações (WOSCHITZ; BRUNNER, 2002).

O efeito de desvios em algumas distâncias específicas ocorre quando a dimensão das linhas do código de barras, projetadas no sensor CCD, possui exatamente a mesma dimensão de um pixel (WOSCHITZ, 2003). Este desvio também

irá ocorrer se um múltiplo das linhas de código for visualizado e projetado para um número inteiro de pixels (GASSNER; RULAND; DIX, 2006).

A existência de erros em distâncias críticas é bem conhecida para os níveis da empresa Leica (WOSCHITZ; BRUNNER, 2002). Por exemplo, para o nível Leica DNA03, um elemento de código de tamanho de 2,025 mm será projetado no sensor CCD com o tamanho de um pixel quando a distância entre o nível e a mira for de 26,7 m (GASSNER; RULAND; DIX, 2006). Já para o nível Leica NA3000 a distância crítica está a 15 m, podendo ocorrer desvios de cerca de 0,8 mm (GASSNER; RULAND; DIX, 2006).

Elementos de códigos danificados ou ainda leituras nas seções iniciais e finais das miras também podem causar desvios nas leituras (WOSCHITZ; BRUNNER, 2002). As extremidades das miras devem ser evitadas, pois nestas situações o sensor CCD registra um código assimétrico, ou seja, são registradas informações do código de barras da mira, assim como informações de parte do ambiente acima ou abaixo dos códigos. O algoritmo de processamento do nível deve detectar essas regiões corrompidas no CCD e excluí-las dos processos futuros de avaliação, gerando uma imagem incompleta. Como consequência, se a técnica de processamento do nível for sensível a uma imagem incompleta, as leituras observadas serão afetadas por erros sistemáticos, gerando imprecisões de alguns milímetros (WOSCHITZ, 2003; GASSNER; RULAND; DIX, 2006).

2.2.4.6 Sensor de imagem - CCD

O desenvolvimento dos sensores de imagem através da tecnologia CCD (*Charge-Coupled Device*) foi proposta em 1970 por Willard Boyle e George Smith. Estes, são sistemas capazes de capturar a luz e convertê-la em um formato digital (BOYLE; SMITH, 1970). Entre os sensores existentes o sensor CCD pode ser definido como uma matriz de elementos sensíveis a luz, fabricados através da tecnologia MOS (*Metal-Oxide-Semiconductor*) onde cada pixel pode ser considerado como um capacitor MOS que converte fótons em carga elétrica, a qual é armazenada para uma leitura posterior (BOYLE; SMITH, 1970). Esta tecnologia se baseia na varredura das linhas da matriz CCD, onde durante a operação os elétrons gerados pela emissão de fótons sobre o sensor são coletados, armazenados e posteriormente transmitidos de maneira serial por registradores de deslocamento. Na saída do CCD, o sinal de carga

precisa ser amplificado e tratado individualmente, onde posteriormente um conversor A/D transforma o valor da carga do pixel em um código de oito ou mais bits (CHMIELEWSKI, 2009).

Como os sensores de imagem CCD consistem em arranjos de fotodetectores acoplados a um amplificador de detecção de cargas, podem ocorrer ruídos inerentes ao dispositivo (MEDEIROS, 2005).

Devido à natureza aleatória da luz é impossível prever com exatidão quantos fótons incidirão sobre o sensor CCD em um determinado período de tempo. Assim, devido a incidência aleatória do número de fótons sobre o sensor, pode ocorrer o ruído conhecido como *shot noise* (ruído de corrente) (MEDEIROS, 2005).

Outra fonte de ruído ocorre devido às imperfeições da rede cristalina do material semiconductor no interior do dispositivo CCD (MEDEIROS, 2005), gerando a chamada corrente de escuro. Esta é uma corrente que flui no fotodiodo na ausência da luz, deteriorando a imagem e adicionando seu próprio *shot noise* (CHMIELEWSKI, 2009). A corrente de escuro se distribui aleatoriamente pela matriz de pixels, sendo um problema em sensores de imagem, pois é fonte de um ruído de comportamento fixo (*Fixed Pattern Noise – FPN*). Este ruído também acaba sendo responsável pelo ruído temporal, conhecido como ruído de disparo de corrente de escuro. Assim, a corrente de escuro limita a performance dos sensores de imagem em temperaturas altas (CHMIELEWSKI, 2009).

O amplificador de saída do CCD também está sujeito ao ruído térmico ou ruído branco, sendo gerado devido à resistência de saída do amplificador (MEDEIROS, 2005). O vidro de proteção ou placa de quartzo posicionada em frente ao sensor CCD também causa a distorção da imagem, pois causa os fenômenos de reflexão, refração e absorção do sinal (WOSCHITZ, 2003).

Assim, considerando as imperfeições relacionadas ao sensor CCD, Woschitz (2003) afirma que a imagem do código de barras da mira poderá ser distorcida, resultando em uma leitura imprecisa.

2.2.4.7 Outros efeitos

De acordo com Woschitz (2003), defeitos em pixels individuais ou a iluminação não homogênea da mira também impedem ou causam leituras erradas. Em um experimento, Gassner, Ruland e Dix (2004) iluminaram com uma lanterna uma

mira posicionada a 3 m do nível, onde constaram que devido ao sombreamento dos elementos do código podem ocorrer desvios de até 0,1 mm.

Além disso, os valores de intensidade registrados pelo pixels que correspondem as regiões claras ou escuras na mira devem ser os mesmos, independentemente da posição no sensor de imagem. No entanto, os sistemas ópticos de alguns níveis causam uma degradação do brilho, fazendo com que os pixels nessas regiões tenham valores de intensidade menores. Para que o pixel da imagem fique próximo a realidade, uma correção radiométrica deve ser aplicada durante o processamento da imagem (WOSCHITZ, 2003).

2.3 INTERFERÔMETRIA LASER

A palavra laser tem origem nas iniciais em inglês *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, ou seja, amplificação da luz por meio de emissão estimulada de radiação, que se refere ao processo de emissão do raio laser (BARROS, 2002). Os raios laser podem ser gerados em distintos sistemas e são classificados quanto ao meio ativo⁴ empregado (sólido, gasoso ou líquido) (BARROS; MUNÓZ, 2003). Considerando a presente pesquisa, a fonte laser, gerada em um sistema gasoso, é parte de um sistema de medição por interferometria, que possibilita a medida de deslocamentos com alta precisão.

O efeito de interferência ocorre quando ondas idênticas, provenientes de duas fontes, superpõem-se em um ponto do espaço e a intensidade resultante das ondas que se combinam naquele ponto é maior (interferência construtiva) ou menor (interferência destrutiva) do que a intensidade de cada uma delas (BARROS, 2002). Tal princípio é utilizado em um instrumento chamado interferômetro óptico. Neste, os dois raios luminosos partem da mesma fonte, garantindo a mesma frequência e fase, diferindo-se apenas no caminho geométrico da luz (BARROS, 2002).

O primeiro interferômetro foi desenvolvido por Albert Abraham Michelson em 1880 e suas características podem ser estudadas em Michelson e Morley (1887). A partir do interferômetro de Michelson foi desenvolvido o sistema laser de medição linear ou laser interferométrico, sendo este um grande avanço na capacidade de medir distâncias com exatidão (BARROS, 2002). Este instrumento, além de ser utilizado

⁴ Os meios ativos são a base atômica do sistema. É um meio que possui níveis de energia excitáveis e capaz de armazenar a energia recebida da fonte externa (BARROS, 2002).

como padrão de referência na medição de distâncias lineares, é também usado na medição de desvios angulares, planeza, perpendicularidade e paralelismo (GONÇALVES, 2012).

O princípio teórico da medição de um laser interferométrico que trabalha com duas frequências é descrito por Faggion (1993, p. 14):

Os sistemas laser utilizados na medição de comprimento emitem radiação em duas frequências. Para conseguir estas duas frequências o interferômetro foi construído segundo o princípio de ZEEMAN. Este, consiste em aplicar um campo magnético longitudinal na direção do tubo emissor do sinal laser, dividindo-o em duas frequências diferentes (f_1 e f_2). Na sequência, estas duas frequências que possuem polarização circular são convertidas para ortogonal linear através de um filtro polarizador ($\lambda/2$, $\lambda/4$), sendo então expandido. Em seguida, as frequências f_1 e f_2 são emitidas para um divisor de feixe, onde uma pequena porção das duas frequências é extraída para a geração de uma frequência de referência e para a prevenção de erro no gerador do laser. A maior parte do feixe é emitido para o interferômetro que o direciona para os refletores fixo e móvel, que estão defasados de 90° . Após a incidência nos refletores (prismas), elas são refletidas com uma separação entre o feixe incidente e o refletido. Os raios refletidos são novamente recombinados no interferômetro e encaminhados para um fotodetector que capta a diferença de frequência (f_1-f_2). Se a diferença de frequência modular Doppler ($f_1-f_2 \pm \Delta f_1$) desde o interferômetro (caminho externo) e a frequência de referência de batimento (f_1-f_2) é contada por um tempo Δt , o resultado do contador corresponderá ao deslocamento diferencial dos refletores Δd com um comprimento de onda (λ). Assim, é possível obter através de uma transformação matemática realizada por um micro processador o valor das unidades de comprimento já convertidos em milímetros, o qual leva em consideração a correção devido ao índice de refração.

2.3.1 Interferômetro HP 10766A do LAIG

No Laboratório de Instrumentação Geodésica (LAIG) da UFPR foi implantado em 1988 um sistema para calibração de miras verticais de ínvar utilizadas em conjunto com níveis ópticos. Faz parte deste sistema um interferômetro laser modelo HP 10766A, que trabalha com duas frequências, sendo utilizado para efetuar medições de deslocamento (Figura 13). Suas especificações técnicas são (FAGGION, 1993):

- Características do feixe laser:
 - Tipo: Helium – Neon;
 - Comprimento de onda no vácuo: 632,991 nanômetros;
 - Tempo de Aquecimento: menos de 10 minutos;
 - Diâmetro do feixe laser: 6 milímetros.
- Condições Ambientais:
 - Temperatura de operação: 0°C a 40°C;
 - Umidade relativa: 0% a 95%;
- Velocidade máxima de deslocamento: 18.000 mm/min.
- Influência da temperatura: para temperaturas de 20°C \pm 0,5 o erro na distância medida pelo interferômetro é de \pm 0,1 ppm.

FIGURA 13 - INTERFERÔMETRO HP 10766A INSTALADO NO LAIG



FONTE: A autora (2017).

2.3.1.1 Compensação do fator refração

O sistema de medida laser trabalha com a contagem do comprimento de onda do feixe laser durante as várias medições óticas. No entanto, sabe-se que a velocidade da luz é constante no vácuo, mas varia em função da temperatura, pressão e umidade do ar. Uma vez que a frequência do laser é mantida constante, o comprimento de onda irá mudar se variar a velocidade da luz, e tal variação irá afetar as medições. Por isso é necessário que seja realizado a compensação do fator de refração (LASER MEASUREMENT SYSTEM HP 5528A, 1992). Este fator é calculado através das Equações 1 e 2 e pode ser inserido manualmente no sistema interferométrico pelo usuário (LASER MEASUREMENT SYSTEM HP 5528A, 1992).

$$C = \frac{10^{12}}{N + 10^6} - 999000 \quad (1)$$

Com N é igual a:

$$N = 0,3836391P \cdot \left(\frac{1 + 10^{-6} \cdot P(0,817 - 0,0133T)}{1 + 0,0036610T} \right) - 3,033 \cdot 10^{-3} \cdot H(e^{0,057627T}) \quad (2)$$

Onde:

C – Fator de compensação de refração;

P – Pressão do ar (mmHg);

T – Temperatura do ar (°C); e

H – Umidade relativa dor ar (%).

2.4 CALIBRAÇÃO DE SISTEMAS DE NIVELAMENTO DIGITAIS

Os sistemas de calibração de níveis digitais e miras de ínvar gravadas em código de barras também são denominados de sistemas comparadores e são considerados como sinônimos neste trabalho. De acordo com o tipo da estrutura utilizada na calibração, estes sistemas são denominados de sistemas de calibração verticais ou horizontais. A seguir, serão discutidas as características construtivas dos principais sistemas de calibração desenvolvidos no exterior, bem como as metodologias de calibração existentes.

2.4.1 Sistemas de calibração verticais

2.4.1.1 Sistema de calibração vertical do SLAC

Na América do Norte o primeiro sistema de calibração de níveis digitais e miras de ínvar foi construído no Laboratório de Metrologia do Centro de Aceleração Linear de Stanford (SLAC), Estados Unidos, onde o projeto conceitual foi inspirado e construído de acordo com o comparador vertical da Universidade Tecnológica de Graz na Áustria (TUG) (Figura 14) (WOSCHITZ; GASSNER; RULAND, 2006).

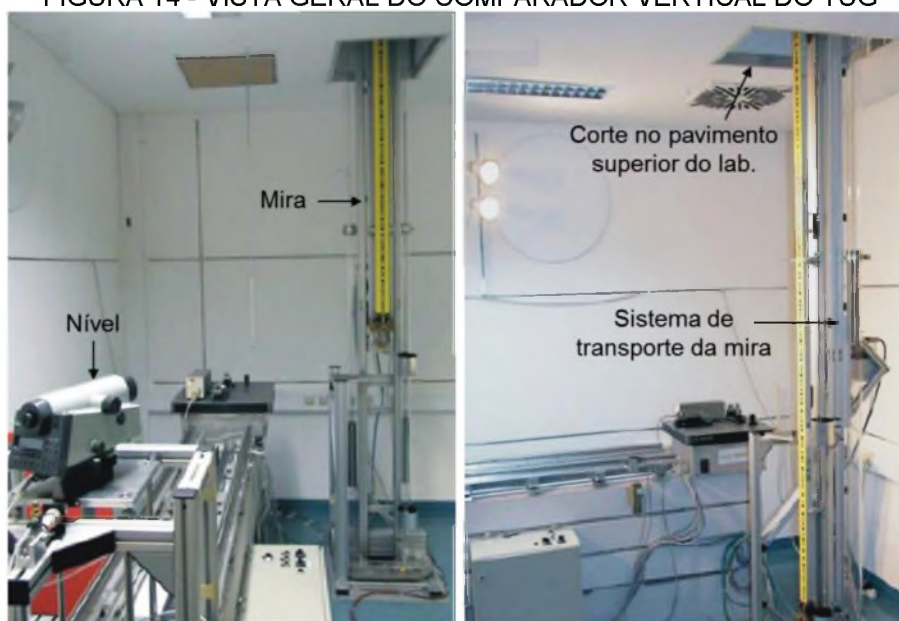
A instalação do sistema de calibração foi realizada em um laboratório com dimensões de 30 m x 5 m e altura de 3 m, onde a temperatura pode ser controlada

em torno de 20°C. Durante a construção do comparador foi necessário perfurar o chão e o teto do laboratório, pois a estrutura onde a mira é fixada deve ser deslocada verticalmente 3 m acima e abaixo da linha de visada do nível, possibilitando a calibração de miras com até 3 m de comprimento (Figura 15). Além disso, este sistema também possibilita realizar a calibração convencional de miras⁵ (WOSCHITZ; GASSNER; RULAND, 2006).

Durante o procedimento de calibração o nível digital deve ser mantido em uma altura constante, onde são realizadas leituras em diferentes posições da mira através do seu deslocamento vertical sob uma estrutura que se move automaticamente em um sistema de trilhos (WOSCHITZ; GASSNER; RULAND, 2006). Outra característica é que uma lâmpada fluorescente é usada para iluminar a mira.

A calibração consiste em comparar as leituras obtidas com o nível com leituras de referência, observadas através do interferômetro laser (modelo Agilent N1231A). Para obter a temperatura média ao longo do percurso do feixe laser e assim corrigir as leituras do sistema interferométrico, seis sensores de temperatura foram posicionados ao longo da vertical. Além disso, sensores de pressão e umidade também são utilizados. A calibração de uma mira de 3 m de comprimento neste sistema dura cerca de duas horas. (WOSCHITZ; GASSNER; RULAND, 2006).

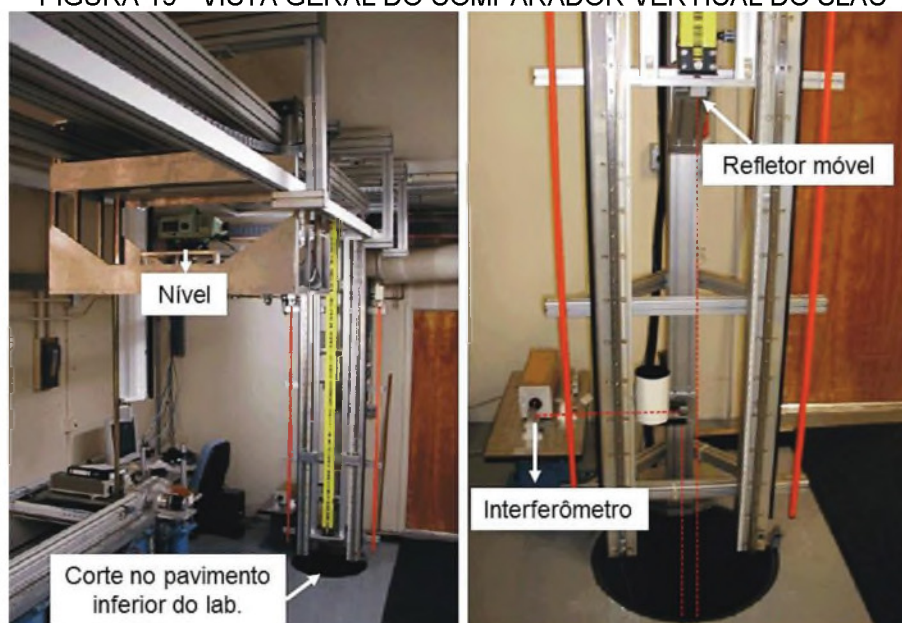
FIGURA 14 - VISTA GERAL DO COMPARADOR VERTICAL DO TUG



FONTE: Adaptado de WOSCHITZ; BRUNNER (2003).

⁵ A calibração convencional de miras verticais de invar consiste em determinar com precisão o afastamento entre os centros dos traços gravados na fita de invar utilizando, por exemplo, sistemas de leituras ótico-mecânicos ou microscópio fotoelétrico (FAGGION, 1993).

FIGURA 15 - VISTA GERAL DO COMPARADOR VERTICAL DO SLAC



FONTE: Adaptado de GASSNER; RULAND; DIX (2004).

É possível observar na Figura 15 que o nível está montado em um sistema de transporte que pode ser deslocado horizontalmente através de trilhos, o que possibilita investigar o resultado da calibração em diferentes distâncias. Este sistema foi fabricado em invar e alumínio a fim de que o suporte seja menos suscetível a mudanças de temperatura, mantendo constante a altura do nível.

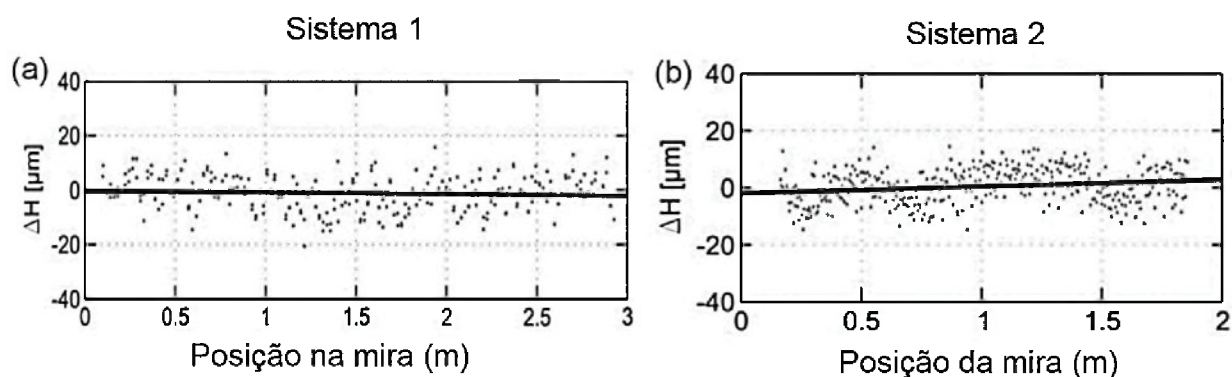
Durante a calibração o nível e o interferômetro não devem se mover um em relação ao outro, mas a expansão térmica das unidades de rolamento ou uma possível inclinação da fundação do laboratório podem causar distorções que afetam as medições (WOSCHITZ; GASSNER; RULAND, 2006). Portanto, o desempenho do sistema de nivelamento calibrado depende de vários fatores, como por exemplo a expansão termal dos elementos que compõem o sistema, iluminação, foco, etc. (WOSCHITZ; BRUNNER, 2003).

Em princípio, a calibração no sistema comparador do SLAC é realizada duas vezes, onde a mira é retirada e reposicionada antes da segunda calibração. O procedimento consiste em efetuar medições da base em direção ao topo da mira e vice-versa. Esta característica possibilita detectar problemas mecânicos na mira, como por exemplo, o mau funcionamento do dispositivo de tensão (WOSCHITZ; GASSNER; RULAND, 2006).

Após o processo de calibração é possível derivar o fator de correção do sistema de nivelamento através de uma análise de regressão linear (WOSCHITZ; GASSNER; RULAND, 2006). Na Figura 16 apresenta-se o resultado da calibração dos

sistemas de nivelamento compostos por um nível digital Leica DNA03 e uma mira de invar Leica n° 9960 (sistema 1) (Figura 17a), e um nível digital Trimble DiNi12 e uma mira de invar Trimble n° 13702 (sistema 2) (Figura 17b).

FIGURA 16 - RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DOS SISTEMAS DE NIVELAMENTO DIGITAIS LEICA (SISTEMA 1) E TRIMBLE (SISTEMA 2) NO SLAC

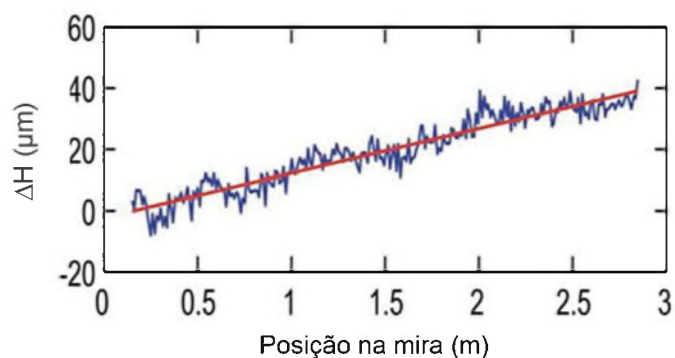


FONTE: Adaptado de WOSCHITZ; GASSNER; RULAND (2006).

Analisando-se a Figura 16 é possível constatar que os desvios das leituras (ΔH) foram menores do que $\pm 20 \mu\text{m}$ para os sistemas 1 e 2, onde foram calibradas miras de três e dois metros respectivamente. Os pontos indicados nas figuras indicam os desvios das posições lidas nas miras, enquanto que as linhas mais escuras indicam a reta determinada pela análise de regressão linear.

O desempenho de outro sistema de nivelamento digital também é apresentado como exemplo do resultado da calibração realizada no comparador do TUG (Figura 17). Neste sistema foram calibrados um nível digital Trimble DiNi12 e uma mira de invar com 3 m de comprimento.

FIGURA 17 - RESULTADO DA CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA DE NIVELAMENTO DIGITAL TRIMBLE NO TUG



FONTE: Adaptado de WOSCHITZ (2005).

Os desvios das leituras (ΔH) chegaram a cerca de 40 μm e a reta indica a linha de regressão linear (Figura 17).

2.4.1.1.1 Incerteza padrão do sistema de calibração do SLAC

Durante o processo de calibração dos sistemas de nivelamento digitais vários parâmetros podem influenciar nos resultados obtidos, como por exemplo as incertezas das medições do interferômetro e o desalinhamento ou instabilidade dos componentes que formam o sistema de calibração (WOSCHITZ; GASSNER; RULAND, 2006).

De acordo com Woschitz, Gassner e Ruland (2006) é uma tarefa muito complexa medir todas as quantidades que causam influência durante a calibração, por isso, os valores verdadeiros não podem ser derivados. No entanto, deve-se conhecer os desvios relativos aos valores verdadeiros, ou seja, aqueles medidos com os sistemas interferométricos, a fim de ser capaz de indicar a sua incerteza da medida (WOSCHITZ; GASSNER; RULAND, 2006).

Para o sistema de calibração do SLAC, Woschitz, Gassner e Ruland (2006) derivaram uma equação matemática (Equação 3) que possibilita calcular a incerteza da medida realizada com o sistema laser. Nesta equação estão inclusas as fontes de erros e suas respectivas incertezas padrão (Tabela 1).

$$L = (C + \Delta C^{EE} + \Delta C^{NL} + \Delta C^{TD}) \cdot \frac{\lambda}{R \cdot n} \cdot \cos \alpha + \frac{D}{\Delta n} \quad (3)$$

TABELA 1 - FONTES DE ERROS E INCERTEZAS PADRÃO NA MEDIDA DA DISTÂNCIA REALIZADA COM O INTEFERÔMETRO LASER NO SISTEMA DE CALIBRAÇÃO DO SLAC

Símbolo	Descrição	Incerteza Padrão
λ	Comprimento de onda do feixe laser ($\lambda \approx 633 \text{ nm}$)	0,01 ppm
C	Número de contagens medido pelo interferômetro (1 cont.= $\lambda/1,024$)	34,6 cont.
ΔC^{EE}	Erro devido a eletrônica do interferômetro	0,6 cont.
ΔC^{NL}	Não linearidade óptica do interferômetro	4,5 cont.
ΔC^{TD}	Varição térmica do sistema óptico do interferômetro	46,7 cont.
R	Resolução do interferômetro	-
n	Índice de refração do ar	0,26 ppm
α	Desalinhamento do sistema de calibração em relação ao feixe laser	44''

(Continua)

(Conclusão)

D	Distância entre o divisor de feixe e a posição inicial do prisma móvel (comprimento morto)	5,8 mm
Δn	Mudança no índice de refração do ar durante a calibração	1,3 ppm

FONTE: Adaptado de WOSCHITZ; GASSNER; RULAND (2006).

As leituras realizadas com o nível digital (H) também são influenciadas por parâmetros externos, deste modo, para derivar as incertezas das leituras do nível é possível aplicar a Equação 4 (WOSCHITZ; GASSNER; RULAND, 2006). Na Tabela 2 são apresentadas as fontes de erros do sistema de calibração do SLAC.

$$H = (A - L + \Delta L^{LC} + \Delta L^{CS} + \Delta L^{LOS} + \Delta h^R) \cdot \frac{1}{\cos \gamma \cdot (1 + \Delta L^S)} \quad (4)$$

TABELA 2 - FONTES DE ERROS E INCERTEZAS PADRÃO NA MEDIDA DA DISTÂNCIA REALIZADA COM O NÍVEL DIGITAL NO SISTEMA DE CALIBRAÇÃO DO SLAC

Símbolo	Descrição	Incerteza Padrão
A	Constante do sistema de calibração	0,6 μm
ΔL^{LC}	Varição da posição do nível devido à expansão termal causada por mudanças de temperatura no laboratório	0,02 μm
ΔL^{CS}	Deslocamento vertical da estrutura de transporte da mira devido a mudanças de temperatura	0,1 μm
ΔL^{LOS}	Mudanças na linha de visada do nível durante a calibração	0 μm
Δh^R	Deslocamento da altura do nível	1 μm
γ	Desalinhamento da mira devido a estrutura de fixação	16''
ΔL^S	Expansão termal da fita de ínvar da mira	0,6 μm

FONTE: Adaptado de WOSCHITZ; GASSNER; RULAND (2006).

As incertezas padrão apresentadas foram estimadas utilizando resultados de experimentos, valores obtidos a partir da literatura ou foram atribuídos valores com base na experiência (WOSCHITZ; GASSNER; RULAND, 2006). Estes dados podem ser utilizados para calcular a incerteza padrão do sistema de calibração através do Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (GUM). No SLAC a incerteza do sistema de calibração para as medições realizadas com o nível chega a $\pm 2,8 \mu\text{m}$ (WOSCHITZ; GASSNER; RULAND, 2006).

2.4.1.2 Sistema de calibração vertical do FGI

No Instituto Geodésico Finlandês (FGI) a calibração de sistemas de nivelamento digitais é realizada desde o ano de 2002, onde a metodologia e a estrutura desenvolvida são baseadas nos mesmos princípios apresentados por Gassner, Ruland e Dix (2004) e Woschitz, Gassner e Ruland (2006).

O laboratório de calibração do FGI (Figura 18) possui dimensões de 10 m x 2,7 m com altura de 8,7 m. Devido a esta dimensão o ambiente é composto por três pavimentos, tendo como particularidade a construção de dois pilares com 4 m de altura nas distâncias de 3 m e 7,6 m. Isto possibilita que a calibração seja realizada em diferentes distâncias, sendo a mira deslocada verticalmente em um sistema de transporte automatizado acima e abaixo da linha de visada do nível (TAKALO; ROUHIAINEN, 2004).

No segundo piso do laboratório são instalados os equipamentos utilizados durante a calibração, por exemplo, o sistema de elevação da mira através de um motor de passo, a estação meteorológica automática, o interferômetro laser, um computador para armazenar os dados, etc. Além disso, o ambiente é climatizado e a temperatura pode ser controlada entre 5°C a 35°C (TAKALO; ROUHIAINEN, 2004).

FIGURA 18 - SEGUNDO PISO DO LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO DE SISTEMAS DE NIVELAMENTO DIGITAIS DO FGI



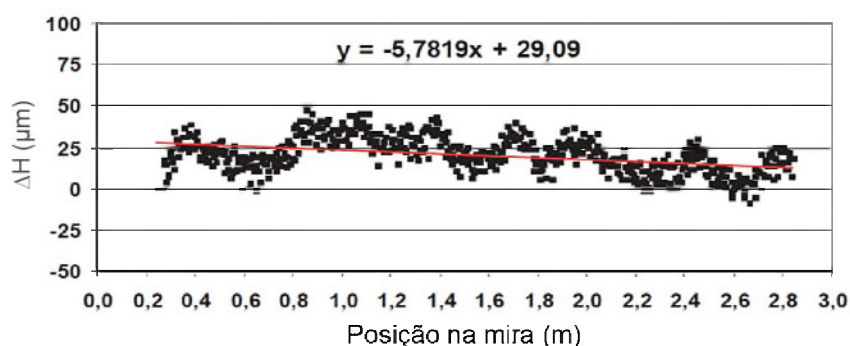
FONTE: Adaptado de TAKALO; ROUHIAINEN (2004).

A metodologia adotada na calibração consiste em efetuar leituras da extremidade inferior até a parte superior da mira e vice-versa. Para obter uma melhor cobertura sobre os códigos mede-se três vezes do topo em direção a base e três

vezes da base em direção ao topo da mira, alterando-se o ponto de partida de 8 mm após a primeira e a segunda medição inversa. As medidas são realizadas a cada 25 mm, sendo as leituras calculadas pela média de três observações sucessivas (TAKALO; ROUHIAINEN, 2004).

Na Figura 19 é possível observar o desempenho do sistema de nivelamento composto pelo nível digital Trimble DiNi12 n° 700960 e a mira LD13 n° 15814, calibrados através do comparador vertical do FGI.

FIGURA 19 - RESULTADO DA CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA DE NIVELAMENTO DIGITAL TRIMBLE NO FGI



FONTES: Adaptado de TAKALO; ROUHIAINEN (2004).

Analisando-se a Figura 19 é possível verificar que os desvios das leituras (ΔH) foram menores do que $\pm 50 \mu\text{m}$. Os pontos indicam os desvios das posições lidas sobre a mira e a equação representa a relação funcional entre os desvios e a linha de tendência obtida pela análise de regressão linear.

2.4.1.2.1 Incerteza padrão do sistema de calibração do FGI

As incertezas e as fontes de erros que influenciam o resultado das leituras de referência podem ser analisados na Tabela 3. Segundo Takalo e Rouhiainen (2004) estas informações foram derivadas a partir da calibração original fornecida pelos fabricantes dos equipamentos ou através de testes realizados pelo próprio autor.

TABELA 3 - FONTES DE ERROS E INCERTEZAS PADRÃO DO COMPARADOR DO FGI

Fontes de Erro	Incerteza Padrão
Comprimento morto	0,002 μm
Equação de Edlen ⁶	0,025 μm
Frequência do feixe laser	0,003 μm
Sensor de pressão do ar	0,028 μm
Sensor de umidade	0,019 μm
Sensor de temperatura	0,048 μm
Erro de Abbe ⁷	0,070 μm
Erro de cosseno	0,054 μm
Instalação da mira	0,002 μm
Expansão termal da mira	0,074 μm
Expansão termal do sensor de temperatura e umidade	0,035 μm

FONTE: Adaptado de TAKALO; ROUHIAINEN (2004).

Considerando as informações apresentadas e o Guia para a Expressão da Incerteza de Medição, Takalo e Rouhiainen (2004) obtiveram o valor da incerteza padrão das medições realizadas com o interferômetro laser igual a $\pm 0,14 \mu\text{m}$.

Durante a observação da mira com o nível, de 4 a 6 segundos, a mira pode acabar deslizando no comparador cerca de $2 \mu\text{m}$ devido ao desequilíbrio do sistema de transporte vertical. Portanto, foi estimado a incerteza padrão devido ao deslizamento da mira ($\pm 0,58 \mu\text{m}$). A incerteza da leitura efetuada com o nível é de $\pm 1,73 \mu\text{m}$ e a incerteza padrão do sistema de calibração é de $\pm 5,18 \mu\text{m}$.

2.4.2 Sistemas de calibração horizontais

Os sistemas de calibração horizontais para sistemas de nivelamento digitais foram desenvolvidos como alternativa aos comparadores verticais. Tais sistemas foram construídos, por exemplo, na Universidade de Bundeswehr - Munique, no Japão no GSI (*Geospatial Information Authority of Japan*), no Instituto de Geodésia

⁶ A equação de Bengt Edlen é utilizada calcular o índice de refração do ar para as diversas condições ambientais de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), pressão (torr) e umidade (%) (BARROS; MUNÖS, 2003).

⁷ Erro de Abbe: o princípio de Abbé afirma que em uma medição de deslocamento, o caminho efetivo do instrumento deve ser colinear ao caminho funcional do mesmo. A falta desta colinearidade resulta no chamado erro de Abbé (MORAIS, 2012).

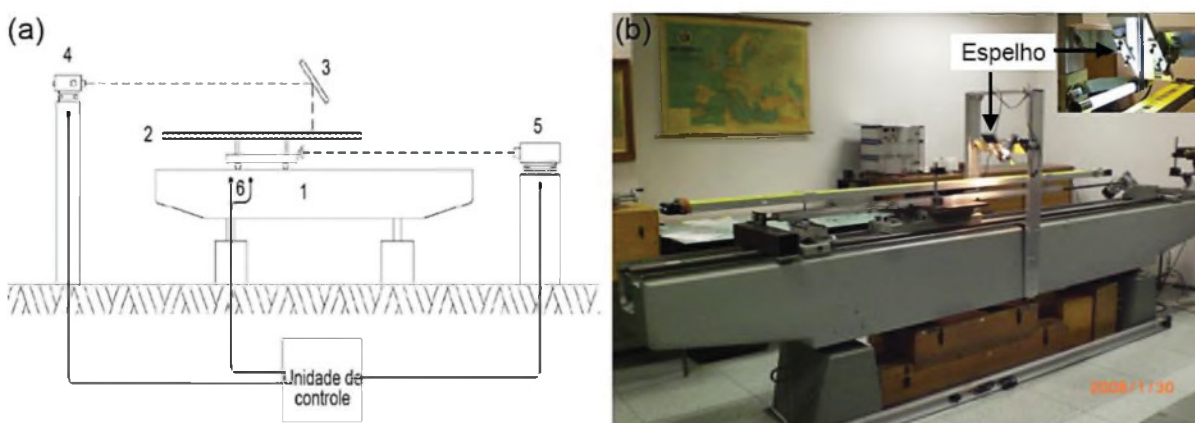
Avançada da faculdade de Engenharia Civil (CTU) de Praga e no Laboratório de Metrologia em Kuala Lumpur – Malásia (JUPEM).

Segundo Vyskocil e Lukeš (2015), o benefício do comparador vertical é que o nível pode ser posicionado em diversas distâncias, mas tem como desvantagem um grande espaço na vertical para a construção (duas vezes o comprimento da mira). Já no sistema de calibração horizontal o espaço físico necessário é menor, o que pode minimizar os custos para a implantação do sistema de calibração (VYSKOCIL, 2008).

A calibração nos sistemas horizontais é baseado no princípio dos comparadores verticais, mas com a diferença da mira ser deslocada na posição horizontal. Como consequência, um espelho deve ser utilizado para a visualização da imagem do código de barras da mira (VYSKOCIL, 2008).

Na Figura 20 é possível visualizar o princípio do sistema de calibração horizontal construído no CTU. O sistema (Figura 20a) é composto basicamente por (VYSKOCIL; LUKEŠ, 2015): estrutura de calibração (1), mira (2), espelho (3), nível (4), interferômetro laser (5) e sensores meteorológicos (6).

FIGURA 20 - SISTEMA DE CALIBRAÇÃO HORIZONTAL DO CTU



FONTE: Adaptado de VYSKOCIL; LUKEŠ (2015).

Observa-se na Figura 20b que no sistema de calibração do CTU a mira é posicionada sobre um suporte horizontal, que segundo Vyskocil e Lukeš (2015) possui três parafusos que permitem configurar a sua horizontalidade. O deslocamento da mira é realizado por um sistema de transporte automatizado com um motor de passo, onde a engrenagem e o motor de passo permitem um posicionamento com resolução de cerca de 10 μm , mas limita a velocidade de deslocamento (VYSKOCIL; LUKEŠ, 2015). Para que uma imagem vertical da mira seja visualizada pelo nível, foi instalado

um espelho inclinado a 45° em relação a linha de visada do nível e simultaneamente a linha normal da mira (VYSKOCIL, 2008). Este espelho está fixo no centro do sistema de calibração através de um suporte retangular de alumínio e parafusos para a definição precisa da sua posição, possuindo dimensões de 25 cm x 10 cm e espessura de 2 cm (VÁCLAV, 2012).

No processo de calibração são realizadas leituras com o nível em toda a extensão da mira através do seu deslocamento, sendo as medidas comparadas com as medidas de referência realizadas com um interferômetro laser. O refletor móvel do interferômetro fica posicionado no sistema de transporte da mira e os desvios das leituras podem ser processados por modelos de regressão linear, proporcionando a escala ou fator de correção do sistema de nivelamento (VYSKOCIL; LUKEŠ, 2015).

Como representado na Figura 20a, o nível digital encontra-se fixo sobre um pilar na posição oposta ao interferômetro, onde, devido as dimensões do laboratório, as leituras realizadas com o nível podem variar entre 2,5 m e 6 m de comprimento, o que é considerado suficiente para o procedimento de calibração (VYSKOCIL; LUKEŠ, 2015).

De acordo com Vyskocil (2008), todo o processo de calibração é controlado por um software desenvolvido no próprio CTU, onde a calibração de uma mira de 2m, com intervalos de observações a cada 20 mm, tem duração de cerca de 30 minutos.

Na Figura 21 é possível visualizar o comparador horizontal do JUPÉM, similar ao do CTU e totalmente automatizado.

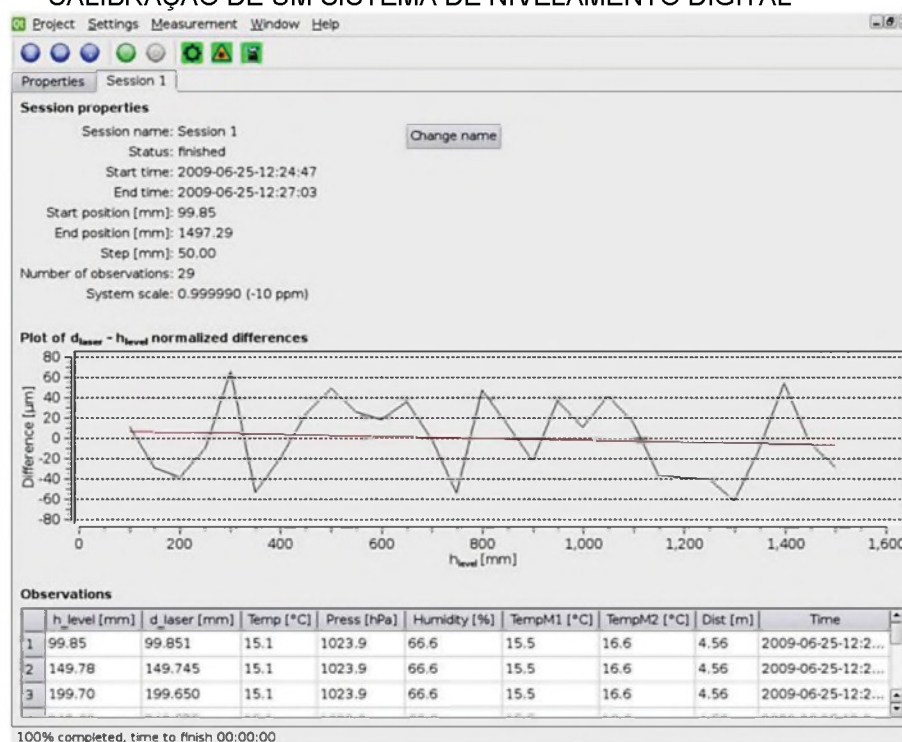
FIGURA 21 - COMPARADOR HORIZONTAL NO JUPÉM



FONTE: VYSKOCIL; LUKEŠ (2015).

O resultado da calibração de um sistema de nivelamento digital pode ser analisado na Figura 22, onde foi possível constatar que ocorreram desvios de cerca de $\pm 60 \mu\text{m}$. Nesta imagem também é possível visualizar a posição da leitura inicial e final da mira de 2 m, o comprimento do passo, o número de observações efetuadas e a janela de execução do software de calibração do CTU.

FIGURA 22 - JANELA DO SOFTWARE DE CALIBRAÇÃO DO CTU E O RESULTADO DA CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA DE NIVELAMENTO DIGITAL



FONTE: VYSKOCIL; LUKEŠ (2015).

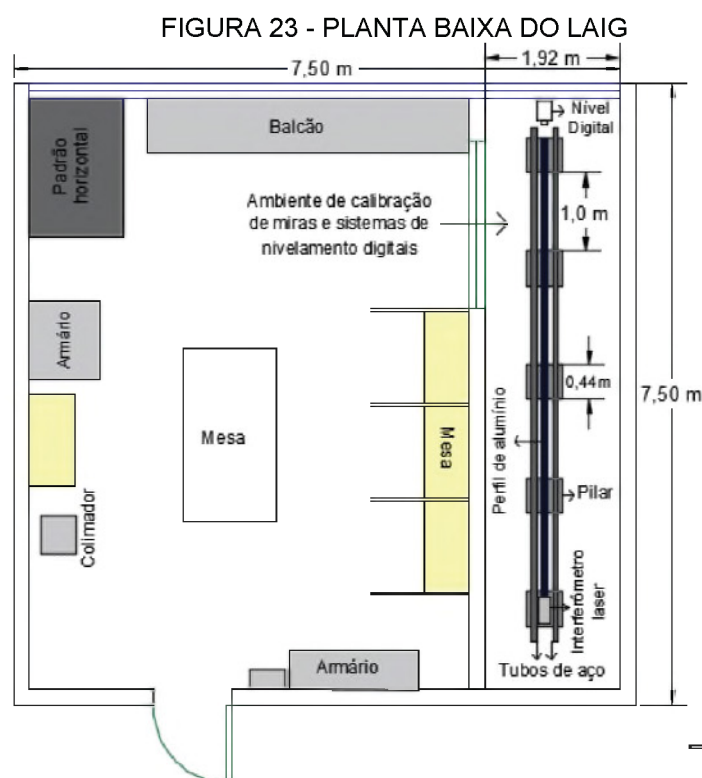
Após apresentar e descrever alguns dos sistemas de calibração vertical e horizontal desenvolvidos e utilizados na calibração de sistemas de nivelamento digitais em diversos países, será apresentado no item 3 a metodologia adotada para a adequação do sistema de calibração horizontal proposto.

3 METODOLOGIA

Com base nos sistemas de calibração apresentados, desenvolveu-se uma nova metodologia para a calibração de sistemas de nivelamento digitais através da adequação da estrutura de calibração de miras verticais de ínvar do LAIG, transformando-a em um sistema de calibração horizontal. Tal proposta ainda possibilitará a calibração convencional de miras, tendo como principal diferença em relação aos sistemas existentes a característica de manter inalterada a posição da mira, evitando-se possíveis imprecisões devido ao seu deslocamento. A seguir, serão discutidas e apresentadas as etapas que englobam o projeto até a execução da calibração dos sistemas de nivelamento digitais.

3.1 SISTEMA DE CALIBRAÇÃO DE MIRAS VERTICAIS DE ÍNVAR DO LAIG

No Laboratório de Instrumentação Geodésica da UFPR são realizados estudos voltados a calibração, classificação, verificação e retificação de instrumentos topográficos e geodésicos (FAGGION, 1993). O laboratório localiza-se na sala P105 do bloco VI do departamento de Geomática, onde suas dimensões são 7,50m x 7,50m e altura de 4m (Figura 23).



Fonte: O autor (2017).

O LAIG é equipado com um sistema de condicionamento de ar, que possibilita manter a sala na temperatura desejada para trabalhos de calibração, sendo a temperatura de referência igual a $\pm 20^{\circ}\text{C}$ (WOSCHITZ; GASSNER; RULAND, 2006). Além disso, as janelas são isoladas com placas de isopor com 4 cm de espessura, que segundo Nadal (2000) ajudam na manutenção da estabilidade da temperatura do ambiente.

Através de um convênio entre o Brasil e a Alemanha, instalou-se em 1988 uma estrutura para a calibração de miras verticais de ínvar utilizadas com níveis ópticos mecânicos e automáticos (FAGGION, 1993). De acordo com Faggion (1993) este sistema é composto principalmente pelos seguintes elementos:

- a) Interferômetro, emissor do laser (denominado sinal laser He - Ne) e contador e mostrador (processador matemático que transforma a diferença de fase da onda eletromagnética em distância);
- b) Pilares - são cinco pilares construídos em concreto armado e engastados na laje do piso do laboratório, sendo afastados entre si a cada um metro. Sobre estes está fixo um suporte de tubos de aço;
- c) Tubos de aço - são tubos de 5 m de comprimento, cujo diâmetro interno é de 5,8 cm e externo de 6,0 cm;
- d) Sistema de fixação dos tubos - é constituído por peças de alumínio que possuem três parafusos calantes para colocar os tubos paralelos e em posição horizontal;
- e) Sistema de transporte horizontal - carrinho de transporte que contém o refletor móvel do interferômetro, um nível tubular de precisão e uma luneta, sendo apoiado em três rodas que se deslocam sobre os tubos de aço; e
- f) Suporte para os equipamentos a serem calibrados - consiste em um perfil vazado de alumínio com as seguintes especificações: paredes externas 4,0 cm x 7,5 cm e paredes internas 3,8 cm x 7,3 cm com 5 m de comprimento.

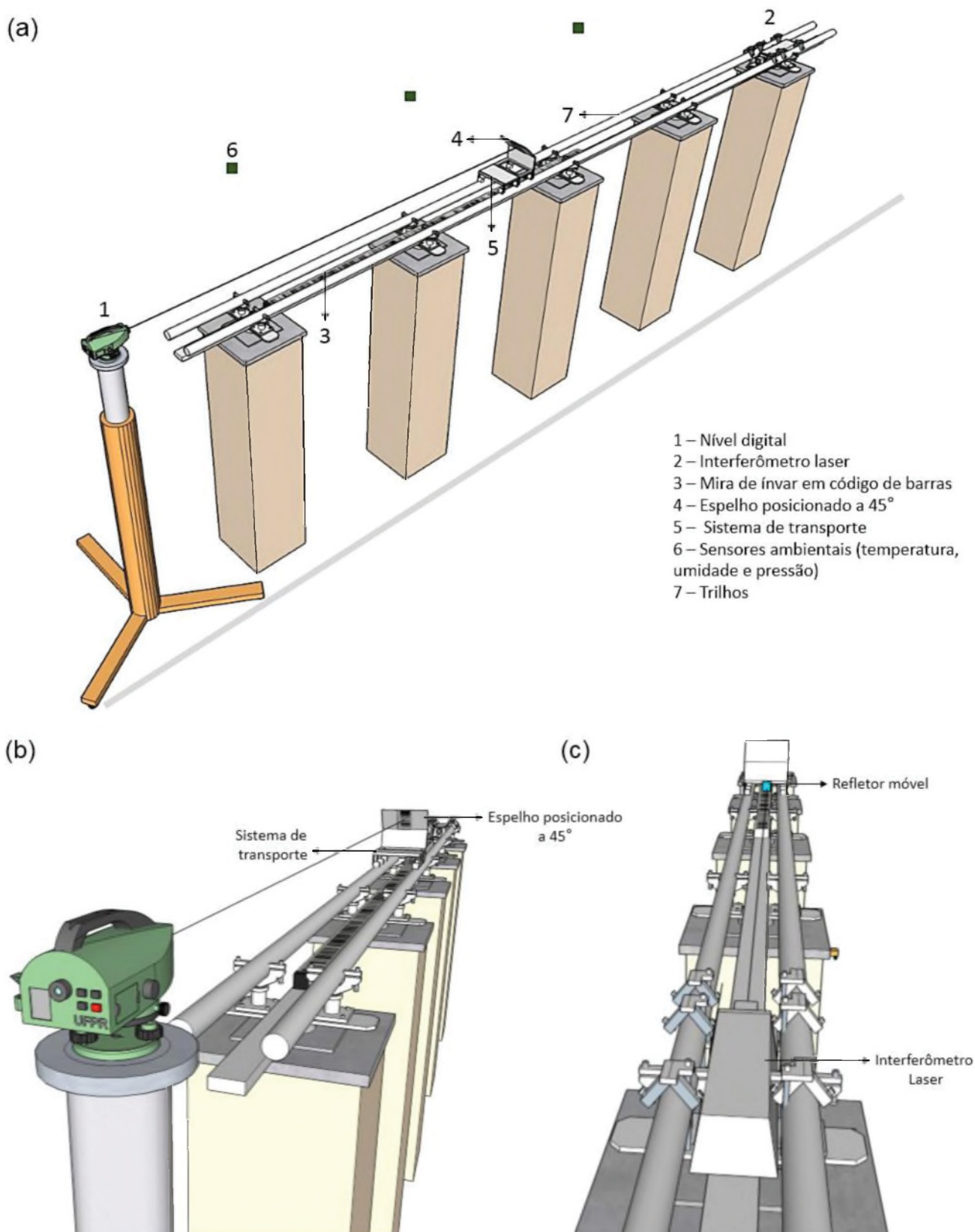
3.2 CALIBRAÇÃO HORIZONTAL DE SISTEMAS DE NIVELAMENTO DIGITAIS

Na concepção básica dos sistemas de calibração apresentados a mira é deslocada em uma estrutura na posição horizontal ou vertical, permanecendo inalteradas as posições do nível e do interferômetro, e no caso dos sistemas horizontais, o espelho. Contudo, ao propor que a mira permaneça estática durante todo o procedimento de calibração, uma nova metodologia e adequação do sistema de calibração devem ser adotados para que as leituras realizadas com o nível e com o sistema interferométrico possam ser realizadas. Deste modo, um novo conceito para a calibração deve ser introduzido.

Na Figura 24a representa-se o princípio da calibração proposta para o LAIG, onde o nível digital é instalado sobre um tripé industrial na posição oposta ao sistema interferométrico. A mira é nivelada e posicionada na horizontal sobre o perfil de alumínio instalado logo abaixo dos trilhos. Sobre os trilhos é possível mover o sistema de transporte horizontal que desloca o espelho para a observação da imagem dos códigos de barras da mira, o refletor móvel do interferômetro, uma luneta e um nível tubular de precisão. E próximo ao percurso do feixe laser do interferômetro estão posicionados três sensores de temperatura, umidade e pressão do ar.

Com base na Figura 24bc é possível visualizar que ao deslocar o sistema de transporte (onde estão fixos o espelho, a luneta, o nível tubular de precisão e o refletor móvel do interferômetro) será possível realizar leituras em toda a extensão da mira, mantendo-se inalteradas as posições dos instrumentos envolvidos na calibração. Para facilitar a compreensão das características apresentadas, cada item será discutido detalhadamente adiante.

FIGURA 24 - (A) SISTEMA DE CALIBRAÇÃO HORIZONTAL PROPOSTO (B) OBSERVAÇÃO COM O NÍVEL DIGITAL DA IMAGEM REFLETIDA PELO ESPELHO DOS CÓDIGOS DE BARRAS DA MIRA (C) SISTEMA LASER DE MEDIÇÃO E REFLETOR MÓVEL FIXO NO SISTEMA DE TRANSPORTE



Fonte: O autor (2017).

3.2.1 Propriedades físicas do espelho utilizado no sistema de calibração horizontal proposto

O espelho utilizado no sistema de calibração projetado foi construído de acordo com a propriedade de espelhamento frontal, ou seja, tem a característica de não utilizar vidro antes da superfície espelhada, por isso, como apresentado no item 2.1, os raios incidentes refletem sem sofrer desvios devido a refração (CRUZ, 2015). Além disso, foi fabricado com metalização em cromo, com índice de refletividade de cerca de 42,7%, depositado sobre uma base de cristal de 3mm (DE PAULA, 2016⁸). De acordo com o fabricante o espelho pode ser considerado plano, o que é ideal para os trabalhos de calibração, pois a normal é perpendicular à superfície em todos os seus pontos e a reflexão é especular (YOUNG; FREEDMAN, 2009).

3.2.2 Projeto de dimensionamento do espelho

Como visto, o princípio do sistema de calibração horizontal proposto tem como premissa possibilitar a observação indireta de leituras eletrônicas através da reflexão da imagem de uma mira em código de barras sobre um espelho posicionado a 45°. A fim de estabelecer a dimensão ideal do espelho, de acordo com o tamanho da estrutura de calibração, foi necessário investigar dois fatores: o intervalo mínimo de visualização na mira para que o equipamento realize leituras eletrônicas e o ângulo mínimo do campo de visão do nível de acordo com a distância de observação utilizado para leituras eletrônicas. Com base nos resultados obtidos foi possível calcular as dimensões do espelho.

3.2.2.1 Intervalo e ângulo mínimo de visualização na mira

Para o correto dimensionamento do espelho que será utilizado no sistema de calibração apresentado, foi necessário investigar qual o comprimento mínimo na mira (L_{\min}) que o nível captura e utiliza para realizar leituras automáticas de acordo com a distância de observação (Figura 25).

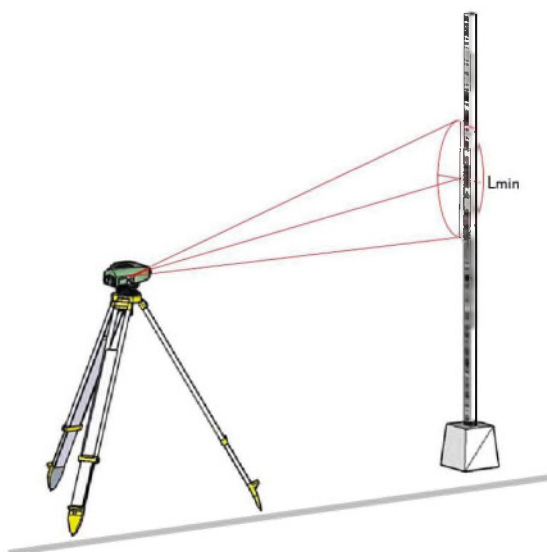
⁸ DE PAULA, L. Saraiva. **Característica do Espelho**. [Mensagem pessoal]. Mensagem recebido por: <pedro.faggion@gmail.com>. 27 Jun. 2016.

No experimento realizado foram utilizados um nível digital Leica DNA03 e uma mira de invar em código de barras com 3 m de comprimento, posicionada verticalmente sobre uma sapata. O comprimento do intervalo mínimo equivale ao comprimento na mira do intervalo formado além dos fios estadimétricos superior e inferior para que o equipamento realize medidas eletronicamente.

Com o propósito de determinar qual o comprimento deste intervalo mínimo em diferentes distâncias, realizou-se um experimento onde a maior distância observada foi limitada pelas características do sistema de calibração, chegando ao máximo de 5,50 m de comprimento. O procedimento para o teste foi baseado em Andolfato (2010) e consistiu dos seguintes passos:

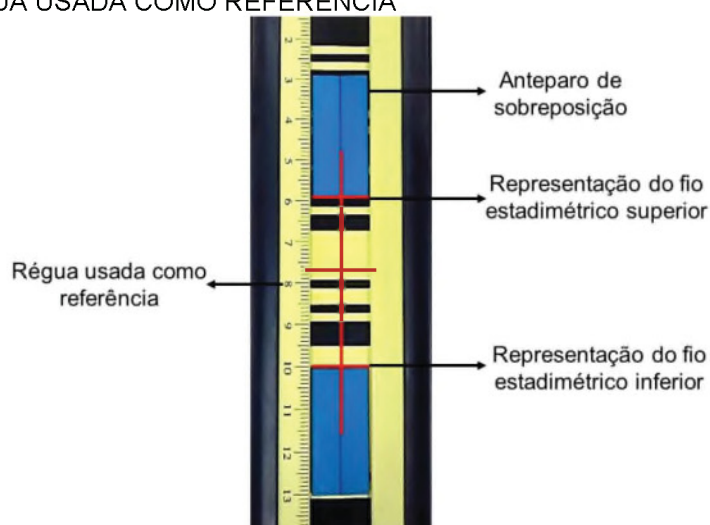
- a) Instalou-se o nível digital DNA03 sobre um tripé industrial a aproximadamente 1,80 m da mira. Após ajustar o foco da imagem foi possível visualizar através da luneta do instrumento a projeção dos fios estadimétricos sobre a mira;
- b) Com ajuda de um auxiliar, tangenciou-se na mira a posição dos fios estadimétricos superior e inferior com dois anteparos, de modo a recobrir parte dos códigos de barras restantes. Tanto para o processo de tangência, quanto para o movimento dos anteparos utilizou-se uma régua impressa em papel adesivo, fixa próximo ao código de barras (Figura 26).
- c) Na sequência, foi feito o disparo para leitura automática da altura do plano horizontal observada. Caso a leitura não fosse possível, deslocava-se os anteparos a cada 1 mm até que a leitura fosse possível;
- d) Em seguida, mediu-se o comprimento do intervalo mínimo com o auxílio de um paquímetro digital; e
- e) Por fim, repetiu-se todo o processo apresentado adicionando-se 0,5 m a distância nível-mira até chegar a 5,50 m (valor necessário para o sistema de calibração).

FIGURA 25 - INTERVALO MÍNIMO DE VISUALIZAÇÃO DOS CÓDIGOS DE BARRAS DA MIRA PARA QUE O NÍVEL REALIZE LEITURAS AUTOMÁTICAS



Fonte: O autor (2017).

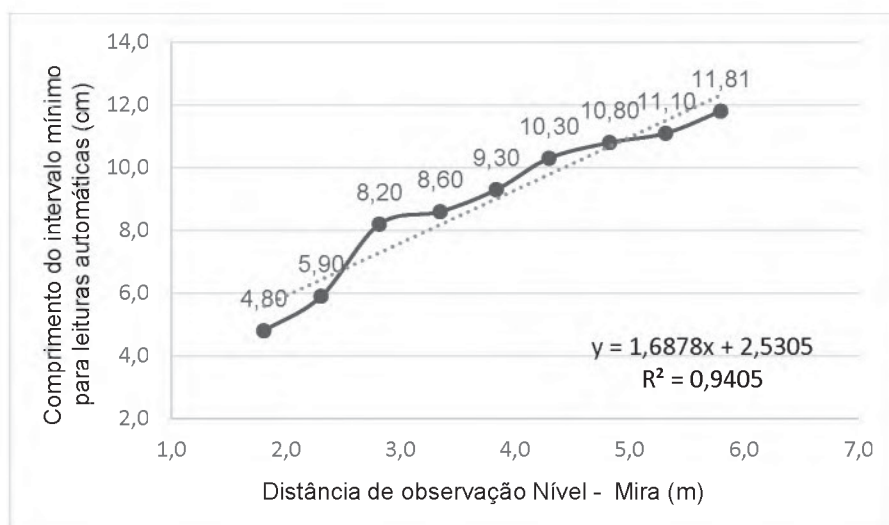
FIGURA 26 - INDICAÇÃO DA TANGÊNCIA DOS ANTEPAROS NOS FIOS ESTADIMÉTRICOS E RÉGUA USADA COMO REFERÊNCIA



Fonte: O autor (2016).

Os resultados podem ser analisados na Figura 27, onde os intervalos mínimos estimados para leituras automáticas na mira, de acordo com a distância de observação formada entre o nível digital e a mira em código de barras, são apresentadas.

FIGURA 27 - COMPRIMENTO DO INTERVALO MÍNIMO NA MIRA PARA QUE O NÍVEL DNA03 REALIZE MEDIDAS ELETRÔNICAS EM DIFERENTES DISTÂNCIAS



Fonte: O autor (2016).

Analisando a Figura 27 é possível verificar que o intervalo de visualização na mira aumenta quanto maior a distância entre o nível e a mira. Aplicando-se uma regressão linear foi possível obter a Equação 5, que pode ser utilizada para estimar o comprimento mínimo do campo de visão sobre a mira para a realização de uma observação levando-se em consideração o afastamento da mira ao nível.

$$L_{mira} = y = 1,6878 x + 2,5305 \quad (5)$$

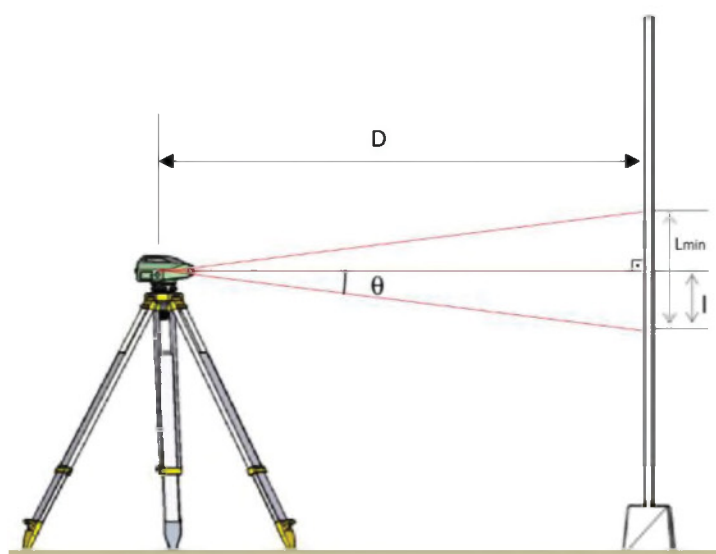
Nesta regressão linear o coeficiente de x é uma constante e representa a inclinação da reta, o termo x indica a variável independente (distância nível-mira de interesse) e o último coeficiente representa a distância da interseção da reta com o eixo vertical em relação a origem. O coeficiente de determinação (R^2) calculado indica que 94% das variáveis utilizadas são explicadas pelo presente modelo. Já o coeficiente de correlação (R) foi de 0,969, indicando correlação fortíssima entre as variáveis.

Considerando a máxima distância de observação no sistema de calibração, ou seja, 5,50 m, o comprimento mínimo de visualização na mira para que o equipamento realize leituras eletrônicas é de 11,81 cm.

De acordo com os testes realizados por Andolfato (2010), o ângulo do campo de visão mínimo necessário para leituras automáticas é inferior ao ângulo total do

campo de visão do nível fornecido pelo manual técnico do equipamento (por exemplo 2° no caso do nível Leica DNA03), ou seja, não é necessário visualizar a abertura total do campo de visão do nível para que sejam realizadas leituras automáticas. Deste modo, com base em Andolfato (2010) e a partir da Figura 28 deduziu-se uma equação para o cálculo do ângulo mínimo do campo de visão (θ), considerando metade do comprimento mínimo de visualização na mira para leituras automáticas (l) e a distância formada entre a mira e o nível.

FIGURA 28 - INDICAÇÃO DO ÂNGULO MÍNIMO DO CAMPO DE VISÃO DO NÍVEL



FONTE: Adaptado de Leica (2006).

$$\theta = \arctan \frac{l}{D} \quad (6)$$

Calculando-se o ângulo mínimo para a distância de observação no sistema de calibração proposto chega-se a θ igual a 36' 54,45". Esta informação juntamente com o comprimento mínimo de visualização na mira (11,81 cm) foram utilizados no cálculo do dimensionamento do espelho (item 3.2.2.2).

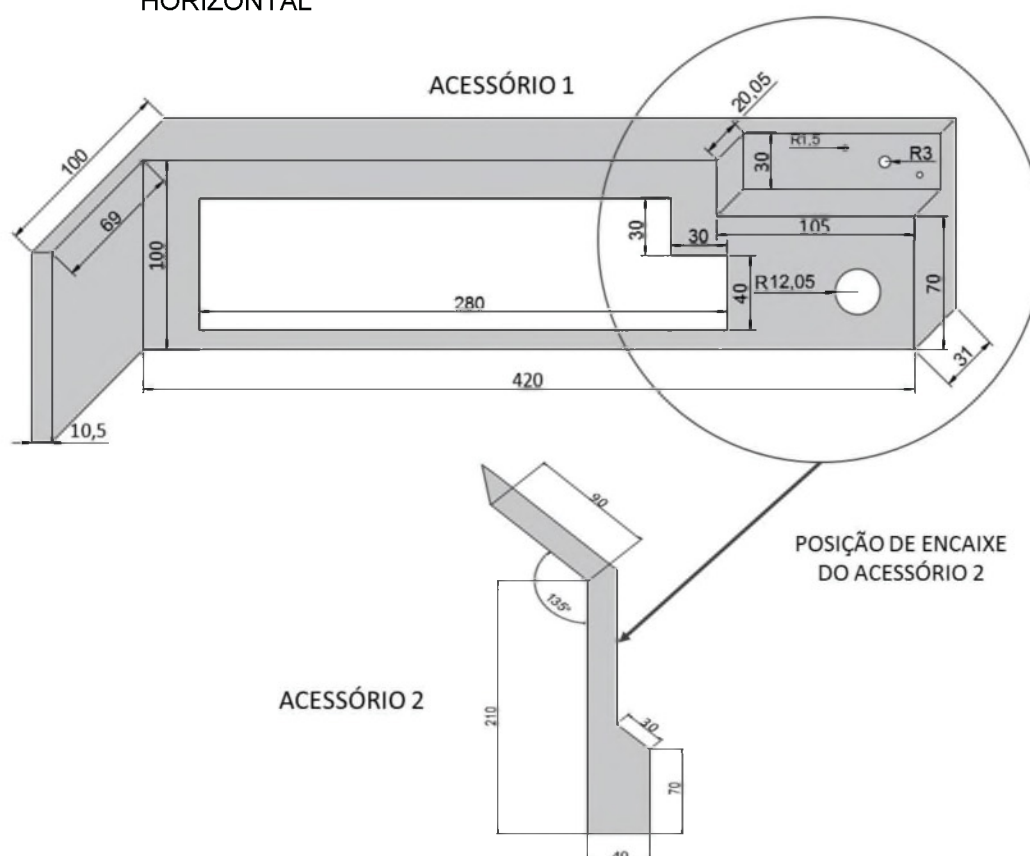
3.2.3 Projeto e execução de um acessório para adequação do sistema de calibração horizontal proposto

Para viabilizar o sistema de calibração horizontal proposto foi projetado um acessório para fixar o espelho a 45° no sistema de transporte que se desloca sobre

os trilhos. Os primeiros esforços para o desenvolvimento deste acessório consistiu em fabricar um protótipo de madeira e assim verificar as dimensões necessárias para que fossem efetuadas observações indiretas nos códigos de barras das miras de nivelamento.

Realizados alguns testes definiu-se que o acessório de adequação seria composto por um conjunto de duas partes, denominados de acessórios 1 e 2 (Figura 32). Estes, foram usinados em alumínio em fresas controladas por computador, possibilitando a fabricação de forma precisa e com o tamanho e formato específico para as características originais do sistema de transporte.

FIGURA 29 - PROJETO DO ACESSÓRIO DE ADEQUAÇÃO DO SISTEMA DE CALIBRAÇÃO HORIZONTAL



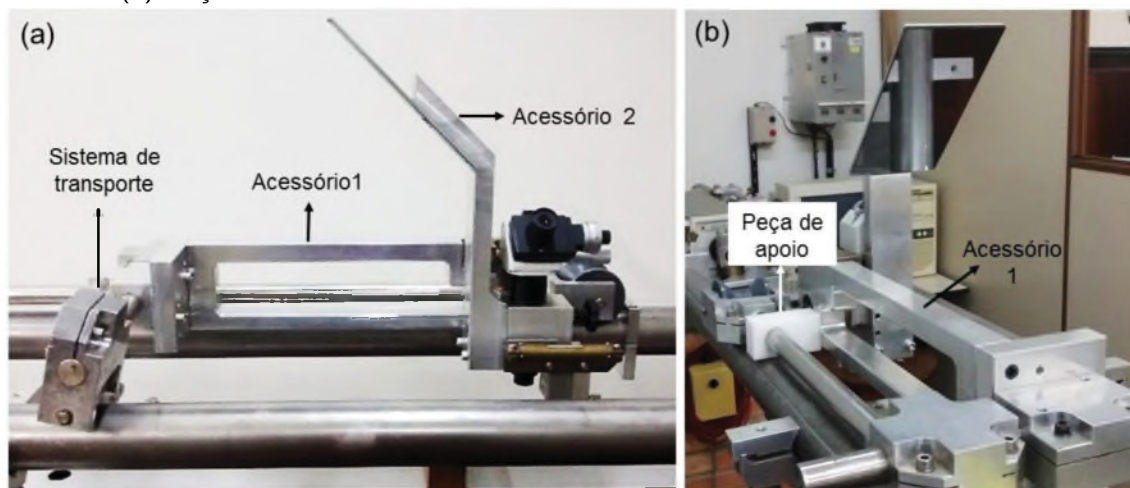
Fonte: O autor (2017).

NOTA: As unidades indicadas no desenho estão em milímetros.

O acessório 1 foi projetado para fixar o acessório 2 sobre o sistema de transporte horizontal (Figura 33a). O primeiro acessório possui 10 cm de altura, sendo fixado rigidamente no sistema de transporte através de dois parafusos. O comprimento total é de 42 cm, sendo que 28 cm equivale ao comprimento do espaço livre necessário para a reflexão da imagem dos códigos de barras da mira. Um espaço

vazado de 28 cm foi usado para diminuir o peso do acessório, que também é apoiado na face posterior sobre o sistema de transporte através de uma peça fabricada em poliuretano (Figura 33b).

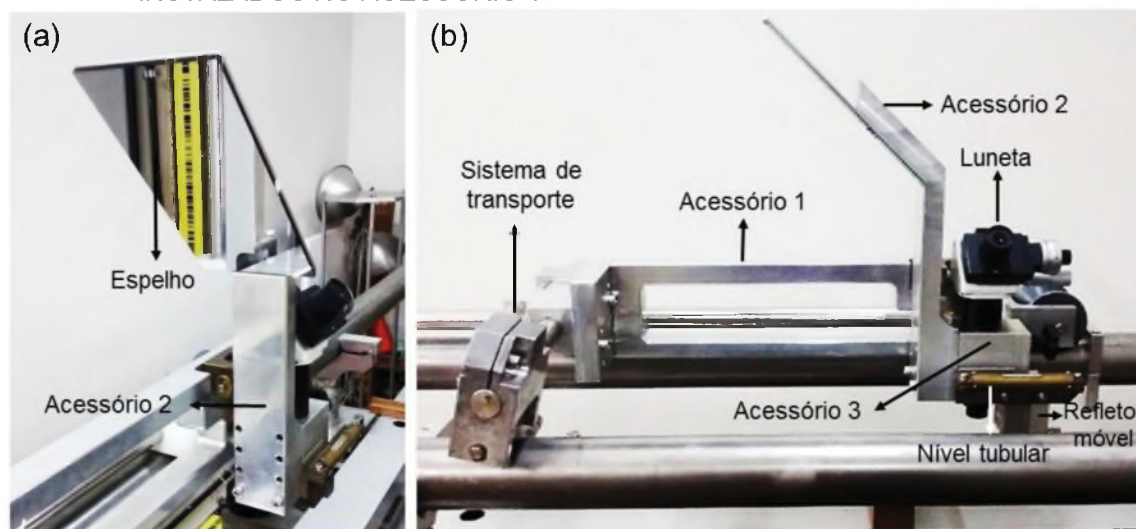
FIGURA 30 - (A) ACESSÓRIOS 1 E 2 INSTALADOS NO SISTEMA DE TRANSPORTE HORIZONTAL. (B) PEÇA DE APOIO DO ACESSÓRIO 1 NO SISTEMA DE TRANSPORTE HORIZONTAL



Fonte: O autor (2017).

O acessório 2 foi usinado para possibilitar por construção a fixação do espelho plano a 45° (Figura 34a). Este possui 21 cm de altura por 4 cm de largura, sendo fixo no acessório 1 através de um terceiro dispositivo (acessório 3). No terceiro acessório estão fixos um nível tubular de precisão (0,01mm/m), uma luneta e o refletor móvel do interferômetro laser (Figura 34b). O acessório 2 é fixo no terceiro acessório através de dois parafusos. Estes são então instalados sobre o acessório 1 através de um dispositivo que possibilita o movimento relativo do conjunto de equipamentos, possibilitando que ao calar o nível tubular de precisão sejam movidos relativamente os acessórios 2 e 3.

FIGURA 31 - (A) ESPELHO PLANO INSTALADO A 45° NO ACESSÓRIO 2. ACESSÓRIOS 2 E 3 INSTALADOS NO ACESSÓRIO 1



Fonte: O autor (2017).

Após projetar e fabricar os acessórios de adequação do sistema de calibração, foi realizado o alinhamento e nivelamento dos componentes transversais e longitudinais de todos os acessórios em relação ao sistema de transporte, instalado horizontalmente sobre o par de trilhos. Finalmente, apresenta-se na Figura 35 todos os acessórios instalados sobre o sistema de transporte, possibilitando assim a calibração de sistemas de nivelamento digitais.

FIGURA 32 - SISTEMA DE TRANSPORTE COM OS ACESSÓRIOS DE ADEQUAÇÃO DO SISTEMA DE CALIBRAÇÃO HORIZONTAL PROPOSTO



Fonte: O autor (2017).

3.2.4 Características do posicionamento do nível digital

Antes de qualquer operação de calibração o nível digital precisa ser verificado e retificado, caso necessário, dos erros de verticalidade do eixo principal e erro de colimação vertical. O erro de colimação está relacionado com a não perpendicularidade da linha de visada do instrumento em relação ao eixo principal. Já quando o eixo principal não coincide com a vertical do lugar devido a um problema no nivelamento do instrumento, tem-se o erro de verticalidade do eixo principal (SILVA; SEGANTINE, 2015). Maiores informações sobre como identificar e corrigir estes erros podem ser encontrados no manual do instrumento ou em Faggion (2011).

Após a etapa de verificação e retificação do nível digital, o instrumento deve ser instalado no tripé industrial (Figura 36a), que devido à dimensão do laboratório está posicionado a cerca de 10 cm dos trilhos do sistema de calibração. Este proporciona estabilidade no posicionamento do equipamento (Figura 36b).

FIGURA 33 - (A) TRIPÉ INDUSTRIAL (B) NÍVEL DIGITAL INSTALADO E POSICIONADO NO TRIPÉ INDUSTRIAL PRÓXIMO AOS TRILHOS DO SISTEMA DE CALIBRAÇÃO HORIZONTAL PROPOSTO



Fonte: O autor (2017).

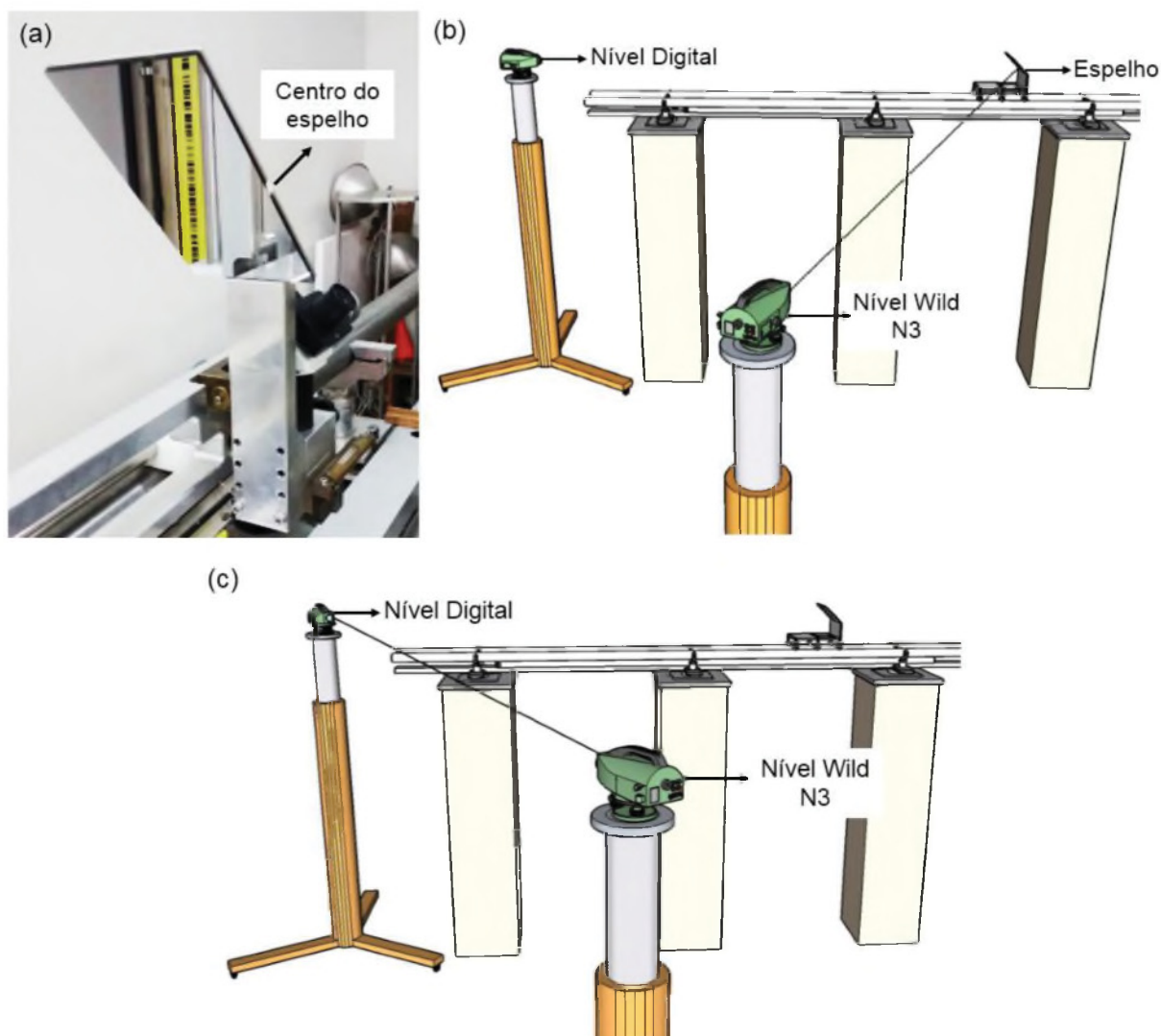
O tripé industrial utilizado foi fabricado em aço com dimensões de 1,35 m x 1,20 m. Este possui três rodas que facilitam o seu transporte, além disso, três manivelas de calagem são utilizadas para posicionar o tripé de maneira estável sobre

o piso do laboratório. Na parte superior existe um sistema de centragem forçada e um conjunto de parafusos que permite regular a altura em que o instrumento será instalado (NADAL, 2000).

Outro fator que deve ser levado em consideração é o alinhamento entre a linha de visada do nível e o centro do espelho posicionado no sistema de transporte. Devido à dimensão do espelho, a área de visualização da mira fica restrita a distância de observação, assim, caso a linha de visada do nível não esteja devidamente alinhada com o centro do espelho não será possível observar o espaço de visualização necessário para que o nível efetue leituras. Deste modo, para garantir tal condição, realizou-se o seguinte procedimento:

- a) O primeiro passo consistiu em marcar na lateral do espelho a posição correspondente ao centro do espelho (Figura 37a) com o auxílio de um paquímetro digital;
- b) Em seguida, instalou-se um nível óptico mecânico (Wild N3) a uma distância de cerca de 4 m do centro dos trilhos do sistema de calibração, possibilitando que fossem observadas a posição do centro do espelho e o nível digital instalado no tripé industrial;
- c) Para estimar a posição do plano que passa pelo centro do espelho, fez-se pontaria com o nível N3 na marcação que define o centro do espelho (Figura 37b). Em seguida, o instrumento (N3) foi rotacionado até ocorrer a coincidência entre a luneta do nível N3 e o sistema óptico do nível digital, que estão instalados aproximadamente em uma mesma altura (Figura 38c); e
- d) Mantendo-se inalterada a pontaria realizada com o nível N3, utilizou-se o princípio de colimação óptica para fazer a coincidência entre os fios de retículos dos níveis N3 e digital. Este processo teve como objetivo deixar o nível digital no mesmo plano do centro do espelho. Para tanto, projetou-se a imagem dos fios do retículo do nível digital no infinito e com o auxílio de uma lanterna iluminou-se estes fios para que pudessem ser visualizados através do nível N3. Para fazer a coincidência dos retículos dos níveis fez-se a calagem do nível digital através da metodologia apresentada por Siguel et al. (2013), que consiste em nivelar o equipamento utilizando apenas dois parafusos calantes, travando-se um dos parafusos. Deste modo, a distância vertical entre o eixo de colimação e o plano definido pelo parafuso travado permanecem constantes.

FIGURA 34 - (A) INDICAÇÃO DO CENTRO DO ESPELHO INSTALADO NO SISTEMA DE CALIBRAÇÃO (B) OBSERVAÇÃO DA MARCA NA LATERAL DO ESPELHO COM O NÍVEL WILD N3 (C) COINCIDÊNCIA ENTRE A LUNETETA NO NÍVEL N3 E O SISTEMA ÓPTICO DO NÍVEL DIGITAL



Fonte: O autor (2017).

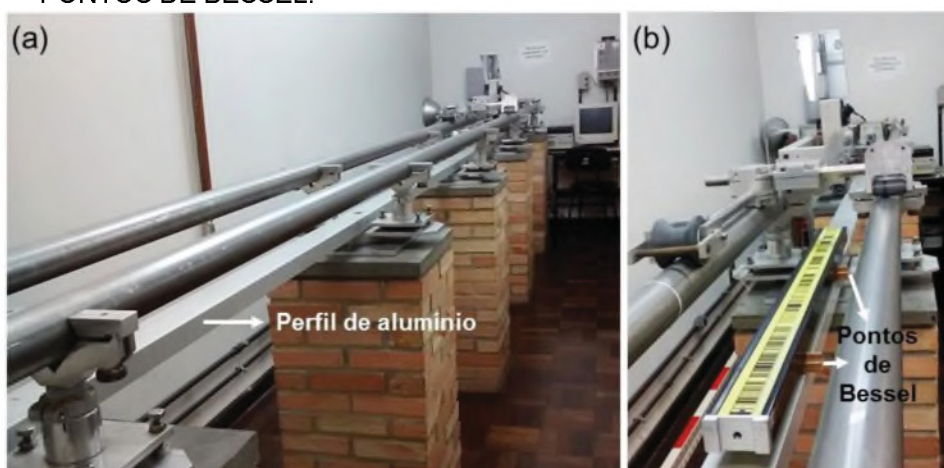
Logo, com base na metodologia apresentada é possível garantir que possam ser realizadas leituras ao longo da mira utilizando o espelho, em qualquer posição que o sistema de transporte esteja sobre os trilhos.

3.2.5 Características do posicionamento da mira

Como mencionado, propõem-se nesta pesquisa manter a mira do sistema de nivelamento digital em uma única posição durante o procedimento de calibração. Deste modo, ao colocar horizontalmente a mira sobre o perfil de alumínio (Figura 38a) que compõem a estrutura do sistema de calibração proposto, deve-se apoiá-la sobre

dois pontos denominados de pontos de Bessel (Figura 38b). Estes proporcionam o momento fletor mínimo da armação da mira (parte externa da mira, onde está fixa a fita de ínvar), minimizando as deformações transversais devido a flexão.

FIGURA 35 - (A) PERFIL DE ALUMÍNIO UTILIZADO COMO APOIO DOS EQUIPAMENTOS A SEREM CALIBRADOS (B) MIRA POSICIONADA SOBRE OS ANTEPAROS DE APOIO NOS PONTOS DE BESSEL.



Fonte: O autor (2017).

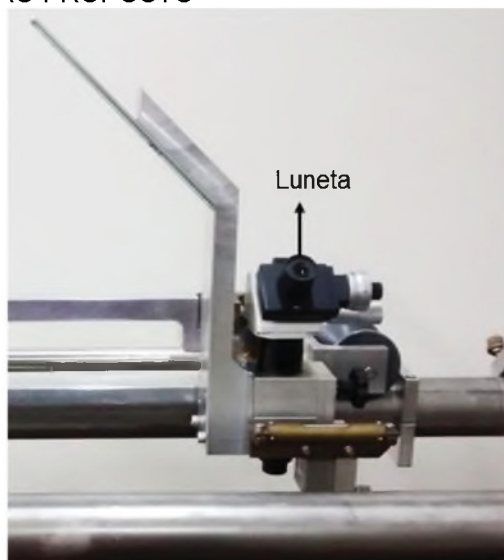
Ao apoiar a mira horizontalmente em dois pontos, obtém-se o encurtamento mínimo do comprimento total da mira (L). Segundo Faggion (1993), os pontos de apoio devem ser ajustados de uma distância (a) em relação aos extremos da mira (Equação 19).

$$a = 0,23862 * L \quad (19)$$

Assim, ao calibrar uma mira de 3 m, 2 m ou 1 m de comprimento deve-se posicionar dois anteparos na superfície inferior da mira sobre dois pontos nas distâncias de 0,7 m, 0,5 m, ou 0,2 m, respectivamente.

Posteriormente, para a verificação da horizontalidade da mira, deve-se mover o sistema de transporte que contém uma luneta (Figura 39) sobre toda a extensão da mira. Durante este deslocamento, deve-se observar se a imagem dos traços dos códigos de barra da mira estão focalizados, pois caso isto não ocorra deve-se aumentar ou diminuir a altura dos anteparos de apoio até que a imagem da mira esteja nítida em toda sua extensão. Além disso, também utilizou-se um nível tubular de precisão (0,01mm/m) para auxiliar nesta horizontalização.

FIGURA 36 - LUNETAS INSTALADAS NO SISTEMA DE TRANSPORTE DO SISTEMA DE CALIBRAÇÃO PROPOSTO



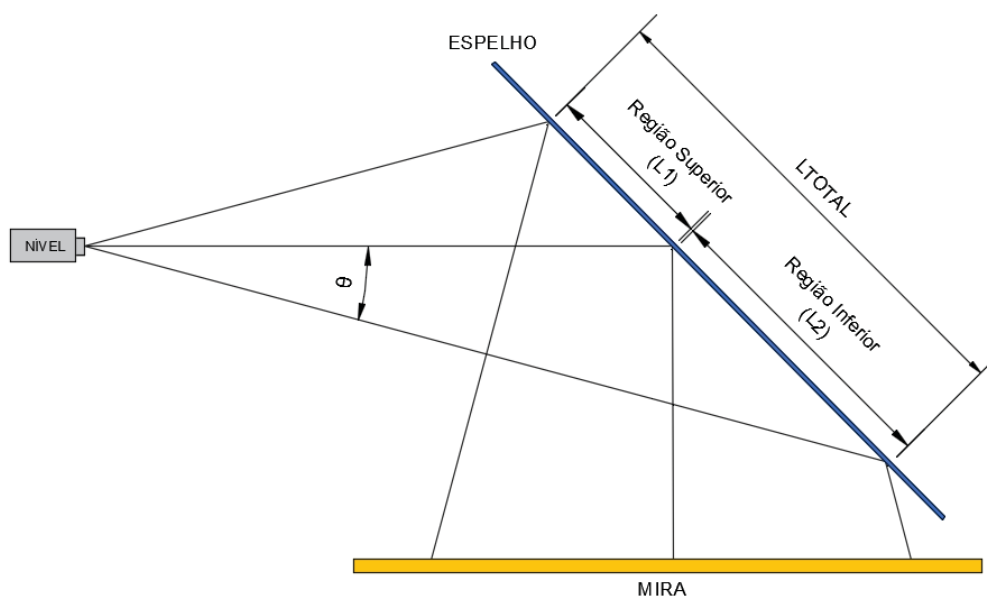
Fonte: O autor (2017).

3.2.5.1 Comprimento do espelho

Com base nos ensaios realizados desenvolveu-se uma equação geral para calcular o comprimento do espelho conforme a distância de observação.

Na Figura 29 é possível visualizar a incidência dos traços que representam os limites do campo de visão do instrumento no espelho, bem como a reflexão destes raios. Ressalta-se que houve exagero no ângulo de representação, a fim de mostrar que as retas incidentes no espelho não são paralelas e que a região superior da superfície refletora é menor do que a região inferior.

FIGURA 37 - PROJEÇÃO DO CAMPO DE VISÃO DO NÍVEL (θ) SOBRE O ESPELHO POSICIONADO A 45° E RESPECTIVA ÁREA DE VISUALIZAÇÃO NA MIRA



Fonte: O autor (2017).

Empregando-se princípios de trigonometria foram obtidas as equações para o cálculo dos comprimentos superior (L_1) e inferior (L_2) do espelho (Equações 12 e 17), sendo as deduções baseadas nas Figuras 30 e 31. Estas, em benefício da clareza, estão representadas fora de escala.

Do retângulo BED é possível deduzir o valor do lado h' , sendo l definido anteriormente como metade do intervalo de visualização para leitura automática com o nível digital:

$$h' = l \cdot \text{sen } \mu \quad (10)$$

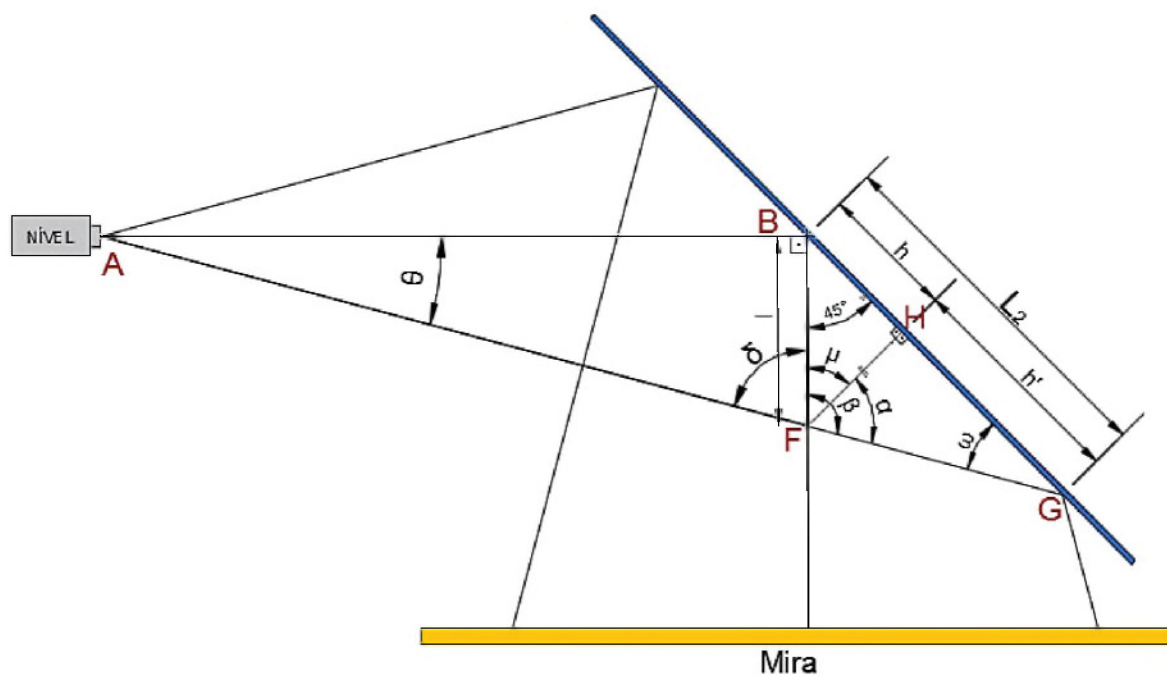
Sabendo que os ângulos μ e ω são iguais a 45° , o lado h é calculado como:

$$h = l \cdot \text{sen } \mu \cdot \tan(45^\circ - \theta) \quad (11)$$

Por fim, a soma dos comprimentos dos lados h e h' do triângulo CEB possibilita calcular o comprimento superior (L_1) do espelho:

$$L_1 = l \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot [1 + \tan(45^\circ - \theta)] \quad (12)$$

FIGURA 39 – GEOMETRIA UTILIZADA NA DEDUÇÃO DO COMPRIMENTO L_2



Fonte: O autor (2017).

Considerando o triângulo AFB o ângulo δ pode ser expresso como:

$$\delta = 90^\circ - \theta \quad (13)$$

A partir do triângulo retângulo BFH sabe-se que o ângulo μ é igual a 45° . Conhecendo o valor dos ângulos δ e μ dos triângulos AFB e BFH respectivamente, é possível deduzir o valor do ângulo α do triângulo retângulo HFG :

$$\alpha = 45^\circ + \theta \quad (14)$$

Conhecendo-se o lado l do triângulo retângulo BHF , o lado h pode ser calculado aplicando-se a relação trigonométrica cosseno:

$$h = l \cdot \cos\mu \quad (15)$$

O comprimento h' é obtido aplicando-se a relação trigonométrica tangente ao ângulo α :

$$h' = l \cdot \cos 45^\circ \cdot \tan(45^\circ + \theta) \quad (16)$$

Finalmente, o comprimento inferior L_2 do espelho pode ser calculado somando-se os comprimentos h e h' do triângulo BFG :

$$L_2 = l \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot [1 + \tan(45^\circ + \theta)] \quad (17)$$

Calculando-se o ângulo mínimo do campo de visão do nível (θ) para uma distância de observação igual a 5,50 m, é possível aplicar as Equações 12 e 17 e verificar que os comprimentos superior (L_1) e inferior (L_2) do espelho do sistema de calibração proposto são iguais a 8,26 cm e 8,44 cm respectivamente. A soma dos dois comprimentos fornecerá o comprimento total do espelho (L_{TOTAL}), ou seja, 16,70 cm.

A fim de facilitar o dimensionamento do espelho em qualquer distância de observação em outros sistemas de calibração horizontais, deduziu-se a Equação 18 com base no raciocínio e nas equações apresentadas. Nesta, as variáveis

necessárias são o ângulo do campo de visão que o instrumento utiliza para realizar medidas (θ) e metade do comprimento do intervalo necessário para realizar leituras na mira (l).

$$L_{TOTAL} = \frac{2\sqrt{2} \cdot l}{1 - \tan^2\theta} \quad (18)$$

Deste modo, o espelho utilizado no sistema de calibração proposto foi fabricado com 10 cm de largura (função da largura da mira), 16,70 cm de comprimento mais 20% de segurança, totalizando 20 cm, e 2,5 cm de espessura devido ao processo de fabricação. A margem de segurança foi adotada para que a metodologia apresentada seja válida considerando as características do campo de visão de qualquer nível digital do mercado.

3.2.6 Características do sistema interferométrico

Como apresentado, no LAIG foi implantado um sistema para calibração de miras verticais de invar utilizadas com níveis ópticos e automáticos, onde faz parte deste sistema um interferômetro laser modelo HP 10766A. O emissor laser deste sistema foi instalado sobre um pilar de concreto com o intuito de evitar vibrações, no entanto, é necessário verificar e alinhar o feixe laser em relação ao refletor móvel do interferômetro quando este se desloca ao longo dos trilhos do sistema de calibração. Este alinhamento tem como objetivo maximizar o sinal de medição e minimizar o erro de cosseno, que resulta em um erro entre o comprimento medido e o comprimento deslocado com o prisma de reflexão móvel.

Tal procedimento foi realizado ajustando-se visualmente o divisor de feixe até que o retorno do feixe de medição incidisse no centro do fotodetector, utilizando como referência um alvo para facilitar o alinhamento. O sistema de transporte que desloca o refletor móvel foi movido em toda a extensão dos trilhos de modo a garantir que o feixe de medição sempre estivesse no centro do alvo. Caso isto não ocorresse, o divisor do laser era regulado novamente até que o feixe voltasse a incidir no centro do alvo.

A inicialização do sistema interferométrico⁹ também é uma fase importante antes do procedimento de calibração, pois garante que as leituras sejam realizadas corretamente. Ao ligar o equipamento deve-se informar número de casas decimais significativas para as observações. Em seguida, utilizando-se a Equação 1, o usuário deve inserir na unidade de processamento a constante de correção da temperatura, pressão e umidade relativa do ar, possibilitando que o sistema realize a compensação do fator de refração.

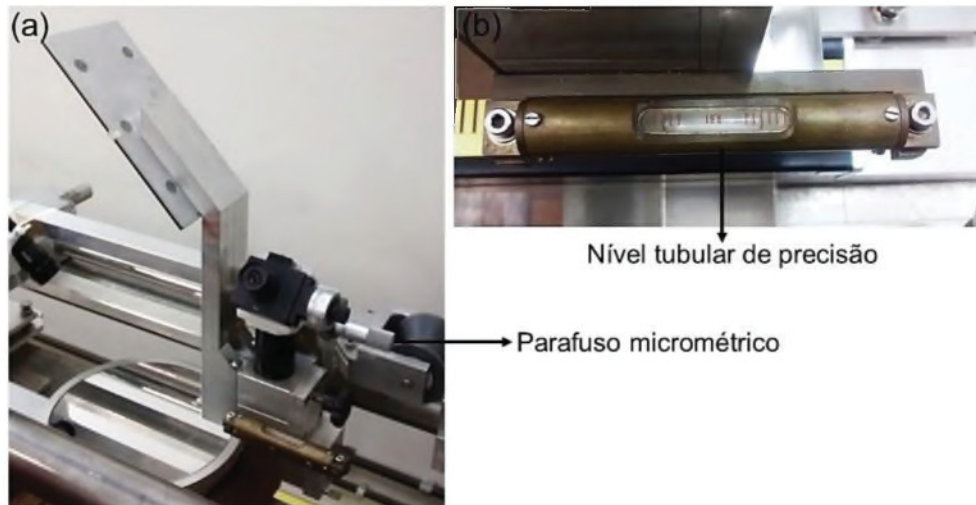
3.2.7 Características do posicionamento do espelho

Como já informado, para que o nível efetue leituras em uma mira posicionada na horizontal é necessário utilizar um espelho instalado a 45° em relação a linha de visada do nível e a linha normal da mira. Esta condição é atendida quando os equipamentos instalados nos acessórios 1, 2 e 3 estão corretamente nivelados e alinhados. Contudo, ao deslocar o sistema de transporte juntamente com o espelho e os demais instrumentos fixos no acessório 3, podem ocorrer imprecisões na calibração devido a possíveis irregularidades existentes nos trilhos e que foram detectadas anteriormente por Faggion (1993) e Nadal et al. (2010), o que deslocaria o espelho da posição ideal, ou seja, dos 45°.

Devido as características construtivas dos acessórios de adequação 2 e 3, ao realizar a calagem do nível tubular através do movimento de um parafuso micrométrico (Figura 40), é possível mover relativamente todos os demais instrumentos, corrigindo o espelho para a sua posição ideal. Assim, para minimizar o efeito das possíveis irregularidades dos trilhos propõem-se realizar a calagem do nível tubular a cada leitura realizada no sistema de calibração.

⁹ Entende-se por inicializar o sistema interferométrico o processo de zerar o mostrador da unidade de processamento antes da primeira medição.

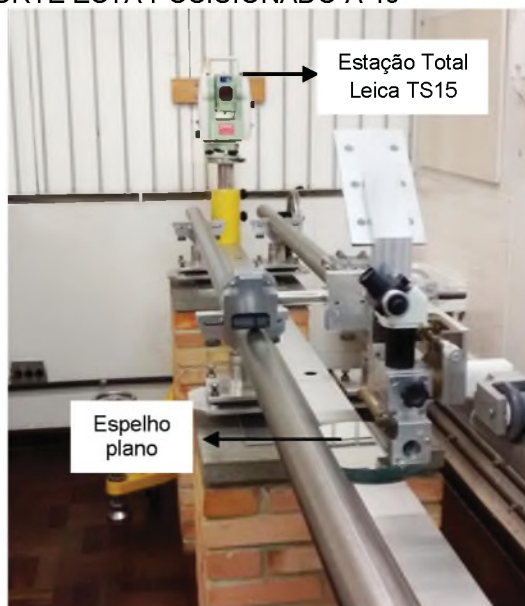
FIGURA 40 - (A) PARAFUSO MICROMÉTRICO UTILIZADO PARA A CALAGEM DO NÍVEL TUBULAR DE PRECISÃO E NIVELAMENTO DOS ACESSÓRIOS 2 E 3 (b) NÍVEL TUBULAR DE PRECISÃO



Fonte: O autor (2017).

Entretanto, para verificar e garantir que o espelho esteja posicionado a 45° quando o nível tubular de precisão estiver calado, realizou-se um experimento. Para tanto, foram utilizados uma estação total Leica TS15, cuja precisão nominal angular é de $1''$ e linear de $\pm (2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm})$ para medição de distância sem prismas refletivos, e um espelho plano posicionado horizontalmente sobre o perfil de alumínio do sistema de calibração (Figura 41).

FIGURA 41 - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA VERIFICAR SE O ESPELHO FIXO NO SISTEMA DE TRANSPORTE ESTÁ POSICIONADO A 45°

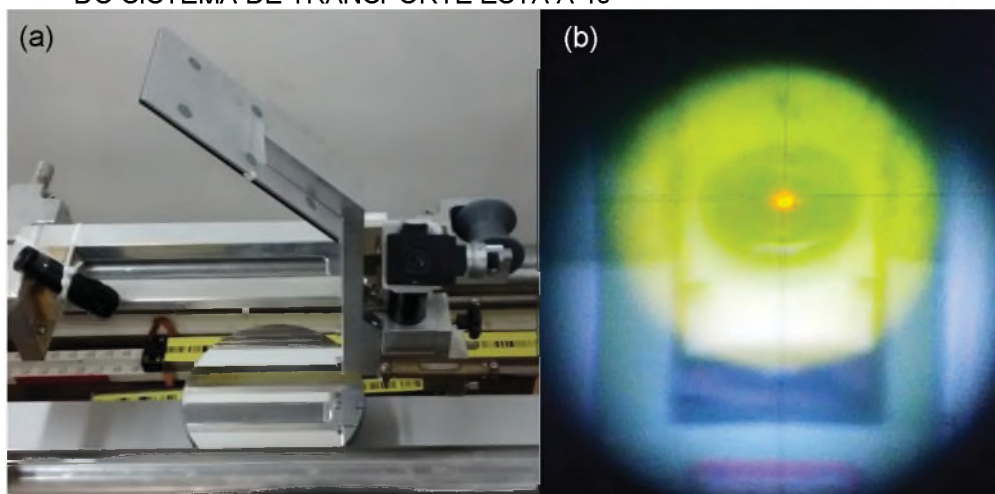


Fonte: O autor (2017).

O procedimento para verificar se o espelho instalado no sistema de transporte está posicionado a 45° quando o nível tubular está calado, consistiu das seguintes etapas:

- a) Conforme descrito no item 3.2.4, fez-se o alinhamento da linha de visada da estação total Leica TS15 em relação ao centro do espelho posicionado no sistema de transporte;
- b) Em seguida, posicionou-se horizontalmente um espelho plano, de espelhamento frontal e com diâmetro igual 20 cm, sobre o perfil de alumínio utilizado como apoio para a mira;
- c) Na sequência, deslocou-se o sistema de transporte até que o centro do espelho a 45° ficasse próximo ao centro do espelho posicionado na horizontal, de maneira que um espelho fosse sobreposto pelo outro (Figura 42a). Deste modo, foi possível visualizar através da luneta da estação (posicionado a 90°) a reflexão da imagem do instrumento, do sistema de pontaria e do feixe laser emitido pelo equipamento;
- d) Para considerar que o espelho fixo no sistema de transporte esteja a 45° em relação a calagem do nível tubular, o feixe laser emitido a partir do centro óptico da estação total deve coincidir com o sistema de pontaria (condição para que o feixe laser seja desviado no espelho em um ângulo de 90°);
- e) Neste caso, após calar o nível tubular em uma posição aleatória sobre os trilhos e observar a imagem refletida a partir da ocular do instrumento, constatou-se que não havia a coincidência entre o sistema de pontaria e o feixe laser da estação total. Ou seja, quando o nível tubular estava calado o espelho do sistema de transporte não estava a 45° .
- f) Para garantir que o espelho esteja posicionado a 45° , movimentou-se o parafuso micrométrico até ocorrer a coincidência entre o centro do feixe laser e o sistema de pontaria (Figura 42b). Em seguida, para corrigir o posicionamento do nível tubular, atuou-se nos parafusos de fixação sobre o acessório 3, até que ocorresse a calagem do equipamento;
- g) Após reinstalar o nível tubular sobre o acessório 3, verificou-se se a condição proposta se manteve ao longo dos trilhos. Assim, repetiu-se o procedimento apresentado a cada 0,5 m, garantindo ao final que ao calar o nível tubular o espelho esteja a 45° .

FIGURA 42 - (A) ESPELHO PLANO FIXO NO SISTEMA DE TRANSPORTE E ESPELHO PLANO POSICIONADO SOBRE O PERFIL DE ALUMÍNIO DO SISTEMA DE CALIBRAÇÃO (B) IMAGEM OBSERVADA PELA LUNETETA DA ESTAÇÃO TOTAL INDICANDO A COINCIDÊNCIA DO FEIXE LASER E SISTEMA DE PONTARIA QUANDO O ESPELHO DO SISTEMA DE TRANSPORTE ESTÁ A 45°



Fonte: O autor (2017).

3.2.8 Investigação da horizontalidade dos trilhos do sistema de calibração

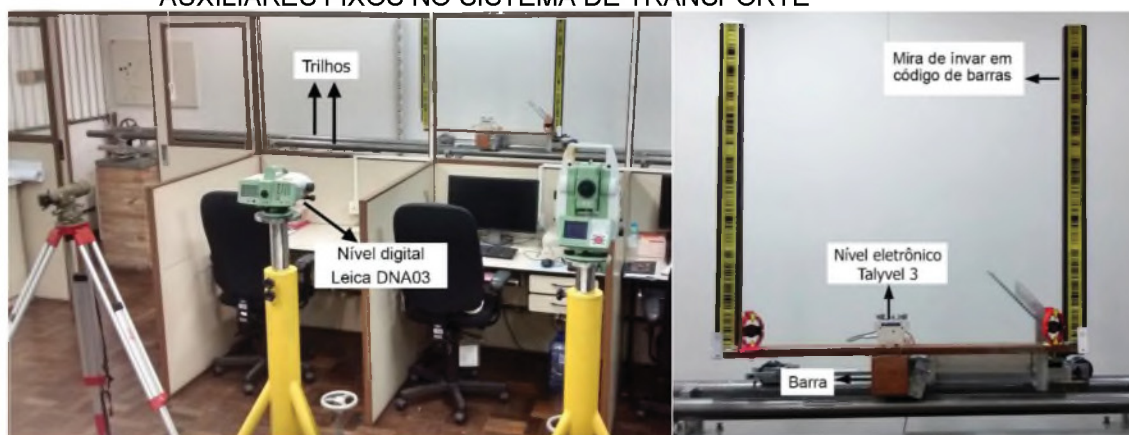
O sistema de calibração horizontal é composto por dois trilhos paralelos utilizados para deslocar o sistema de transporte que contém os equipamentos empregados no procedimento de calibração. No entanto, devido ao processo de fabricação e instalação destes trilhos, podem existir possíveis variações da sua horizontalidade, que como apresentado, foi verificado por Faggion (1993) e Nadal et al. (2010), logo, é necessário investigar e determinar periodicamente as ondulações existentes através de levantamentos geodésicos de precisão.

Para determinar as ondulações dos trilhos adotou-se o método de nivelamento, onde foram utilizados métodos direto (nivelamento geométrico) e indiretos de levantamentos (determinação de desnível baseado em nível eletrônico de corpo suspenso). No método direto foi utilizado o nível digital Leica DNA03 com um par de miras de invar gravadas em código de barras. Já no método indireto utilizou-se o nível eletrônico Taylor-Robson Talyvel 3. A metodologia dos levantamentos e a descrição de cada instrumento será abordado adiante.

Para minimizar a influência de erros realizou-se a verificação e a retificação de cada um dos equipamentos de acordo com as indicações dos fabricantes. Na sequência, os instrumentos e o local do levantamento foram ambientados em 20°C, conforme temperatura adotada em projetos de calibração.

Com o propósito de realizar simultaneamente os levantamentos através do método direto e indireto de nivelamento, garantindo a observação dos mesmos pontos sobre os trilhos e sob as mesmas condições, aplicou-se a metodologia adotada por Faggion (1993), que consiste em fixar uma barra com 1 m de comprimento sobre o sistema de transporte horizontal. Deste modo, a barra pode ser utilizada para fixar o par de miras de ínvar e o nível eletrônico empregados para a observação dos pontos de interesse sobre os trilhos (Figura 43). Observando-se a Figura 43 é possível notar um conjunto adicional de equipamentos que também foram utilizados para investigar a ondulação dos trilhos, contudo, os resultados devem ser analisados em Gemin et al. (2017, no prelo). Além disso, para que não ocorressem erros sistemáticos nas observações com o nível digital, foram retirados os vidros que separam os ambientes onde estão os trilhos e os demais equipamentos.

FIGURA 43 - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA DETERMINAÇÃO DAS ONDULAÇÕES DOS TRILHOS DO SISTEMA DE CALIBRAÇÃO HORIZONTAL E EQUIPAMENTOS AUXILIARES FIXOS NO SISTEMA DE TRANSPORTE



FONTE: O Autor (2017).

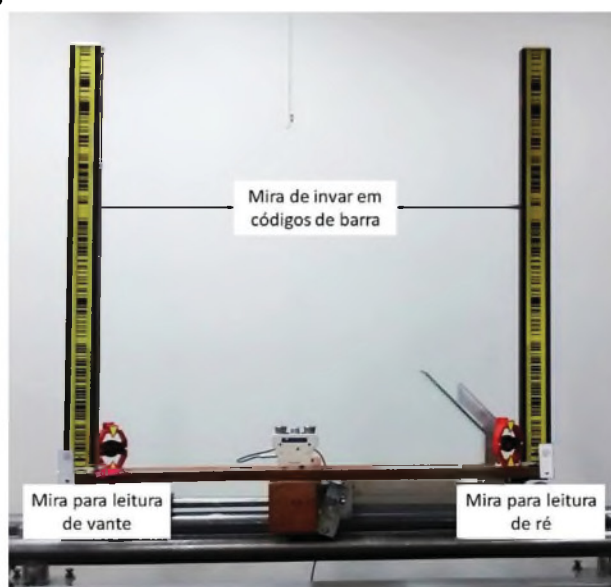
Para que os resultados obtidos com cada um dos levantamentos realizados pudessem ser comparados e seus respectivos desvios analisados, foram efetuadas três séries de observações com o nível digital e com o nível eletrônico em 41 posições ao longo dos trilhos. As posições observadas foram controladas pelo sistema interferométrico e as medidas foram realizadas a cada 100 mm a partir do ponto de referência (ponto mais próximo ao interferômetro laser). Adiante serão descritas as características de cada levantamento, subdividido de acordo com o instrumento e metodologia utilizada.

3.2.8.1 Nivelamento geométrico com nível digital

Entre os métodos de nivelamento geométrico o mais preciso é o de nivelamento por visadas iguais, pois minimiza erros devido a efeitos sistemáticos, como refração atmosférica, curvatura terrestre e erro de colimação vertical do nível. Neste método, o nível é posicionado aproximadamente a igual distância entre os pontos que se deseja obter o desnível, denominados de pontos de ré e vante.

Os equipamentos utilizados neste levantamento foram o nível digital Leica DNA03 e um par miras de invar em código de barras com 1 m de comprimento, fixas e niveladas nas extremidades da barra (Figura 44). A cada medição a leitura da altura observada foi obtida através da média de três leituras consecutivas, estando o nível instalado a cerca de 3 m dos trilhos.

FIGURA 44 - PAR DE MIRAS UTILIZADAS NAS LEITURAS DE RÉ E VANTE COM NÍVEL DIGITAL LEICA DNA03



FONTE: O Autor (2017).

A cada posicionamento do sistema de transporte sobre os trilhos foram realizadas leituras de ré ($L_{ré}$) e vante (L_{vante}), sendo o desnível (Δh_i) calculado pela equação 20:

$$\Delta h_i = L_{ré} - L_{vante} \quad (i = 0 \dots 41) \quad (20)$$

Para obter as ondulações dos trilhos (ΔH_i) em cada posição observada, foram determinadas as diferenças entre os desníveis utilizando a posição de referência (Δh_0) e os desníveis obtidos nas demais posições (Δh_i) (Equação 21):

$$\Delta H_i = \Delta h_i - \Delta h_0 \quad (i=0\dots 41) \quad (21)$$

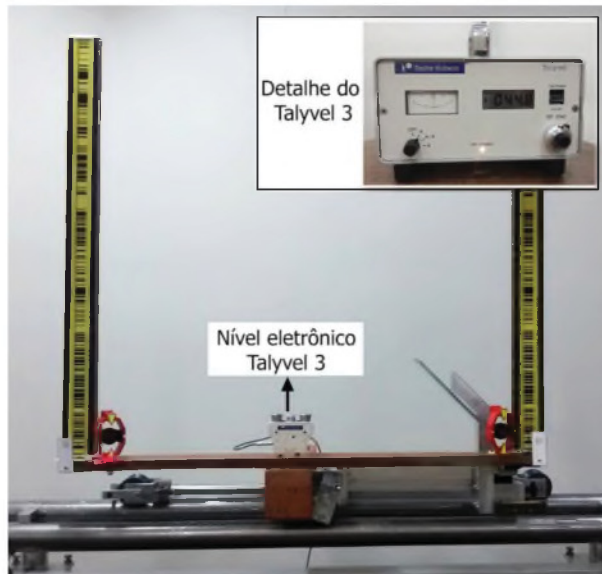
Ressalta-se que a posição de referência adotada foi o ponto nos trilhos mais próximo ao sistema interferométrico.

3.2.8.2 Nível eletrônico

O nível eletrônico Taylor Hobson's® Talyvel 3 é utilizado para determinar inclinações para uma variedade de aplicações industriais e de engenharia (SMITH, 2016). Seu princípio de operação é baseado em um corpo suspenso em um campo elétrico, onde a variação deste campo elétrico está relacionado com a inclinação do equipamento e conseqüentemente com a inclinação do que se está medindo (FAGGION, 1993).

Para investigar as ondulações dos trilhos posicionou-se o nível eletrônico no centro da barra, assim, em cada posição do trilho foram medidos os ângulos de inclinação com precisão de 0,2 segundos de arco (Figura 45).

FIGURA 45 - NÍVEL ELETRÔNICO TALYVEL 3 UTILIZADO PARA AS LEITURAS DE INCLINAÇÃO



FONTE: O Autor (2017).

As diferenças de nível (Δh_i^t) foram calculadas através dos ângulos de inclinação (α_i) medidos em cada posição dos trilhos, assim como as distâncias formadas entre cada leitura fornecida pelo sistema interferométrico ($d_i = 100 \text{ mm}$) (Equação 22).

$$\Delta h_i^t = d_i \cdot \sin(\alpha_i) \quad (i = 0 \dots 41) \quad (22)$$

Por fim, as ondulações dos trilhos foram calculadas através da Equação 21. Os resultados obtidos com este instrumento foram adotados como referência para a investigação e análise do método direto, pois é o instrumento mais preciso e as leituras realizadas são independentes do operador.

3.2.8.3 Ondulações dos trilhos

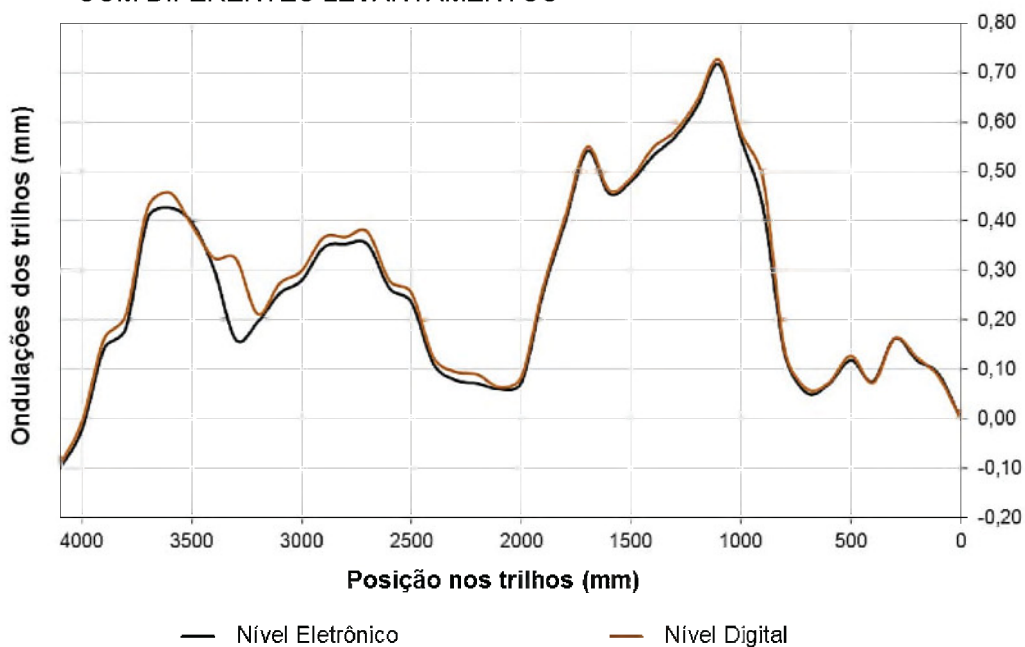
Apresenta-se na Tabela 4 as ondulações calculadas para algumas posições observadas sobre os trilhos. Tais informações foram obtidas a partir da média de três séries de leituras realizadas com cada instrumento, o que possibilitou analisar os desvios (σ) e verificar a precisão das medidas realizadas. O resultado completo das ondulações para as 41 posições observadas podem ser analisadas na Figura 46, onde a posição zero do eixo horizontal (posição inicial dos trilhos) foi representada do lado direito do gráfico para coincidir com o ponto adotado como origem, ou seja, o ponto de referência.

TABELA 4 - ONDULAÇÕES DOS TRILHOS E RESPECTIVOS DESVIOS PADRÃO DAS LEITURAS REALIZADAS COM DIFERENTES LEVANTAMENTOS

ONDULAÇÕES DOS TRILHOS				
Posição no trilho (mm)	Nível Eletrônico (referência) (mm)	σ (mm)	Nível Digital (mm)	σ (mm)
100	0,090	0,01	0,085	0,01
200	0,119	0,02	0,124	0,02
600	0,071	0,03	0,073	0,02
700	0,053	0,04	0,061	0,03
1100	0,717	0,04	0,725	0,01
1200	0,632	0,05	0,643	0,02
1600	0,456	0,05	0,462	0,02
2100	0,061	0,07	0,064	0,02
2600	0,264	0,03	0,280	0,03
3100	0,254	0,03	0,274	0,04
3600	0,427	0,05	0,458	0,04
4100	-0,100	0,04	-0,093	0,06

FONTE: O Autor (2017).

FIGURA 46 - ONDULAÇÕES DOS TRILHOS DO SISTEMA DE CALIBRAÇÃO DO LAIG OBTIDOS COM DIFERENTES LEVANTAMENTOS



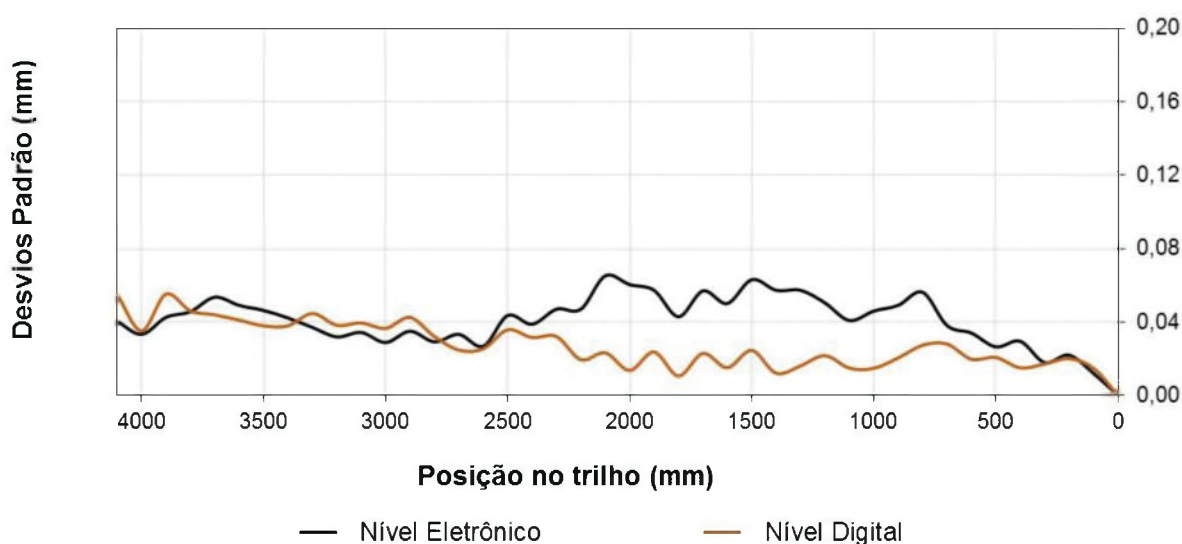
FONTE: O Autor (2017).

O valor máximo da ondulação dos trilhos (Figura 46 e Tabela 4) foi determinado na posição 1,1 m em relação a posição de origem, chegando a $0,72 \text{ mm} \pm 0,04 \text{ mm}$

com o nível eletrônico. Esta máxima irregularidade também foi detectada através do levantamento com o nível digital ($0,72 \text{ mm} \pm 0,03 \text{ mm}$). Com relação ao recalque dos trilhos, ou seja, a mínima variação pôde ser detectada na posição 4,1 m dos trilhos, chegando a $-0,093 \text{ mm} \pm 0,06 \text{ mm}$ (nível digital) e $-0,10 \text{ mm} \pm 0,04 \text{ mm}$ (nível eletrônico). Logo, a máxima amplitude das ondulações dos trilhos, considerando o equipamento de referência, é de $0,82 \text{ mm} \pm 0,04 \text{ mm}$.

Para melhor avaliar as diferenças entre os levantamentos e assim comparar as metodologias e instrumentos utilizados, foram comparados os respectivos desvios padrão (Figura 47). Baseando-se nos resultados, o desvio padrão médio obtido com o nível digital e com o nível eletrônico foram de $\pm 0,03 \text{ mm}$ e $\pm 0,04 \text{ mm}$, respectivamente.

FIGURA 47 - DESVIOS PADRÃO DOS DIFERENTES LEVANTAMENTOS REALIZADOS SOBRE OS TRILHOS DO LAIG



FONTE: O Autor (2017).

Para avaliar o grau de relação existente entre os levantamentos, calculou-se o coeficiente de correlação de Pearson do levantamento realizado com os níveis eletrônico e digital. Como resultado, chegou-se a uma correlação de 0,99, portanto, nota-se uma forte correlação. Por fim, ao analisar os resultados foi possível concluir que os levantamentos realizados possibilitaram determinar as ondulações dos trilhos com desvios de ordem submilimétricas.

3.2.8.4 Influência da ondulação dos trilhos na calibração

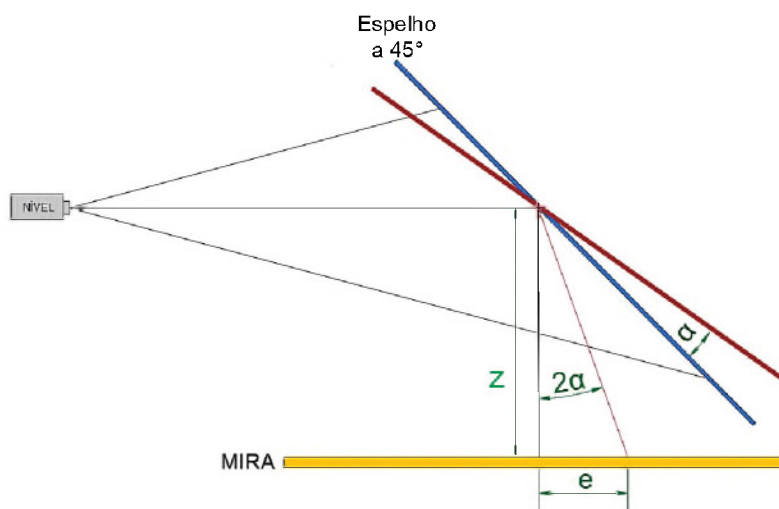
Ao deslocar o sistema de transporte ao longo dos trilhos do sistema de calibração, constatou-se que o nível tubular de precisão acoplado a peça de fixação do espelho não permanece calado, sendo este fato atribuído a ondulação dos trilhos. Deste modo, o espelho pode sofrer uma inclinação em relação ao ângulo de 45° necessário para a calibração dos sistemas de nivelamento digitais.

A fim de calcular a influência da inclinação do espelho em relação as ondulações dos trilhos, considerou-se uma distância média de observação entre o nível e o espelho igual a 2,0 m (d) e a ondulação média (A) dos trilhos calculada a partir do levantamento de referência igual a 0,26 mm. Com base nestes dados obtêm-se o ângulo de rotação do espelho (α):

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{A}{d}\right) \quad \therefore \quad \alpha = 0^{\circ}0'27'' \quad (23)$$

Considerando a propriedade de rotação de um espelho plano, se houver a rotação de um ângulo α no espelho, o deslocamento angular da imagem será duas vezes maior do que o ângulo de rotação do espelho (HECHT, 2002). Deste modo, é possível visualizar na Figura 48 que uma rotação α causa um deslocamento na projeção do fio médio do nível de 2α , assim, ao rotacionar o espelho a região que o observador consegue ver por reflexão é alterada por um comprimento e . O comprimento Z representa a projeção do fio médio do nível refletido pelo espelho quando este está a 45°, sendo adotado como 36 cm.

FIGURA 48 - TRAJETÓRIA DO FIO MÉDIO DO NÍVEL REFLETIDO PELO ESPELHO NAS POSIÇÕES DE 45° E ROTACIONADO DE α



FONTE: O Autor (2017).

O comprimento na mira do deslocamento do fio médio devido a inclinação do espelho pode ser calculado através da Equação 24.

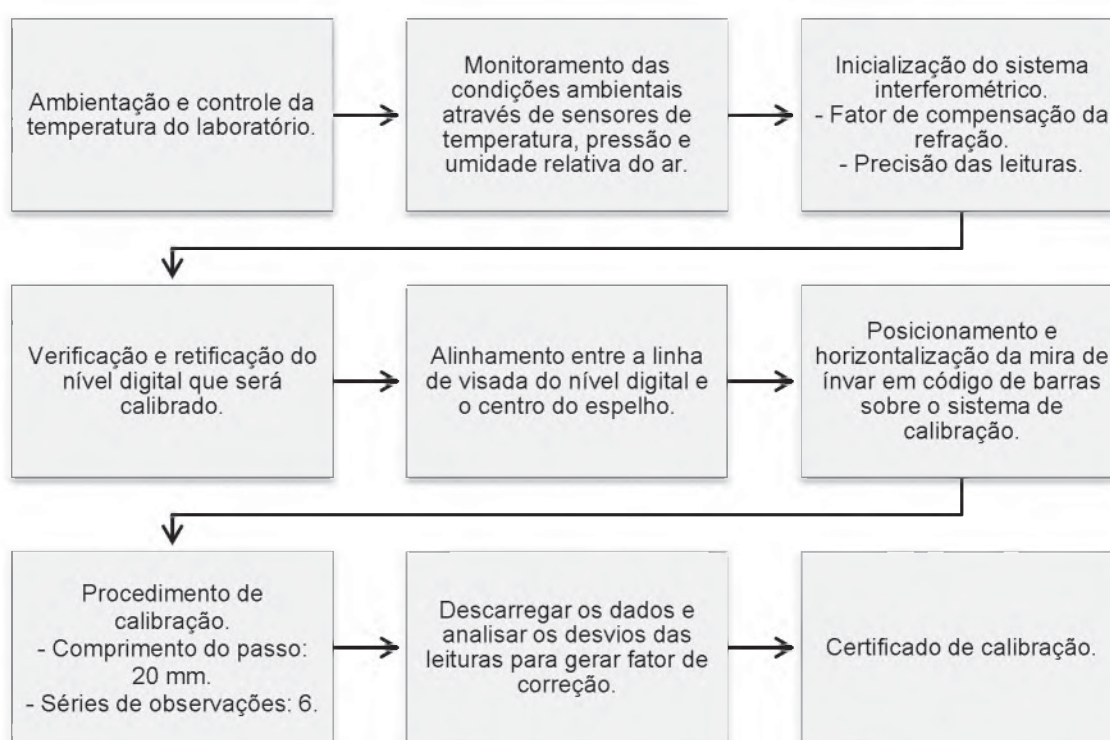
$$e = z \cdot \tan 2\alpha \therefore e = 0,09\text{mm} \quad (24)$$

Considerando o pior caso, onde a máxima ondulação dos trilhos é igual 0,72 mm e a distância de observação entre o nível e a mira é igual a 1800 mm, calcula-se o deslocamento do fio médio do nível (e) como sendo igual a 0,29 mm. Estes e outros deslocamentos oriundos da ondulação dos trilhos causam uma variação no comprimento do passo adotado entre as leituras realizadas com o nível digital, resultando em erros sistemáticos. No entanto, devido ao projeto construtivo do sistema de calibração, a ondulação e a inclinação do espelho podem ser facilmente corrigidas com a calagem do nível tubular de precisão, minimizando assim a influência de tais erros e garantindo as condições necessárias a calibração.

3.3 PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO DE SISTEMAS DE NIVELAMENTO DIGITAIS NO LAIG

O procedimento de calibração de sistemas de nivelamento digitais através do sistema de calibração horizontal desenvolvido pode ser analisado na Figura 49. Na seqüência, são descritos cada um dos passos apresentados.

FIGURA 49 - RESUMO DO PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO NO SISTEMA DE CALIBRAÇÃO HORIZONTAL PROPOSTO



FONTE: O Autor (2017).

Com o propósito de manter a temperatura constante no LAIG e evitar que as incertezas das medições realizadas com os sistemas envolvidos no processo de calibração (sistema de nivelamento digital, estrutura de calibração e interferômetro laser) sejam alteradas, deve-se fazer o controle da temperatura do laboratório até atingir a estabilidade térmica do ambiente.

Para obter informações de temperatura e umidade relativa do ar são dispostos ao longo do comprimento dos trilhos três termômetros de mercúrio e dois termohigrômetros digitais, além disso, um barômetro de mercúrio é utilizado para medir a

pressão do ar. A cada 15 minutos tais informações devem ser registradas e auxiliam no controle das condições ambientais.

Após inicializar o sistema interferométrico deve-se calcular e inserir na unidade de controle o fator de compensação da refração para as condições ambientais em que a calibração será realizada (Equação 1). A precisão das leituras do sistema laser também deve ser ajustada na unidade de controle e pode ser adotada como da ordem do milésimo do milímetro, uma vez que a precisão do nível geralmente é da ordem do décimo do milímetro.

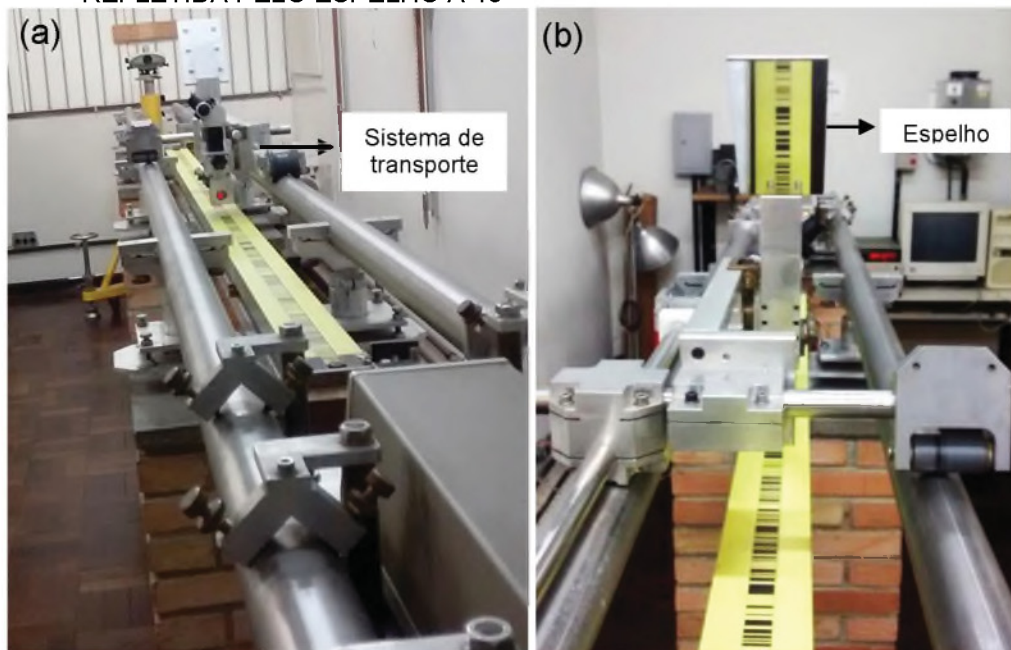
As próximas etapas a serem executadas antes do procedimento de calibração estão apresentadas no item 3.2.4 e estão relacionadas com a verificação e retificação do nível, caso necessário, e o alinhamento entre a linha de visada do nível e o centro do espelho posicionado no sistema de transporte. Na sequência, deve-se realizar o procedimento abordado no item 3.2.5, voltado ao posicionamento e horizontalização da mira de ínvar em código de barras.

Como visto, o procedimento de calibração consiste em comparar os deslocamentos medidos com o nível digital em relação aos deslocamentos de referência, fornecidos pelo interferômetro laser. Deste modo, o primeiro passo para a coleta dos dados consiste em deslocar o sistema de transporte até que o nível realize automaticamente a primeira leitura mais próxima à base da mira, sendo esta leitura equivalente a posição de cerca de 0,11315 m nos sistemas calibrados nesta pesquisa. Ressalta-se que em levantamentos de campo, aplicando-se o método de nivelamento geométrico de alta precisão, deve-se evitar as extremidades da mira devido a efeitos de reverberação e vento.

A mesma posição definida para a primeira leitura com o nível digital é indicada como ponto inicial ou zero para a inicialização do mostrador digital do sistema interferométrico. Deste modo, é possível controlar os deslocamentos do sistema de transporte a cada 20 mm, sendo este o comprimento do passo ótimo adotado para trabalhos de calibração de sistemas de nivelamento digitais (CHUMANOVÁ, 2014).

Ao deslocar o sistema de transporte (Figura 50a) é possível observar diferentes seções da mira através da reflexão da imagem no espelho posicionado a 45° (Figura 50b). Contudo, ao percorrer toda a extensão da mira, a distância formada entre o nível e o espelho é variável, tornando necessário o ajuste e focalização da imagem observada com o nível digital. Devido a este fato, a imagem observada com o nível deve ser cuidadosamente focalizada, evitando-se a injunção de erros.

FIGURA 50 - (A) CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA DE NIVELAMENTO DIGITAL (B) IMAGEM DA MIRA REFLETIDA PELO ESPELHO A 45°



Fonte: O autor (2017).

Quanto maior o número de observações maior a confiabilidade nos resultados obtidos na calibração. Deste modo, assim como realizado por Takalo e Rouhiainen (2004), durante a calibração de um sistema de nivelamento digital devem ser realizadas seis séries de observações, sendo a altura do plano horizontal observada dada pela média de três leituras em cada posição. A cada nova série a posição da mira deve ser invertida, sendo três séries realizadas na base em direção ao topo da mira (posição direta) e três séries do topo em direção a base da mira (posição inversa).

O procedimento de calibração, utilizando a metodologia desenvolvida deve ser realizado com o auxílio de dois operadores, onde uma pessoa fica responsável por focar a imagem da mira e disparar a leitura automática com o nível digital, enquanto o segundo operador é encarregado de deslocar e calar o sistema de transporte, bem como anotar as leituras do interferômetro. O tempo médio da calibração para uma série de observações utilizando uma mira de 2 m é de 120 minutos. Após o término de cada série de observações os dados devem ser descarregados e analisados para que o fator de correção possa ser determinado (item 4) e gerado o certificado de calibração (item 3.3.2)

3.3.1 Estimativa da influência do sistema de calibração no resultado das observações

O conhecimento e a quantização de todos os fatores que possam influenciar no resultado da calibração é uma tarefa complexa, sendo que os valores verdadeiros dificilmente serão derivados (WOSCHITZ; GASSNER; RULAND, 2006). Deste modo, mesmo com todos os cuidados envolvidos no procedimento de calibração proposto, imperfeições do próprio sistema de calibração podem dar origem a erros sistemáticos e aleatórios.

O erro aleatório surge a partir de variações temporais e espaciais de grandezas de influência imprevisíveis ou estocásticas e embora não seja possível compensá-lo no resultado de uma medição, pode ser reduzido aumentando o número de observações (GUM, 2008).

Já os erros sistemáticos são produzidos por causas conhecidas (GEMAEL; MACHADO; WANDRESEN, 2015), podendo seu efeito ser quantificado e uma correção aplicada (GUM, 2008). Portanto, a influência dos erros oriundos do sistema de calibração devem ser derivados utilizando informações do próprio sistema (WOSCHITZ, 2003).

Assim, com o propósito de investigar os efeitos sistemáticos presentes na calibração devido as características construtivas do sistema de calibração proposto, realizou-se a calibração de um sistema de nivelamento digital ainda não utilizado em nenhum levantamento, ou seja, considerado como isento de erros, sendo portanto, adotado como padrão de referência. O procedimento para a calibração foi realizado conforme os passos indicados no item 3.3, onde foram efetuadas doze séries de observações a cada 20 mm, sendo 6 séries medidas da base em direção ao topo da mira e vice-versa.

O sistema de nivelamento digital de referência é composto pelo nível digital Leica LS15 e uma mira de ínvar gravada em código de barras com 1 m de comprimento. Ressalta-se que atualmente o instrumento é um dos mais precisos do mercado ($\pm 0,2$ mm/km), sendo sua precisão melhor do que a precisão dos sistemas de nivelamento que foram calibrados nesta pesquisa.

Os desvios obtidos após a calibração são considerados como oriundos das características construtivas do próprio sistema, podendo ser minimizados por meio de um fator de compensação (γ). Este, foi obtido a partir dos desvios médios das leituras, onde após calcular a regressão linear dos dados, utilizou-se o coeficiente de

inclinação como fator de compensação ($\gamma = 0,028$). Fatores de compensação também foram aplicados nos trabalhos desenvolvidos por Václav (2012) e Vyskočil e Lukeš (2015), que utilizam um sistema de calibração horizontal.

Para minimizar os erros sistemáticos considerados como oriundos do sistema de calibração proposto, aplicou-se a seguinte relação:

$$h_c^{med} = h^{med} \cdot (1 - \gamma) \quad (25)$$

Onde:

h_c^{med} - Leitura medida corrigida do fator de compensação;

h^{med} - Leitura medida; e

γ - Constante adotada como fator de compensação.

3.3.2 Certificado de calibração

O resultado da calibração de um sistema de nivelamento digital pode ser apresentado em um documento chamado certificado de calibração. Este, deve apresentar informações relacionadas com o desempenho metrológico do sistema de medição e descrever os procedimentos realizados (SUÁREZ; DA SILVA, 2014). O objetivo deste certificado é fornecer ao usuário os erros oriundos do instrumento no momento da calibração, onde através de tais valores será possível realizar correções e obter medidas mais confiáveis (SUÁREZ; DA SILVA, 2014).

Para que o certificado tenha validade legal, o laboratório onde a calibração é realizada deve atender a norma da ABNT - NBR ISO/IEC 17025, que trata dos requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração. Como conteúdo mínimo o certificado deve conter (SUÁREZ; DA SILVA, 2014):

- Título;
- Nome, endereço do laboratório e o local onde a calibração foi realizada;
- Identificação do certificado de calibração;
- Nome e endereço do cliente;
- Identificação do método utilizado;
- Descrição, condição e identificação do instrumento calibrado;

- Data do recebimento do item a ser calibrado, quando isso for crítico para a validade e aplicação dos resultados;
- Referência à especificação da norma tomada como base ou breve descrição do método de calibração utilizado;
- Resultado da calibração com as unidades de medida;
- As condições ambientais com base nas quais a calibração foi realizada;
- A incerteza da medição expressa na mesma unidade do resultado da medida ou em valores relativos, por exemplo, valor percentual ou partes por milhão; e
- Nome, função e assinatura dos responsáveis pela calibração do instrumento.

Deste modo, pelo fato do LAIG ainda não ser acreditado junto aos órgãos competentes, os certificados de calibração dos sistemas de nivelamento digitais calibrados nesta pesquisa e disponibilizados no Apêndice, serão apenas considerados como exemplos de como estes documentos podem ser apresentados.

4 RESULTADOS

Os resultados da calibração de um sistema de nivelamento digital são informações relacionadas com o desempenho (desvios das leituras) e o fator de correção, composto pelas escalas da mira e do nível (WOSCHITZ, 2003).

Para derivar informações relacionadas com o desempenho foram comparadas as médias das leituras do nível (N_i) com os valores de referência (I_i), obtidos por interferometria laser. Assim, os desvios das leituras (ΔL) podem ser calculados pela seguinte equação:

$$\Delta L_i = N_i - I_i \quad (26)$$

Quando as leituras do nível não são afetadas por efeitos sistemáticos, os valores dos desvios devem ser iguais a zero (WOSCHITZ, 2003). Contudo, tais efeitos geralmente estão presentes e podem ser causados por diversos fatores, por exemplo, focalização imprópria da imagem da mira, códigos da mira danificados, imagem fragmentada, problemas no espaçamento e alinhamento entre os pixels no sensor CCD, algoritmo para o processamento da imagem, entre outros (WOSCHITZ, 2005). Ainda, segundo Woschitz (2003) mesmo quando tais efeitos são identificados e modelados outros erros e flutuações aleatórias causarão desvios no resultado das medições.

Calculados os desvios das leituras de um determinado sistema de nivelamento digital deve-se derivar o fator de correção. Este pode ser estimado através de uma análise de regressão, onde verifica-se a relação existente entre os desvios das leituras e a posição lida na mira. Ao comparar os modelos de regressão linear, logarítmica e polinomial verificou-se que não ocorreram diferenças significativas nas correções aplicadas nas leituras realizadas com nível, portanto, adotou-se o modelo de regressão linear para estimar uma equação que indique a relação funcional entre os desvios calculados e os pontos que representam a linha de tendência.

O modelo de regressão linear aplicado aos sistemas de nivelamento digitais é representado pela Equação 27.

$$y_i = a \cdot x_i + b \quad (27)$$

Onde:

y_i - Valor aproximado para a correção da leitura realizada sobre a mira, cujo resultado é apresentado em milímetros;

a - Coeficiente angular da equação de regressão linear;

x_i - Leitura realizada na mira com o nível digital, onde as observações são indicadas em metros; e

b - Coeficiente linear da equação de regressão linear.

Visando eliminar possíveis erros grosseiros das leituras realizadas com o nível digital realizou-se uma análise estatística, onde os dados que não se enquadraram dentro do intervalo de confiança de duas vezes o desvio padrão amostral (2σ) foram eliminados e uma nova equação de regressão foi calculada para o sistema.

Por fim, as leituras medidas em campo com o sistema de nivelamento digital calibrado podem ser corrigidas considerando o fator de correção e a temperatura no momento da medição. O fator de correção é composto pelos coeficientes linear e angular obtidos a partir da equação de regressão linear, onde tais elementos devem ser convertidos para ppm (partes por milhão). Assim, adaptando-se as equações fornecidas por Woschitz (2003) e Václav (2012) a leitura corrigida do plano horizontal observado poderá ser calculada através da seguinte equação:

$$h^{corr} = h_c^{med} \cdot [1 - a + \alpha^{inv} \cdot (t - t^{ref})] - b \quad (28)$$

Onde:

h^{corr} - Leitura corrigida;

h_c^{med} - Leitura medida corrigida do fator de compensação;

a - Coeficiente angular da equação de regressão linear em ppm;

α^{inv} - Coeficiente de expansão termal do ínvar (12-13 ppm/°C);

t - Temperatura no momento do levantamento em campo;

t^{ref} - Temperatura de referência utilizada durante a calibração do sistema de nivelamento digital; e

b - Coeficiente linear da equação de regressão linear em ppm;

Com o propósito de investigar e analisar a metodologia proposta bem como o sistema de calibração desenvolvido no LAIG, serão apresentados no item 4.1 os resultados das calibrações de sete diferentes sistemas de nivelamento digitais (experimentos 1 a 7) (Tabela 5). Nestes, foram considerados três diferentes níveis digitais do mercado (dois níveis Leica DNA03 e um nível Foif EL302A), cujas observações foram realizadas em miras com 1 m, 2 m e 3 m de comprimento. Além disso, foram derivados os desvios das leituras, o fator de correção e o certificado de calibração para cada um dos sistemas de nivelamento analisados (Apêndice).

TABELA 5 - SISTEMAS DE NIVELAMENTO DIGITAIS CALIBRADOS NO SISTEMA DE CALIBRAÇÃO HORIZONTAL PROPOSTO

SISTEMAS DE NIVELAMENTO DIGITAIS CALIBRADOS		
	Nível digital	Mira de invar
Experimento 1	DNA03 (n° de série 333660)	Leica GPCL2 (n° de série 30207)
Experimento 2	DNA03 (n° de série 333660)	Leica GPCL2 (n° de série 30211)
Experimento 3	Foif EL302A (n° de série 30000674)	Mira 1 (s/n)
Experimento 4	Foif EL302A (n° de série 30000674)	Mira 2 (s/n)
Experimento 5	DNA03 (n° de série 346061)	Leica GWCL92 (n° de série 9117)
Experimento 6	DNA03 (n° de série 333660)	Leica GPCL3 (n° de série 37968)
Experimento 7	DNA03 (n° de série 333660)	Leica GPCL3 (n° de série 37974)

FONTE: O Autor (2017).

4.1 RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DE DIFERENTES SISTEMAS DE NIVELAMENTO DIGITAIS

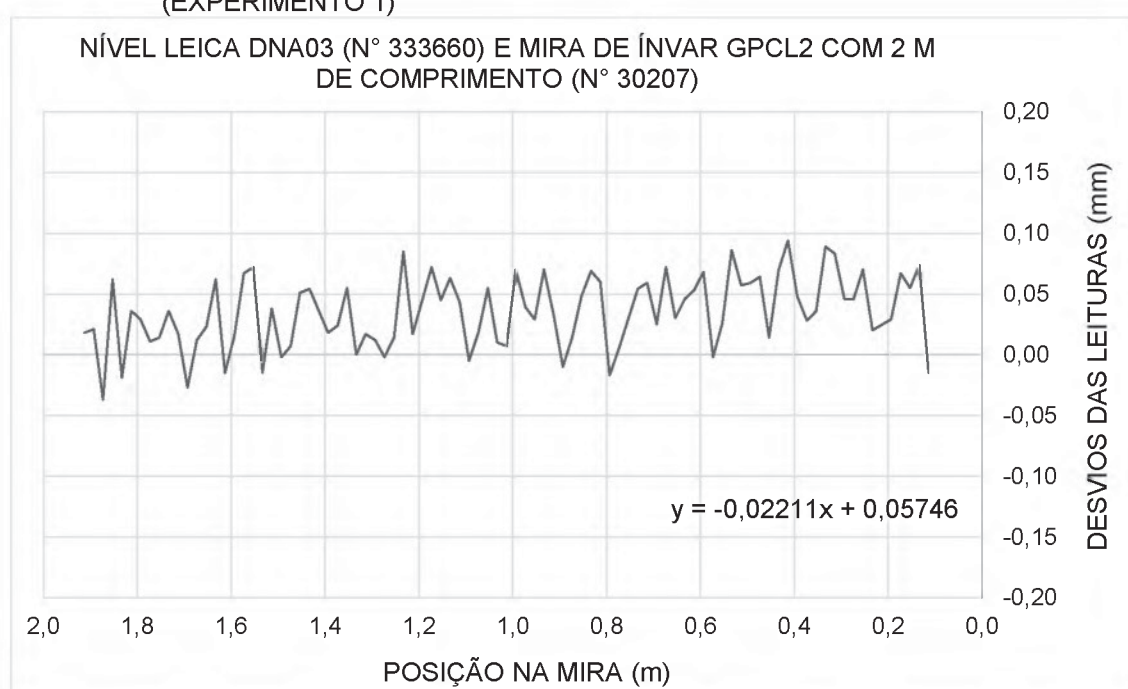
4.1.1 Experimento 1

Com base na metodologia apresentada realizou-se a calibração de um sistema de nivelamento composto por um nível digital Leica DNA03 (n° de série 333660) e uma mira de invar Leica GPCL2 gravada em código de barras com 2 m de comprimento (n° de série 30207). A média da temperatura, umidade e pressão relativa do ar durante o procedimento foram de 22,4°C, 50,0% e 689,8mmHg respectivamente.

Durante o procedimento de calibração foram realizadas seis séries de observações da base em direção ao topo da mira e vice-versa, onde a cada nova série invertia-se a posição da mira. O comprimento do passo adotado foi de 20 mm, resultando em noventa posições observadas. O tempo total para a calibração foi de 12 horas não contínuas, tomando-se o cuidado de sempre iniciar e terminar cada série de observações.

O resultado da calibração pode ser analisado na Figura 51, onde apresenta-se os desvios das leituras em função da posição na mira (o eixo que representa os desvios das leituras está do lado direito da figura para coincidir com a posição adotada como referência). O máximo desvio foi da ordem do centésimo do milímetro (0,094 mm) na posição 0,41305 m da mira, sendo a acurácia do sistema calibrado de $0,035 \pm 0,003$ mm.

FIGURA 51 - RESULTADO DA CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA DE NIVELAMENTO DIGITAL (EXPERIMENTO 1)



Fonte: O autor (2017).

Calculou-se também a reta de regressão para os desvios das leituras no intuito de obter os coeficientes angular ($a = -2211 \cdot 10^{-8}$) e linear ($b = 5746 \cdot 10^{-11}$), parâmetros da equação 29 já convertidos em ppm, utilizados para derivar a seguinte relação:

$$h^{corr} = h_c^{med} \cdot [1 + 2211 \cdot 10^{-8} + \alpha^{inv} \cdot (t - t^{ref})] - 5746 \cdot 10^{-11} \quad (29)$$

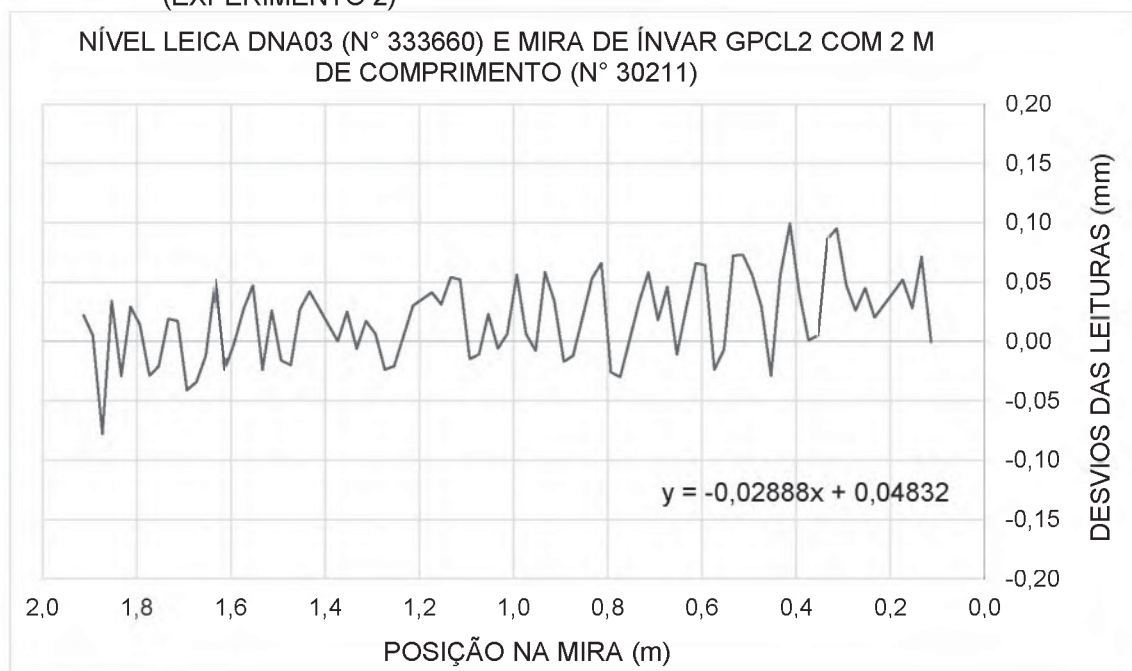
Esta equação é adotada como modelo funcional de correção para as leituras deste sistema de nivelamento. Ressalta-se que o sinal da correção é contrário ao sinal do erro, ou seja, os coeficientes de correção são aplicados com sinal contrário na equação apresentada.

4.1.2 Experimento 2

O segundo conjunto de nivelamento digital calibrado no sistema desenvolvido no LAIG é composto pelo nível digital Leica DNA03 utilizado no experimento 1 (n° de série 333660) e uma mira de ínvar Leica GPCL2 gravada em código de barras com 2 m de comprimento (n° de série 30211). Os parâmetros ambientais medidos durante a calibração foram de 23,1°C de temperatura, 51,5% de umidade e 689,3 mmHg de pressão atmosférica.

Os desvios das leituras em função da posição lida na mira podem ser analisados na Figura 52, onde foram obtidos a partir da média de seis séries de leituras realizadas da base em direção ao topo da mira e do topo em direção a base da mira, invertendo-se o sentido de leitura a cada nova série de observações. O máximo desvio foi de 0,099 mm na posição de 0,41303 m da mira, sendo a acurácia do sistema calibrado de $0,035 \pm 0,004$ mm.

FIGURA 52 - RESULTADO DA CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA DE NIVELAMENTO DIGITAL (EXPERIMENTO 2)



Fonte: O autor (2017).

A partir da reta de regressão estimou-se a equação para corrigir as leituras deste sistema de nivelamento (Equação 30). Enfatiza-se que o fator de correção, coeficientes angular e linear da equação da reta, foram convertidos em ppm para compor a equação que corrige as leituras obtidas em campo.

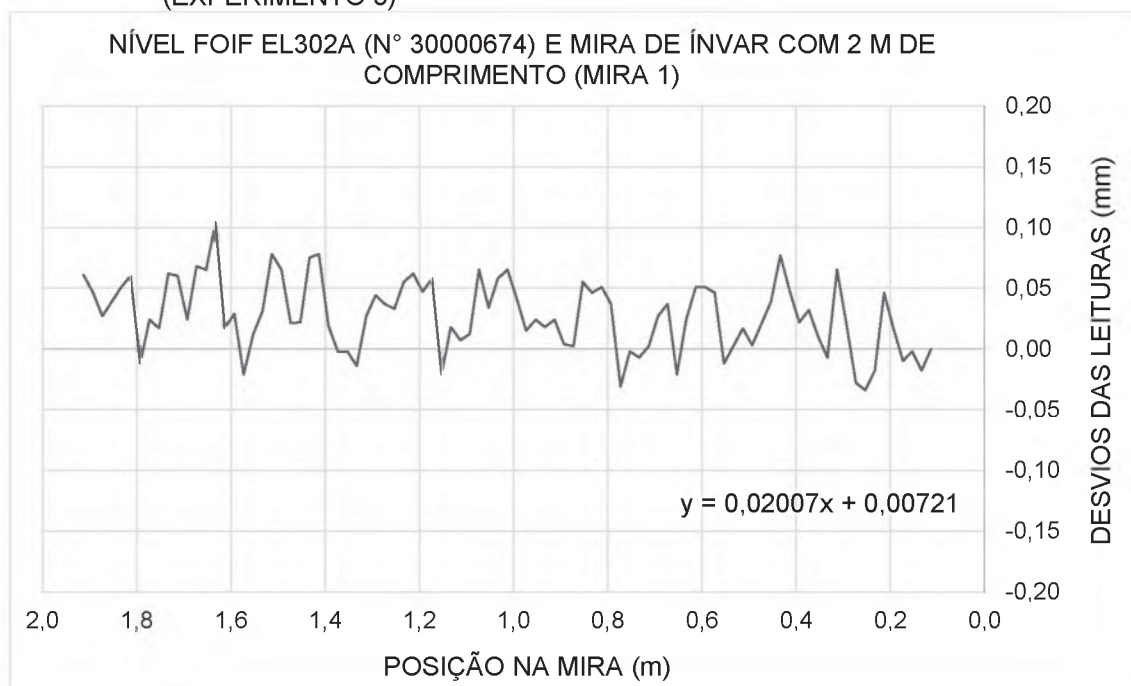
$$h^{corr} = h_c^{med} \cdot [1 + 2888 \cdot 10^{-8} + \alpha^{inv.} \cdot (t - t^{ref})] - 4832 \cdot 10^{-11} \quad (30)$$

4.1.3 Experimento 3

O terceiro experimento consistiu em calibrar o nível digital Foif EL302A (n° de série 30000674) e uma mira de ínvar gravada em código de barras com 2 m de comprimento, denominada de mira 1. A temperatura, umidade e pressão atmosférica durante o procedimento de calibração foi de 22,3°C, 50,2% e 689,4 mmHg respectivamente.

Após realizar seis séries de observações nas posições direta e inversa da mira, foram derivados os desvios das leituras (Figura 53). O tempo total da calibração foi de 12 horas, sendo o máximo desvio da ordem de um décimo de milímetro (0,107 mm) na posição 1,63275 m da mira. A acurácia do sistema calibrado foi de $0,030 \pm 0,003$ mm.

FIGURA 53 - RESULTADO DA CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA DE NIVELAMENTO DIGITAL (EXPERIMENTO 3)



Fonte: O autor (2017).

A partir dos coeficientes do modelo de regressão linear foi possível compor a equação para corrigir as leituras realizadas com o sistema calibrado.

$$h^{corr} = h_c^{med} \cdot [1 - 2007 \cdot 10^{-8} + \alpha^{inv} \cdot (t - t^{ref})] - 0721 \cdot 10^{-11} \quad (31)$$

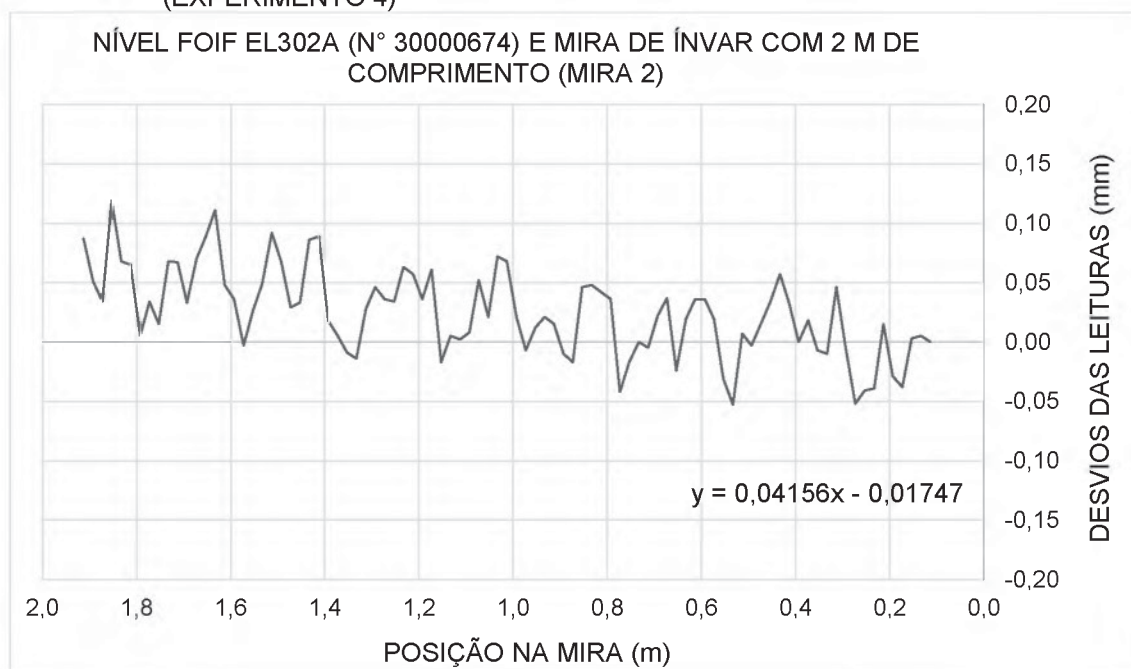
4.1.4 Experimento 4

Do mesmo modo, como apresentado no item 4.1.2 optou-se por calibrar novamente o nível digital Foif EL302A (n° de série 30000674) alterando-se a mira utilizada (mira 2). Esta é uma mira de ínvar gravada em código de barras com 2 m de comprimento. As condições ambientais no momento da calibração foram de 21,7°C de temperatura, 46,0% de umidade relativa do ar e 689,8mmHg de pressão atmosférica.

Os desvios do sistema de nivelamento foram calculados a partir da média de seis séries de observações realizadas nas posições direta e inversa da mira (Figura 54). O comprimento do passo adotado foi de 20 mm, totalizando noventa observações ao longo da mira. O máximo desvio foi da ordem do centésimo do milímetro (0,119

mm) na posição 1,85246 m da mira, sendo a acurácia do sistema calibrado de $0,037 \pm 0,004$ mm.

FIGURA 54 - RESULTADO DA CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA DE NIVELAMENTO DIGITAL (EXPERIMENTO 4)



Fonte: O autor (2017).

Com base na análise de regressão estimou-se a equação para corrigir as leituras deste sistema de nivelamento digital (Equação 32). Ressalta-se que o sinal dos coeficientes angular e linear é contrário ao sinal do erro e que tais constantes estão convertidas em ppm.

$$h^{corr} = h_c^{med} \cdot [1 - 4156 \cdot 10^{-8} + \alpha^{inv} \cdot (t - t^{ref})] + 1747 \cdot 10^{-11} \quad (32)$$

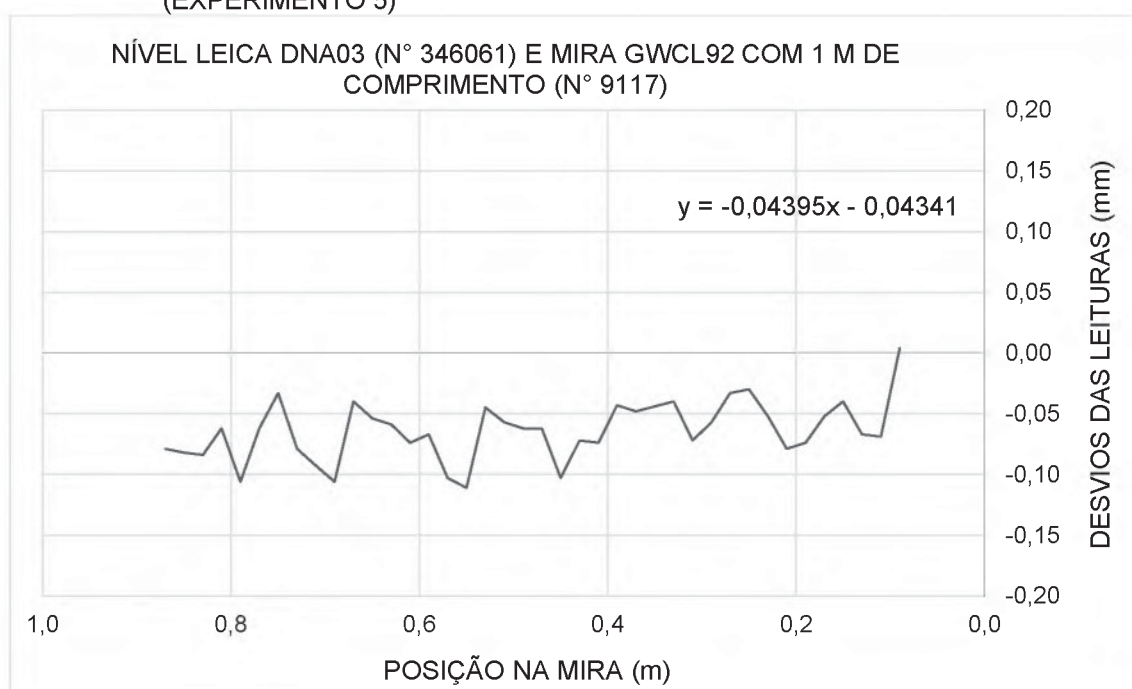
4.1.5 Experimento 5

No quinto experimento foi calibrado o sistema de nivelamento composto pelo nível digital Leica DNA03 (n° de série 346061) e uma mira de invar Leica GWCL92 gravada em código de barras com 1 m de comprimento (n° de série 9117). A temperatura, umidade relativa do ar e pressão atmosférica no momento da calibração foram de 20,6°C, 52,0% e 691,8mmHg respectivamente.

Como resultado da calibração é possível visualizar na Figura 55 os desvios das leituras calculados a partir da média de seis séries de observações nas posições

direta e inversa da mira, sendo o tempo total da calibração de 6 horas não contínuas. Foram observadas quarenta posições ao longo da mira, onde o máximo desvio foi da ordem de -0,111 mm na posição de 0,54966 m da mira. A acurácia do sistema calibrado foi de $0,024 \pm 0,004$ mm.

FIGURA 55 - RESULTADO DA CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA DE NIVELAMENTO DIGITAL (EXPERIMENTO 5)



Fonte: O autor (2017).

Para estimar a correção das leituras realizadas com o sistema de nivelamento digital apresentado, foram utilizados os coeficientes angular e linear do modelo de regressão para compor a Equação 33.

$$h^{corr} = h_c^{med} \cdot [1 + 4395 \cdot 10^{-8} + \alpha^{inv} \cdot (t - t^{ref})] + 4341 \cdot 10^{-11} \quad (33)$$

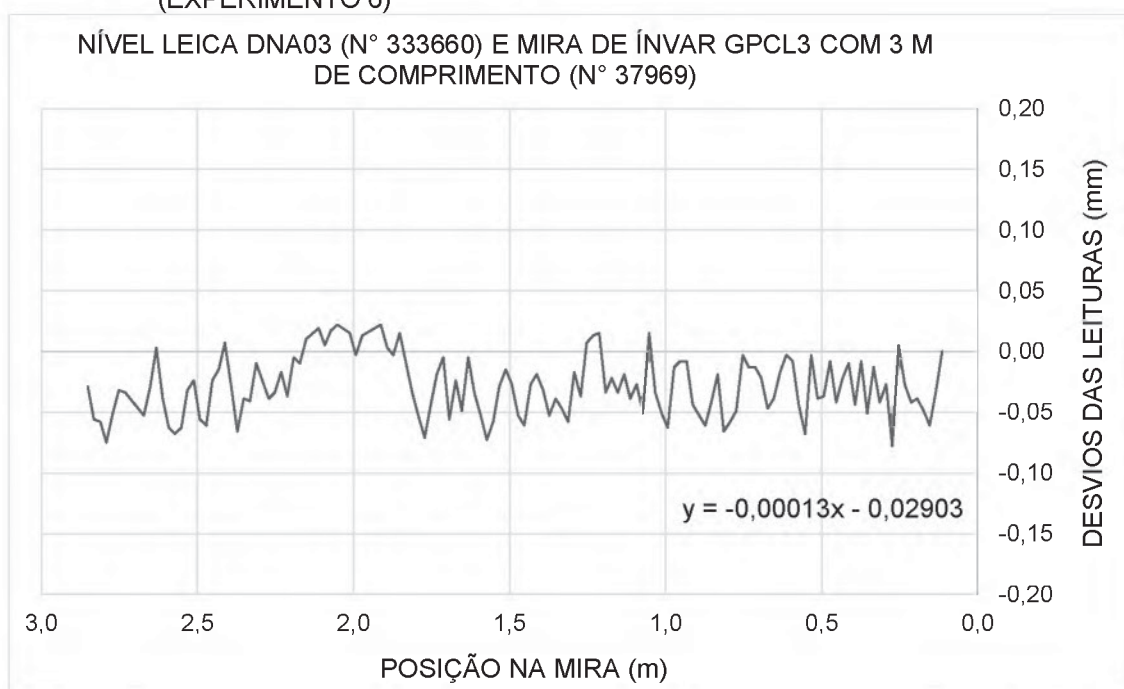
4.1.6 Experimento 6

No sexto experimento foram calibrados o nível digital Leica DNA03 (n° de série 333660) e uma mira de ínvar Leica GPCL3 (n° de série 37968) com 3 m de comprimento. A média da temperatura, umidade e pressão relativa do ar foram de 24,1°C, 42,0% e 692,36 mmHg respectivamente. O tempo total para a calibração de

uma mira de 3 m de comprimento, considerando seis séries de observações nas posições direta e inversa foi de cerca 18 horas.

Após calcular a média das séries observadas em cento e quarenta e duas posições sobre a mira, foram derivados os desvios das leituras (Figura 56). O máximo desvio foi da ordem do décimo do milímetro (-0,078 mm) na posição 0,27273 m da mira, sendo a acurácia do sistema calibrado de $0,024 \pm 0,002$ mm.

FIGURA 56 - RESULTADO DA CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA DE NIVELAMENTO DIGITAL (EXPERIMENTO 6)



Fonte: O autor (2017).

O fator de correção, obtido através dos coeficientes da equação de regressão linear, foram utilizados para compor a Equação 34. Esta, deve ser utilizada para corrigir as leituras deste sistema de nivelamento.

$$h^{corr} = h_c^{med} \cdot [1 + 0013 \cdot 10^{-8} + a^{inv} \cdot (t - t^{ref})] + 2903 \cdot 10^{-11} \quad (34)$$

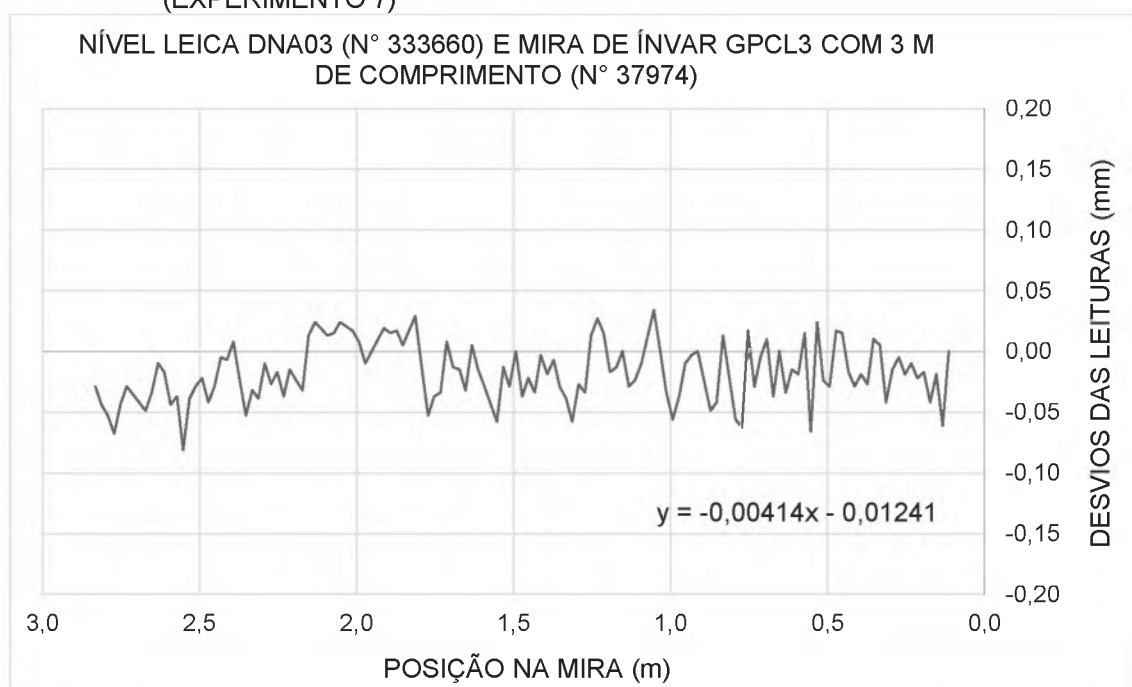
4.1.7 Experimento 7

Por fim, no sétimo experimento foram calibrados o nível digital Leica DNA03 (n° de série 333660) e a mira de ínvar Leica GPCL3 (n° de série 37974) com 3 m de comprimento. A temperatura média do laboratório durante a calibração foi de 22,2°C,

sendo a umidade e pressão relativa do ar iguais a 45,5% e 687,75mmHg, respectivamente.

Realizadas seis séries de observações nas posições direta e inversa da mira foi possível calcular os desvios das leituras obtidos com o presente sistema de nivelamento digital (Figura 57). O máximo desvio foi de -0,081 mm na posição de 2,55164 m da mira, sendo a acurácia do sistema calibrado de $0,024 \pm 0,002$ mm.

FIGURA 57 - RESULTADO DA CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA DE NIVELAMENTO DIGITAL (EXPERIMENTO 7)



Fonte: O autor (2017).

Após calcular a reta de regressão para os desvios das leituras, utilizou-se os coeficientes angular e linear para derivar a Equação 35. Esta, foi adotada como modelo funcional de correção para as leituras deste sistema de nivelamento.

$$h^{corr} = h_c^{med} \cdot [1 + 0414 \cdot 10^{-8} + \alpha^{inv} \cdot (t - t^{ref})] + 1241 \cdot 10^{-11} \quad (35)$$

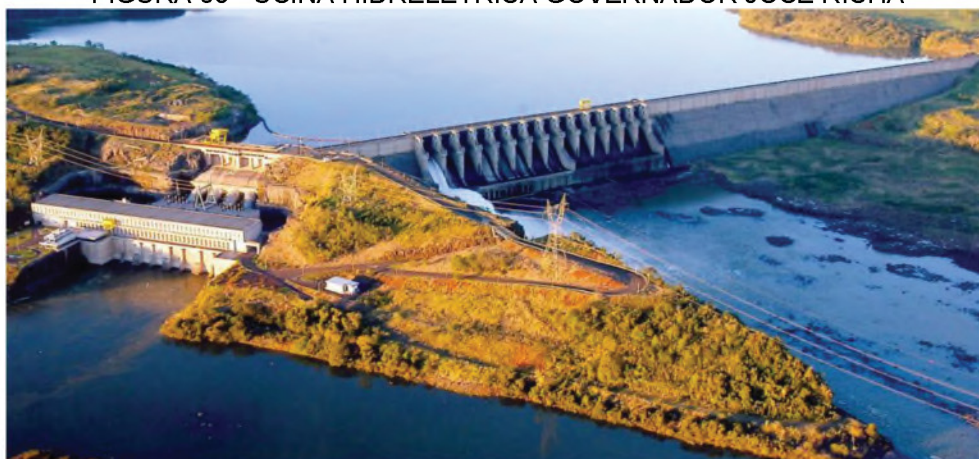
4.2 ESTUDOS DE CASO PARA APLICAR OS CERTIFICADOS DE CALIBRAÇÃO

Com o propósito de investigar a influência da aplicação dos certificados de calibração nas observações realizadas com quatro diferentes sistemas de nivelamento digitais, foram realizados levantamentos através do método de nivelamento geométrico por visadas iguais na barragem da Usina Hidrelétrica Governador José Richa (UHGJR) (Levantamento 1) e na UFPR (Levantamento 2).

4.2.1 Aplicação do certificado de calibração – Levantamento 1

O monitoramento e o estudo do recalque da crista da barragem da UHGJR vem sendo estudada desde 1998 pelo grupo de pesquisa de Geodésia Aplicada a Engenharia. A UHGJR (Figura 58) localiza-se na divisa dos municípios de Capitão Leônidas Marques e Nova Prata do Iguaçu, no sudoeste do estado do Paraná, e faz parte dos aproveitamentos hidrelétricos construídos no rio Iguaçu. A barragem possui mais de um quilômetro de comprimento e em volume é a maior estrutura em concreto compacta com rolo do país. Além disso, a crista da barragem foi transformada em rodovia (PR-592) o que encurtou as distâncias entre os municípios do oeste e sudoeste do estado (COPEL, 2017).

FIGURA 58 - USINA HIDRELÉTRICA GOVERNADOR JOSÉ RICHÁ



FONTE: Copel, 2017.

O monitoramento para a investigação dos recalques da crista da barragem é realizado através do nivelamento geométrico de primeira ordem, onde são utilizados um sistema de nivelamento (Figura 59) composto por um nível digital Leica DNA03

(n° de série 333660) e um par de miras verticais de ínvar Leica GPCL2 gravadas em código de barras com 2 m de comprimento (n° de séries 30207 e 30211).

FIGURA 59 - (A) NIVELAMENTO GEOMÉTRICO NA CRISTA DA BARRAGEM DA UHGJR UTILIZANDO O NÍVEL DIGITAL LEICA DNA03 (B) MIRA DE ÍNVAR LEICA GRAVADA EM CÓDIGO DE BARRAS



Fonte: O autor (2017).

Com a finalidade de aplicar o certificado de calibração do sistema de nivelamento digital utilizado na campanha de levantamento do mês de julho de 2017 sobre a crista da barragem da UHGJR, foram determinados os desníveis entre oito referências de nível (RRNN) localizados no entorno e na pista de rolamento da barragem. As RRNN são identificadas como RN 50A, RN 50B, RN 50D, RN 50E, RN 50F, RN 50G, RN 50H e RN 51 (Figura 60).

FIGURA 60 - POSIÇÕES APROXIMADAS DAS RRNN UTILIZADAS NO MONITORAMENTO DA BARRAGEM DA UHGJR



FONTE: Adaptado de Google Earth, 2017.

As RRNN 50B, 50G e 50H localizam-se abaixo do nível da pista (Figura 61a), pois foram implantadas antes da conclusão da PR-592. Já as RRNN 50A, 50D, 50E e 50F foram implantadas após o término da PR-592, por isso, localizam-se sob a pista de rolamento (Figura 61b).

FIGURA 61 - REFERÊNCIAS DE NÍVEL LOCALIZADAS NA CRISTA DA BARRAGEM DA UHGJR (A) RN ABAIXO DO NÍVEL DA PISTA (B) RN SOB A PISTA



Fonte: O autor (2017).

Para evitar a ocorrência e propagação de erros sistemáticos durante os levantamentos, alguns cuidados foram tomados:

- A fim de minimizar o erro colimação vertical do nível, curvatura terrestre e refração atmosférica, adotou-se a técnica de visadas iguais, onde a diferença máxima tolerada entre os comprimentos das visadas de ré e vante foi de até 10% (ISO 17123-2, 2001).
- Para minimizar os efeitos do fenômeno de reverberação as visadas foram realizadas acima de 20 cm do solo (IBGE, 1983), e para evitar perturbações devido ao vento as leituras foram realizadas abaixo de 30 cm do topo da mira;
- Para eliminar o erro de índice utilizou-se um par de miras, tomando-se o cuidado de alterná-las a ré e a vante, de modo que a mira que iniciou o nivelamento é a mesma que terminou o levantamento (IBGE, 1983);
- Utilizou-se sapatas para apoiar a mira ao longo dos levantamentos nos pontos intermediários (IBGE, 1983); e
- O critério adotado para a análise dos erros cometidos é de acordo com a PR n° 22 (IBGE, 1983), onde a qualidade dos trabalhos foi controlada através das diferenças entre o nivelamento e o contranivelamento, seção a seção, e

acumulada na linha, observando-se a tolerância de $1mm\sqrt{k}$ (onde k é a média da distância nivelada e contra nivelada em quilômetros). A tolerância adotada é melhor do que a tolerância de $3mm\sqrt{k}$ indicada pela PR n° 22 (IBGE, 1983) para levantamentos de alta precisão.

Informações relacionadas com a temperatura no momento do levantamento também são necessárias para corrigir os desníveis observados através da aplicação do certificado de calibração do sistema de nivelamento digital. Por isso, utilizou-se uma estação meteorológica portátil fixa sobre o tripé do nível para armazenar as informações de temperatura a cada um minuto (Figura 62), sendo a média da temperatura da seção nivelada utilizada como referência.

FIGURA 62 - ESTAÇÃO METEOROLÓGICA PORTÁTIL FIXA EM UM TRIPÉ



Fonte: O autor (2017).

O monitoramento da crista da barragem da UHGJR é realizado através de campanhas de levantamentos onde são utilizados os sistemas de nivelamento digitais calibrados nos itens 4.1.1 (experimento 1) e 4.1.2 (experimento 2). Deste modo, com o propósito de corrigir os desníveis observados entre as RRNN 50A até 51, foram corrigidas as leituras do nível aplicando-se as Equações 29 e 30.

Nas Tabelas 6 e 7 é possível analisar os comprimentos totais de cada seção nivelada, a temperatura média durante o levantamento, os desníveis obtidos no

nivelamento e no contranivelamento, os erros permitidos e cometidos e os desníveis calculados antes e após a aplicação do certificado de calibração.

TABELA 6 - RESULTADOS DOS LEVANTAMENTOS DAS SEÇÕES NIVELADAS NA BARRAGEM DA UHGJR

DADOS ORIGINAIS DO NIVELAMENTO							
Seção	Temp. °C	Distância Nivelada (Km)	Desnível (m)		Erro Permitido (mm)	Erro Cometido (mm)	Desnível (m)
			Nivelamento	Contra Nivelamento			
RN 50A ↔ RN 50B	25,8	0,5397	-0,36465	0,36454	0,73	0,11	-0,36460
RN 50B ↔ RN 50D	25,5	0,2022	0,32350	-0,32300	0,45	0,45	0,32325
RN 50D ↔ RN 50E	26,5	0,1249	0,02310	-0,02300	0,35	0,10	0,02305
RN 50E ↔ RN 50F	24,0	0,0836	-0,01040	0,01040	0,29	0,00	-0,01040
RN 50F ↔ RN 50G	23,0	0,0977	-0,27720	0,27730	0,31	-0,10	-0,27725
RN 50G ↔ RN 50H	22,1	0,1507	0,00960	-0,00960	0,39	0,00	0,00960
RN 50H ↔ RN 51	21,8	0,1125	0,27600	-0,27590	0,34	0,10	0,27595

Fonte: O autor (2017).

TABELA 7 - RESULTADOS DOS LEVANTAMENTOS DAS SEÇÕES NIVELADAS NA BARRAGEM DA UHGJR APÓS A APLICAÇÃO DOS CERTIFICADOS DE CALIBRAÇÃO DOS SISTEMAS DE NIVELAMENTO DIGITAIS

DADOS DO NIVELAMENTO CORRIGIDOS							
Seção	Temp. °C	Distância Nivelada (Km)	Desnível (m)		Erro Permitido (mm)	Erro Cometido (mm)	Desnível (m)
			Nivelamento	Contra Nivelamento			
RN 50A ↔ RN 50B	25,8	0,5397	-0,36468	0,36457	0,73	0,11	-0,36462
RN 50B ↔ RN 50D	25,5	0,2022	0,32352	-0,32302	0,45	0,45	0,32327
RN 50D ↔ RN 50E	26,5	0,1249	0,02310	-0,02300	0,35	0,10	0,02305
RN 50E ↔ RN 50F	24,0	0,0836	-0,01040	0,01040	0,29	0,00	-0,01040
RN 50F ↔ RN 50G	23,0	0,0977	-0,27721	0,27731	0,31	-0,09	-0,27726
RN 50G ↔ RN 50H	22,1	0,1507	0,00960	-0,00960	0,39	0,00	0,00960
RN 50H ↔ RN 51	21,8	0,1125	0,27600	-0,27590	0,34	0,10	0,27595

Fonte: O autor (2017).

Ao comparar as Tabelas 6 e 7 foi possível constatar que os desníveis obtidos nas seções entre a RN 50A para RN 50B, RN 50B para RN 50D e RN 50F para RN 50G sofreram um aumento da ordem de até dois centésimos de milímetro, independente do comprimento da seção nivelada. Já os desníveis das seções entre as RRNN 50D para 50E, 50E para 50F, 50G para 50H e 50H para 51 não sofreram correções.

Como os erros permitidos são calculados em função das médias das distâncias niveladas e contra niveladas, não houveram variações antes e após a

aplicação do certificado de calibração. Ressalta-se que os fechamentos das seções niveladas estão dentro da tolerância adotada de $1mm\sqrt{k}$.

A RN 50A é considerada como origem e tem cota igual a 100 m. Para calcular a cota da RN 51 a partir da RN 50A, foram utilizados os desníveis obtidos ao longo das RRNN localizadas na crista da barragem, obtendo-se como cota do ponto o valor de 99,97960 m. Após aplicar o certificado de calibração a cota calculada manteve-se sem alterações, ou seja, 99,97960 m. Este resultado é atribuído a observação recorrente de uma mesma área da mira, gerando correções homogêneas.

4.2.2 Aplicação do certificado de calibração – Levantamento 2

Com o intuito de investigar a aplicação do certificado de calibração de um sistema de nivelamento digital, onde observações pudessem ser realizadas em toda a extensão da mira, realizou-se um levantamento através do método de nivelamento geométrico para determinar o desnível entre duas referências de nível (RN 02 e RN 123) localizadas na UFPR - campus Centro Politécnico, cujo declive é de 14 m (Figura 63).

FIGURA 63 – REFERÊNCIAS DE NIVEL LOCALIZADAS NA UFPR



Fonte: Adaptado de Google Earth (2017).

A técnica adotada no levantamento foi o de visadas iguais, onde os mesmos cuidados considerados no nivelamento realizado na UHGJR foram aplicados. Os sistemas de nivelamento digitais utilizados são compostos por um nível Leica DNA03 (nº de série 333660) e duas miras de invar Leica GPCL3 com 3 m de comprimento (nº de séries 37974 e 37968). Tais sistemas foram calibrados nos experimentos 6 e 7, onde foram derivados os desvios e fatores de correção. Ressalta-se que devido ao

desnível existente entre as RRNN niveladas foram realizadas observações nas regiões inferior, média e superior da mira.

Considerando a temperatura no momento do levantamento de campo e os fatores de correção dos sistemas de nivelamento calibrados, aplicou-se as Equações 34 e 35 para corrigir as leituras realizadas em campo. Nas Tabelas 8 e 9 são indicadas a temperatura média durante o levantamento, o comprimento total da seção nivelada, os desníveis obtidos no nivelamento e no contranivelamento, os erros permitido e cometido e o desnível calculado antes e após a aplicação do certificado de calibração.

TABELA 8 - RESULTADO DO NIVELAMENTO ENTRE AS RRNN 02 E 123 NA UFPR

DADOS ORIGINAIS DO NIVELAMENTO							
Seção	Temp. °C	Distância Nivelada (Km)	Desnível (m)		Erro Permitido (mm)	Erro Cometido (mm)	Desnível (m)
			Nivelamento	Contra Nivelamento			
RN 02 ↔ RN 123	27,1	0,30604	-14,22387	14,22432	0,55	-0,45	-14,22410

Fonte: O autor (2017).

TABELA 9 - RESULTADO DO NIVELAMENTO ENTRE AS RRNN 02 E 123 NA UFPR APÓS APLICAÇÃO DOS CERTIFICADOS DE CALIBRAÇÃO

DADOS DO NIVELAMENTO CORRIGIDOS							
Seção	Temp. °C	Distância Nivelada (Km)	Desnível (m)		Erro Permitido (mm)	Erro Cometido (mm)	Desnível (m)
			Nivelamento	Contra Nivelamento			
RN 02 ↔ RN 123	27,1	0,30604	-14,22455	14,22499	0,55	-0,44	-14,22477

Fonte: O autor (2017).

Analisando-se as Tabelas 8 e 9 foi possível constatar que após a aplicação do certificado de calibração houve uma correção de cerca de sete décimos de milímetros nos desníveis calculados no nivelamento e no contranivelamento. Comparando-se os erros permitido e cometido, verifica-se que o fechamento da seção nivelada está dentro da tolerância de $1mm\sqrt{k}$, sendo que houve uma redução de um centésimo de milímetro no erro cometido após corrigir as leituras do nível.

Ao comparar o desnível entre as RRNN verificou-se uma diferença de -0,00068 m, ou seja, uma correção da ordem do décimo do milímetro. Sendo assim, haveria uma redução na altitude da RN 123 antes e após o certificado de calibração de 899,77591 m para 899,77523 m.

5 CONCLUSÕES

O desenvolvimento desta pesquisa teve como finalidade estudar e propor uma nova metodologia para a calibração de sistemas de nivelamento digitais, tendo como principal característica manter a mira de nivelamento estática durante o procedimento de calibração. Tal abordagem teve como vantagem minimizar a influência de erros sistemáticos e aleatórios causados pelo deslocamento mira, o que pode degradar o resultado das observações. Para atender tal objetivo, diferentes etapas foram desenvolvidas para adequar a estrutura de calibração de miras verticais de invar do LAIG e assim transformá-la em um sistema de calibração horizontal de sistemas de nivelamento digitais, onde podem ser derivados os desvios das leituras e os fatores de compensação dos sistemas calibrados.

Para adequar o sistema de calibração projetou-se e fabricou-se um conjunto de peças para fixar e posicionar por construção um espelho plano a 45° , bem como um conjunto de equipamentos (refletor móvel do interferômetro, luneta e nível tubular de precisão) em um sistema de transporte que se desloca sobre um par de trilhos. Estes elementos foram fundamentais para garantir o correto desempenho da metodologia proposta, pois ao investigar a horizontalização dos trilhos constatou-se que podem ocorrer desvios de até 0,82 mm de amplitude, o que altera o espelho da sua posição ideal, ou seja, dos 45° necessários para que se visualize uma imagem vertical da mira. No entanto, com o auxílio do nível tubular de precisão instalado sobre as peças de adequação do sistema de transporte, os desvios da posição do espelho podem ser corrigidos, garantindo que as observações sejam realizadas corretamente sobre a mira.

Durante a execução dos experimentos verificou-se que o tamanho refletido da imagem da mira pelo espelho altera-se de acordo com a distância de observação formada entre o nível e a mira, assim, o correto dimensionamento do espelho, através da equação desenvolvida, foi essencial para que as observações fossem efetuadas indiretamente em diferentes distâncias.

Como consequência do deslocamento do espelho foi preciso nivelar o conjunto de equipamentos fixos nas peças de adequação e focar a imagem no nível, o que torna o processo de calibração um pouco mais oneroso em relação aos demais sistemas existentes. Este fato não influencia nos resultados da calibração, caso o operador seja cuidadoso com a focalização da imagem.

Com o intuito de verificar a metodologia proposta e analisar os desvios e os fatores de correção de diferentes sistemas de nivelamentos digitais, foram realizadas a calibração de sete conjuntos de miras e níveis. Analisando-se os resultados verificou-se que os desvios são função do próprio sistema de nivelamento digital, pois resultaram em diferentes desvios quando alterou-se, por exemplo, a mira a ser calibrada. Isto pode ser analisado ao comparar os experimentos 1 e 2, 3 e 4 ou 6 e 7, onde manteve-se o nível alterando-se os comprimentos e as miras. Tais desvios podem ser considerados como relacionados as condições físicas da mira, como arranhões e manchas ou ao processo de gravação da fita de invar, bem como ao sistema óptico, o sensor CCD ou aos demais componentes que formam o nível digital, por isso, o comportamento dos desvios é único para cada sistema de nivelamento.

Ao comparar a máxima magnitude dos desvios oriundos dos sistemas calibrados (um décimo de milímetro) com os resultados obtidos nos sistemas de calibração vertical e horizontal desenvolvidos no SLAC, TUG, FGI e CTU, onde os máximos desvios chegaram a $\pm 20 \mu\text{m}$, $40 \mu\text{m}$, $\pm 50 \mu\text{m}$ e $\pm 60 \mu\text{m}$ respectivamente, é possível afirmar que há potencialidade na metodologia e no sistema desenvolvido, uma vez que a maioria dos procedimentos de calibração são manuais, enquanto que nos demais sistemas são parcial ou totalmente automatizados.

Para investigar a aplicação do certificado de calibração, foram realizados o nivelamento geométrico de primeira ordem na UHGJR e na UFPR. Os resultados do nivelamento na UHGJR não indicaram correções no desnível entre as RRNN 50A e 51, podendo este fato estar relacionado a observação recorrente de uma mesma área da mira. Contudo, ao aplicar o certificado de calibração em uma área com declive de 14 m (UFPR), onde seções nas regiões inferior, média e superior das miras foram observadas, verificou-se uma diferença no cálculo do desnível de cerca de sete décimos de milímetros, além de diminuir o erro cometido. Diferenças da ordem do décimo do milímetro podem ser significativas quando são realizados nivelamentos geométricos de primeira ordem para o controle estrutural, estabelecimento de redes verticais e etc. No entanto, enfatiza-se que independente da correção aplicada, deve-se realizar a calibração dos sistemas de nivelamento digitais em todos os trabalhos que exijam precisão e alta precisão, devendo a calibração ser realizada anualmente ou após os equipamentos terem sofridos avarias, como queda, danos, reparos ou devido a trepidações no transporte do instrumento.

Por fim, é possível afirmar que através da metodologia e do sistema de calibração desenvolvidos é possível disponibilizar aos usuários dos sistemas de nivelamento digitais a possibilidade de atender as obrigações e deveres relacionados as normas de qualidade, como as normas ABNT NBR ISO 9001:2000 (controle de dispositivos de medição e monitoramento), ABNT NBR ISO 10012: 2004 (Sistemas de Gestão da Medição – Requisitos para os processos de medição e equipamentos de medição) e ABNT NBR ISO/IEC 17025 (requisitos relativos à calibração de equipamentos).

Além disso, a partir da calibração é possível conhecer o comportamento do instrumento através da análise dos desvios, possibilitando quantificar os erros e alcançar resultados mais fiáveis devido a aplicação do certificado de calibração. A importância da calibração também pode ser justificada pelo fato de disponibilizar ao usuário a situação da qualidade do instrumento, estendendo seu tempo de uso, pois é possível verificar se o equipamento pode ser utilizado em determinadas aplicações, como por exemplo, em locações de equipamentos, nivelamentos ou na topografia industrial.

5.1 RECOMENDAÇÕES

Para complementar a pesquisa desenvolvida são apresentadas algumas recomendações:

- Desenvolver um sistema para automatizar o deslocamento do sistema de transporte através da instalação de um motor de passo, bem como automatizar o processo para a leitura e armazenamento dos dados;
- Desenvolver um algoritmo computacional para o processamento e análise dos dados;
- A norma ABNT NBR ISO/IEC 17025, aborda que a medição deve ser assegurada pela utilização de serviços de calibração de laboratórios que possam demonstrar competência, capacidade de medição e rastreabilidade. Assim, recomenda-se a posterior acreditação do LAIG junto aos órgãos competentes, como o INMETRO, tendo como objetivo o reconhecimento formal da competência do laboratório; e
- Realizar o nivelamento geométrico de alta precisão para determinar o desnível de circuitos formados por pontos (referências de nível) que compõem a rede geodésica de primeira ordem, com o propósito de aplicar o certificado de calibração para avaliar em um conjunto maior de dados as diferenças entre os desníveis antes e após o certificado de calibração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 9001:** Sistemas de gestão da qualidade – Requisitos. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 10012:** Sistemas de gestão de medição – Requisitos para os processos de medição e equipamento de medição. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO/IEC 17015:** Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro, 2005.

AKSAMITAUSKAS, V. C.; REKUS, D.; GINIOTIS, V. Application of Digital Automatic Levels and Impact of their Accuracy on Construction measurements. In: **25° International Symposium on Automation and Robotics in Construction**. Vilnius, Lituânia. 2008.

ALMEIDA, L. L. DE. **Geração de imagens de melhor resolução a partir de sequências de imagens**. 134 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Programa de Pós-graduação em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2001.

ANDOLFATO, S. H. D. **Sistema de automação de níveis digitais**. 97f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

AULETE, C. **Dicionário contemporâneo da língua portuguesa**. V. 3. Rio de Janeiro: Editora Delta, 1985.

BARROS, W. S. **Implementação e validação de método comparativo de calibração de sistema por interferometria a laser para medição linear**. 120 f. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-graduação em Metrologia para a Qualidade Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

BARROS, W. S.; MUNÓZ, G. S. Método Comparativo de Calibração de Sistema por Interferometria a Laser para Medição Linear. **Sociedade Brasileira de Metrologia**. Recife, 2003. Acesso em: 23/09/16. Obtido em: <http://www.inmetro.gov.br/producaointelectual/obras_intelectuais/30_obraIntelectual.pdf>.

BOYLE, W. S.; SMITH, G.E. Charge-coupled semiconductor devices. **The Bell Systems Technical Journal**, v. 49 (3), p. 587-593, 1970.

CHMIELEWSKI, A. M. M. **Análise e projeto de um sensor de imagem em 0.35 µm CMOS para compressão de dados no plano focal de câmeras digitais**. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

CHUMANOVÁ, P. **Systémová kalibrace digitálních nivelačních přístrojů a analýza přesnosti (System calibration of digital levels and measurement accuracy analysis)**. 36 f. Tese – Programa de Geodésia e Cartografia. Departamento de Geomática da Universidade Técnica Tcheca, Praga, 2014.

COPEL - Companhia Paranaense de Energia. **Usina Hidrelétrica Governador José Richa - Salto Caxias**. 2017. Disponível em: <http://www.copel.com/hpcopel/hotsite_caxias/>. Acesso em: 25 Jul. 2017.

CORDINI, J. **Determinação do erro cíclico em distanciômetros eletrônicos**. 151 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1991.

CRUZ, W. D. **Impacto causado pela evolução dos medidores eletrônicos de distância no processo de calibração**. 81 f. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

CRUZ, W. D.; GRAÇA, N. L. S. S.; FAGGION, P. L. Utilização de espelho de reflexão frontal aliado ao nivelamento geométrico para determinação de desnível de pontos em ambientes confinados. **Revista Brasileira de Geomática**, v.3, n.1, p.17-23, 2015.

DEPARTMENT OF DEFENSE. **MIL-STD-45662A**: requirements for the establishment and maintenance of a calibration system used to control the accuracy of measuring and test equipment (M&TE) and measurement standards. Washington, 1988.

DE PAULA, L. Saraiva. **Característica do Espelho**. [Mensagem pessoal]. Mensagem recebido por: <pedro.faggion@gmail.com>. 27 Jun. 2016.

DOUBEK, A. **Uma base de Aferição**. 80 f. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1974.

FAGGION, P. L. **Contribuição para a implantação de um sistema de aferição de miras na UFPR**. 147 f. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1993.

FAGGION, P. L. **Obtenção dos elementos de calibração e certificação de medidores eletrônicos de distância em campo e laboratório**. 144 f. Tese (doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

FAGGION, P. L. **Considerações sobre a instrumentação topográfica**. Curitiba, 2011. Apostila. Disponível em: <http://www.cartografica.ufpr.br/docs/Pedro/Apostila%20de%20Instrumenta%C3%A7%C3%A3o%20Topogr%C3%A1fica_2011_Aluno.pdf>. Acesso em: 22 jul. 2017.

FOIF. Catálogo. **EL03/EL302A Digital Level**. [20-?] Disponível em: <<http://www.foif.com/products/el302a-digital-level>>. Acesso em: 12 Jul. 2017.

GALO, M. **Calibração e Aplicação de Câmaras Digitais**. 163 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, 1993.

GASSNER, G.; RULAND, R.; DIX, B. Investigations of digital levels at the SLAC vertical comparator. In: **8th International Workshop on Accelerator Alignment (IWAA2004)**. Geneva, Switzerland, 2004.

GASSNER, G.; RULAND, R.; DIX, B. Investigations of Digital Levels for High Precision Measurements. **SLAC-PUB-12326**. 2006. Disponível em: < <http://www.slac.stanford.edu/cgi-wrap/getdoc/slac-pub-12326.pdf>>. Acesso em: 21 october 2016.

GEMAEL, C.; MACHADO, A. M. L.; WANDRESEN, R. **Introdução ao Ajustamento de Observações**: Aplicações Geodésicas. 2 ed. Curitiba: Ed. UFPR, 2015.

GEMIN, A. R. S.; MATOS, E. S.; FAGGION, P. L. Determination of vertical deviations of aligned guide rails with different surveying techniques. **Journal of Applied Geodesy**. 2017. No prelo.

GHILANI, C. D.; WOLF, P. R. **Elementary Surveying**: an introduction to geomatics. 13. ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2012.

GONÇALVES, M. L. A. M. **Determinação indireta de coordenadas topográficas utilizando estação total e espelho**. 131 f. Tese (doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

GONÇALVES, M. F. **Desenvolvimento de Sistemas de Medição Interferométrica para a Calibração de Distanciômetros**. 190f. Dissertação (mestrado) – Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa. 2012.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento de Imagens Digitais**. São Paulo: Editora Blucher, 1992. 296 p.

GOOGLE. **Google Earth**. 2017. Disponível em: <<https://www.google.com.br/earth/download/ge/agree.html>>. Acesso em: 20 out. 2017.

GRIPP, J. Jr. **Calibração de Distanciômetros Eletrônicos com medidas de campo**. 126 f. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1986.

GUM - **Evaluation of measurement data**: Guide to the expression of uncertainty in measurement. Working Group 1 of the Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM/WG 1). 1. ed. França. 2008.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R. **Fundamentos de Física**, 8 ed. Rio de Janeiro, 2009.

HECHT, E., **Optics**. 3. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2002.

HUINCA, S. C. M. **Análise de influências ambientais na calibração de antenas de receptores GPS**. 233 f. Tese (doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Resolução - PR nº 22**. 1983. Disponível em: < ftp://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/bservico1602.pdf>. Acesso em: 25 out. 2017.

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Portaria INMETRO nº 029, de 10 de março de 1995**: Vocabulário Internacional de Metrologia. 1995. Disponível em: < <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC000182.pdf>>. Acesso em: 27 out. 2017.

INGENSAND, H. The evolution of digital levelling techniques - limitations and new solutions. **International Federation of Surveyors**. Suécia, 1999.

ISO 17123-2 - International Standard. **Optics and optical instruments**: Field procedures for testing geodetic and surveying instruments. Suíça, 2001.

KING II, G., EIKLENBORG, M., VILCHECK, M., IOANNOU, S. **Quality control of high precision optical mirrors**. Engineering 801: Engineering Management – Project 2: Quality Control. San Francisco State University. 1998.

LASER MEASUREMENT SYSTEM HP 5528A. **Service Manual**. Hewlett Packard Company. California, 1986.

LASER MEASUREMENT SYSTEM HP 5528A. **User's Guide**. Hewlett Packard Company. California, 1992. Disponível em: <<http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/05528-90022.pdf?id=813090>>. Acesso em: 23 set. 2016.

LEICA GEOSYSTEMS. **Manual do usuário**: Leica DNA03/DNA10. Versão 2.0, Inglês. Suíça, 2006.

LEICA GEOSYSTEMS. **Manual do usuário**: GPLE2N/GPLE3N GPCL2/GPCL3. Inglês. Suíça, 2007.

LEICA GEOSYSTEMS. **Nível Digital Leica LS Dados técnicos**. Suíça, 2015.

MARTINI, L. **Calibração de prismas de reflexão total em forma de fita adesiva, em acrílico e sua aplicação no controle de deslocamentos de estruturas**. 113 f. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

MEDEIROS, H. P. **Sistema integrado de aquisição e processamento de imagens**. 123 f. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2005.

MICHELSON, A.; MORLEY, E. On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether. **American Journal of Science**. v. 34 (203), p.333–345. doi:10.2475/ajs.s3-34.203.333.

MORAIS, C. A. G. **Modelos de sintetização plena e reduzida de erros em máquinas de medir por coordenadas**. 205 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

NADAL, C. A. **Interseção óptica tridimensional aplicada à engenharia de precisão**. 116 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2000.

NADAL, C. A.; FAGGION, P. L.; BRASIL, R. P.; HILLESHEIN, V. Controle Geodésico de Trilhos Industriais Utilizando Autocolimação Óptica. **Revista Brasileira de Cartografia**. v. 62 (01), 2010.

NOVOTNÝ, M. **Výškové připojení a zaměření základního důlního bodového polev štoly Josef**. 97 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Técnica de Praga, 2012.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de física básica: ótica, relatividade e física quântica**. Vol. 4. São Paulo: Edgard Blucher, 1988.

OGUNDARE, J. O. **Precision Surveying: The Principles and Geomatics Practice**. Wiley, 2015.

RÜEGER, J. M.; BRUNNER, F. K. On System Calibration and Type Testing of Digital Levels. **zfv - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement**, v.125, p.120–130, 2000.

SANTIAGO FILHO, S. **Telescópios**. Disponível em: <<http://www.telescopiosastronomicos.com.br/testes.html>>. Acesso em: 29 mai. 2015.

SCHOFIELD, W.; BREACH, M. **Engineering Surveying**. 6. ed. Boston: Elsevier, 2007.

SIGUEL, A. R.; FAGGION, P. L.; VEIGA, L. A. K.; NADAL, C. A.; MATTOS, M. S.; SOARES, M. A. Aplicação do Método de Irradiação Tridimensional no Monitoramento de Barragens. **Boletim de Ciências Geodésicas**. v.19, n°3, p. 391-406, Curitiba, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702013000300003>

SILVA, I. DA; SEGANTINE, P. C. L. **Topografia Para Engenharia: Teoria e Prática de Geomática**. 1. ed. Elsevier, 2015.

SMITH, G. T. **Machine Tool Metrology: An Industrial Handbook**. 1. ed. Suíça: Springer International Publishing. 2016.

SUÁREZ, H. A.; DA SILVA I. **Experiência com o uso do método compacto para calibração de estações totais**. In: V Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife - PE, 2014.

TAKALO, M., ROUHIAINEN, P. Development of a System Calibration Comparator for Digital Levels in Finland. **Nordic Journal of Surveying and Real Estate Research**, v.1, 2004.

TOMMASELLI, A. M. G. F. **Fotogrametria Básica – Ótica Fotogramétrica**. 2009. Disponível em: < http://www.faed.udesc.br/arquivos/id_submenu/891/optica_fotogrametria.pdf>. Acesso em: 10 de nov. 2017.

VÁCLAV, V. L. K. **Zjišťování Systém ových Vlivů Na Výsledek Kalibrace Latě**. 84 f. Tese - Faculdade de Engenharia, Universidade Técnica de Praga, 2012.

VYSKOCIL, Z. **Horizontal comparator for system calibration of digital levels**. Departamento de Geodésia Avançada, FSV CVUT Praga, 2008. Disponível em: <ftp://athena.fsv.cvut.cz/EMEG/web/workshop08_vyskocil.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2016.

VYSKOCIL, Z.; LUKEŠ, Z. Horizontal comparator for the system calibration of digital levels —realization at the Faculty of civil engineering, CTU Prague and in the laboratory of the Department of survey and mapping Malaysia (JUPEM) in Kuala Lumpur. **Geoinformatics FCE CTU**, v.14(2), 2015.

WERLICH, R. M. C. **Análise da influência dos parâmetros de calibração de antenas de receptores GPS no posicionamento de alta precisão**. Dissertação (mestrado) - Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

WOSCHITZ, H. **System calibration of digital Levels: calibration facility, procedures and results**. Dissertação, Universidade Técnica de Graz. Graz, 2003.

WOSCHITZ, H.; BRUNNER, F. K.; HEISTER, H. Scale Determination of Digital Levelling Systems using a Vertical Comparator. In: **FIG XXII International Congress Washington, D.C. USA**, v.128, p.11-17. 2002.

WOSCHITZ, H.; BRUNNER, F. K. System Calibration of Digital Levels – Experimental Results of Systematic Effects. In: **INGEO2002, 2nd Conference of Engineering Surveying**. Bratislava, p. 165-172. 2002. Disponível em: < https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Institute/IGMS/laboratory/diglevelcal/2002_WHD_FKB_ingeo_reprint.pdf>. Acesso em: 1 mar. 2015.

WOSCHITZ, H.; BRUNNER, F. K. Development of a Vertical Comparator for System Calibration of Digital Levels. **VGI – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation**, v.91 (1), p. 68-76. 2003.

WOSCHITZ, H. **Systematic Effects of Digital Levelling Systems**. Instituto de Engenharia de Geodésia e Sistemas de Medição. Universidade Tecnológica de Graz. Apresentação de Slides. 2005. No prelo.

WOSCHITZ, H.; GASSNER, G.; RULAND, R. The SLAC Vertical Comparator for the Calibration of Digital Levels. **Journal of Surveying Engineering (SLAC-pub-12207)**. 2006. Disponível em: < <http://www.slac.stanford.edu/cgi-wrap/getdoc/slac-pub-12207.pdf>>. Acesso em: 29 mai. 2015.

WOSCHITZ, H.; HEISTER, H. **Überprüfung und Kalibrierung der Messmittel in der Geodäsie**. Handbuch der Geodäsie, Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2015. DOI. 10.1007/978-3-662-46900-2_33-1. Resumo.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Física IV: ótica e física moderna**. 12. ed. São Paulo: Pearson, 2009.

ZILIO, S. C. **Desenho e fabricação óptica**. Instituto de Física de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2007. *E-book*.

APÊNDICE 1- CERTIFICADOS DE CALIBRAÇÃO

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº 1

DADOS DO SISTEMA DE NIVELAMENTO DIGITAL
Instrumento: Nível Digital Leica DNA03 (nº de série: 333660) e mira de invar GPCL2 gravada em código de barras com 2 m de comprimento (nº de série: 30207).
Data da inspeção: 30/03/2017

CLIENTE
Universidade Federal do Paraná Av. Coronel Francisco Heráclito dos Santos, nº 210, Jardim das Américas – Curitiba – PR.

PROCEDIMENTO
Calibração do sistema de nivelamento digital conforme procedimento apresentado por Gemin (2017) ¹ .

PADRÕES/INSTRUMENTOS UTILIZADOS NA CALIBRAÇÃO	
Interferômetro laser HP 10766A	Data da última verificação: 07/02/16
Sistema de calibração horizontal	Data da última verificação: 07/02/16

VALIDADE DO CERTIFICADO DE SERVIÇO
Válido por 12 meses a contar da data de inspeção.

LOCAL DA INSPEÇÃO E CONDIÇÕES AMBIENTAIS
Laboratório de Instrumentação Geodésica (LAIG) da Universidade Federal do Paraná. Temperatura: 22,4°C ± 0,5°C Umidade do ar: 50,0% Pressão atmosférica: 689,8mmHg

RESULTADOS	
Acurácia do sistema calibrado e incerteza das medidas:	$0,035 \pm 0,003 \text{ mm}; ---$
Equação para correção das leituras:	$h_c^{med} = h^{med} \cdot (1 - \gamma)$ $h^{corr} = h_c^{med} \cdot [1 + 2211 \cdot 10^{-8} + \alpha^{inv} \cdot (t - t^{ref})] - 5746 \cdot 10^{-11}$ <p>Onde: h^{corr} - Leitura corrigida; h_c^{med} - Leitura medida corrigida do fator de compensação; α^{inv} - Coeficiente de expansão termal do invar (12-13 ppm/°C); t - Temperatura no momento do levantamento em campo; t^{ref} - Temperatura de referência utilizada durante a calibração do sistema de nivelamento digital; γ - Constante adotada como fator de compensação ($\gamma = 0,028$)</p>

Os resultados apresentados neste documento aplicam-se somente aos itens calibrados.

Curitiba, 30 de Março de 2017.

Responsável
Eng.^a Cartógrafa Alyne R. S. Gemin

¹GEMIN, A. R. S. **Desenvolvimento de um sistema de calibração horizontal para sistemas de nivelamento digitais**. 139 f. Tese (Tese em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N° 2

DADOS DO SISTEMA DE NIVELAMENTO DIGITAL	
Instrumento: Nível Digital Leica DNA03 (n° de série: 333660) e mira de ínvar GPCL2 gravada em código de barras com 2 m de comprimento (n° de série: 30211).	
Data da inspeção: 27/03/2017	

CLIENTE	
Universidade Federal do Paraná Av. Coronel Francisco Heráclito dos Santos, n° 210, Jardim das Américas – Curitiba – PR.	

PROCEDIMENTO	
Calibração do sistema de nivelamento digital conforme procedimento apresentado por Gemin (2017) ¹ .	

PADROES/INSTRUMENTOS UTILIZADOS NA CALIBRAÇÃO	
Interferômetro laser HP 10766A	Data da última verificação: 07/02/16
Sistema de calibração horizontal	Data da última verificação: 07/02/16

VALIDADE DO CERTIFICADO DE SERVIÇO	
Válido por 12 meses a contar da data de inspeção.	

LOCAL DA INSPEÇÃO E CONDIÇÕES AMBIENTAIS	
Laboratório de Instrumentação Geodésica (LAIG) da Universidade Federal do Paraná. Temperatura: 23,1°C ± 0,5°C Umidade do ar: 51,5% Pressão atmosférica: 689,3 mmHg	

RESULTADOS	
Acurácia do sistema calibrado e incerteza das medidas:	$0,035 \pm 0,004 \text{ mm}; ---$
Equação para correção das leituras:	$h_c^{med} = h^{med} \cdot (1 - \gamma)$ $h^{corr} = h_c^{med} \cdot [1 + 2888 \cdot 10^{-8} + \alpha^{inv} \cdot (t - t^{ref})] - 4832 \cdot 10^{-11}$ <p>Onde: h^{corr} - Leitura corrigida; h_c^{med} - Leitura medida corrigida do fator de compensação; α^{inv} - Coeficiente de expansão termal do ínvar (12-13 ppm/°C); t - Temperatura no momento do levantamento em campo; t^{ref} - Temperatura de referência utilizada durante a calibração do sistema de nivelamento digital; γ - Constante adotada como fator de compensação ($\gamma = 0,028$)</p>

Os resultados apresentados neste documento aplicam-se somente aos itens calibrados.

Curitiba, 27 de Março de 2017.

Responsável
Eng.^a Cartógrafa Alyne R. S. Gemin

¹GEMIN, A. R. S. **Desenvolvimento de um sistema de calibração horizontal para sistemas de nivelamento digitais**. 139 f. Tese (Tese em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº 3

DADOS DO SISTEMA DE NIVELAMENTO DIGITAL
Instrumento: Nível Digital FOIF EL302A (nº de série: 30000674) e mira de invar gravada em código de barras com 2 m de comprimento (MIRA1).
Data da inspeção: 04/04/2017

CLIENTE
Universidade Federal do Paraná Av. Coronel Francisco Heráclito dos Santos, nº 210, Jardim das Américas – Curitiba – PR.

PROCEDIMENTO
Calibração do sistema de nivelamento digital conforme procedimento apresentado por Gemin (2017) ¹ .

PADRÕES/INSTRUMENTOS UTILIZADOS NA CALIBRAÇÃO	
Interferômetro laser HP 10766A	Data da última verificação: 07/02/16
Sistema de calibração horizontal	Data da última verificação: 07/02/16

VALIDADE DO CERTIFICADO DE SERVIÇO
Válido por 12 meses a contar da data de inspeção.

LOCAL DA INSPEÇÃO E CONDIÇÕES AMBIENTAIS
Laboratório de Instrumentação Geodésica (LAIG) da Universidade Federal do Paraná. Temperatura: 22,3°C ± 0,5°C Umidade do ar: 50,2% Pressão atmosférica: 689,4 mmHg

RESULTADOS	
Acurácia do sistema calibrado e incerteza das medidas:	$0,030 \pm 0,003 \text{ mm}; ---$
Equação para correção das leituras:	$h_c^{med} = h^{med} \cdot (1 - \gamma)$ $h^{corr} = h_c^{med} \cdot [1 - 2007 \cdot 10^{-8} + \alpha^{inv} \cdot (t - t^{ref})] - 0721 \cdot 10^{-11}$ <p>Onde: h^{corr} - Leitura corrigida; h_c^{med} - Leitura medida corrigida do fator de compensação; α^{inv} - Coeficiente de expansão termal do invar (12-13 ppm/°C); t - Temperatura no momento do levantamento em campo; t^{ref} - Temperatura de referência utilizada durante a calibração do sistema de nivelamento digital; γ - Constante adotada como fator de compensação ($\gamma = 0,028$)</p>

Os resultados apresentados neste documento aplicam-se somente aos itens calibrados.

Curitiba, 04 de Abril de 2017.

Responsável
Eng.^a Cartógrafa Alyne R. S. Gemin

¹GEMIN, A. R. S. **Desenvolvimento de um sistema de calibração horizontal para sistemas de nivelamento digitais.** 139 f. Tese (Tese em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº 4

DADOS DO SISTEMA DE NIVELAMENTO DIGITAL
Instrumento: Nível Digital FOIF EL302A (nº de série: 30000674) e mira de invar gravada em código de barras com 2 m de comprimento (MIRA 2).
Data da inspeção: 02/05/2017

CLIENTE
Universidade Federal do Paraná Av. Coronel Francisco Heráclito dos Santos, nº 210, Jardim das Américas – Curitiba – PR.

PROCEDIMENTO
Calibração do sistema de nivelamento digital conforme procedimento apresentado por Gemin (2017) ¹ .

PADRÕES/INSTRUMENTOS UTILIZADOS NA CALIBRAÇÃO	
Interferômetro laser HP 10766A	Data da última verificação: 07/02/16
Sistema de calibração horizontal	Data da última verificação: 07/02/16

VALIDADE DO CERTIFICADO DE SERVIÇO
Válido por 12 meses a contar da data de inspeção.

LOCAL DA INSPEÇÃO E CONDIÇÕES AMBIENTAIS
Laboratório de Instrumentação Geodésica (LAIG) da Universidade Federal do Paraná. Temperatura: 21,7°C ± 0,5°C Umidade do ar: 46,0% Pressão atmosférica: 689,8 mmHg

RESULTADOS	
Acurácia do sistema calibrado e incerteza das medidas:	$0,037 \pm 0,004 \text{ mm}; ---$
Equação para correção das leituras:	$h_c^{med} = h^{med} \cdot (1 - \gamma)$ $h^{corr} = h_c^{med} \cdot [1 - 4156 \cdot 10^{-8} + \alpha^{inv} \cdot (t - t^{ref})] + 1747 \cdot 10^{-11}$ <p>Onde: h^{corr} - Leitura corrigida; h_c^{med} - Leitura medida corrigida do fator de compensação; α^{inv} - Coeficiente de expansão termal do invar (12-13 ppm/°C); t - Temperatura no momento do levantamento em campo; t^{ref} - Temperatura de referência utilizada durante a calibração do sistema de nivelamento digital; γ - Constante adotada como fator de compensação ($\gamma = 0,028$)</p>

Os resultados apresentados neste documento aplicam-se somente aos itens calibrados.

Curitiba, 02 de Junho de 2017.

Responsável
Eng.^a Cartógrafa Alyne R. S. Gemin

¹GEMIN, A. R. S. **Desenvolvimento de um sistema de calibração horizontal para sistemas de nivelamento digitais.** 139 f. Tese (Tese em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N° 5

DADOS DO SISTEMA DE NIVELAMENTO DIGITAL	
Instrumento: Nível Digital Leica DNA03 (n° de série: 346061) e mira de ínvar GWCL92 gravada em código de barras com 1 m de comprimento (n° de série: 9117).	
Data da inspeção: 03/05/2017	

CLIENTE	
Universidade Federal do Paraná Av. Coronel Francisco Heráclito dos Santos, n° 210, Jardim das Américas – Curitiba – PR.	

PROCEDIMENTO	
Calibração do sistema de nivelamento digital conforme procedimento apresentado por Gemin (2017) ¹ .	

PADROES/INSTRUMENTOS UTILIZADOS NA CALIBRAÇÃO	
Interferômetro laser HP 10766A	Data da última verificação: 07/02/16
Sistema de calibração horizontal	Data da última verificação: 07/02/16

VALIDADE DO CERTIFICADO DE SERVIÇO	
Válido por 12 meses a contar da data de inspeção.	

LOCAL DA INSPEÇÃO E CONDIÇÕES AMBIENTAIS	
Laboratório de Instrumentação Geodésica (LAIG) da Universidade Federal do Paraná. Temperatura: 23,1°C ± 0,5°C Umidade do ar: 51,5% Pressão atmosférica: 689,3 mmHg	

RESULTADOS	
Acurácia do sistema calibrado e incerteza das medidas:	$0,024 \pm 0,004 \text{ mm}; ---$
Equação para correção das leituras:	$h_c^{med} = h^{med} \cdot (1 - \gamma)$ $h^{corr} = h_c^{med} \cdot [1 + 4395 \cdot 10^{-8} + \alpha^{inv} \cdot (t - t^{ref})] + 4341 \cdot 10^{-11}$ <p>Onde: h^{corr} - Leitura corrigida; h_c^{med} - Leitura medida corrigida do fator de compensação; α^{inv} - Coeficiente de expansão termal do ínvar (12-13 ppm/°C); t - Temperatura no momento do levantamento em campo; t^{ref} - Temperatura de referência utilizada durante a calibração do sistema de nivelamento digital; γ - Constante adotada como fator de compensação ($\gamma = 0,028$)</p>

Os resultados apresentados neste documento aplicam-se somente aos itens calibrados.

Curitiba, 03 de Maio de 2017.

Responsável
Eng.^a Cartógrafa Alyne R. S. Gemin

¹GEMIN, A. R. S. **Desenvolvimento de um sistema de calibração horizontal para sistemas de nivelamento digitais**. 139 f. Tese (Tese em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº 6

DADOS DO SISTEMA DE NIVELAMENTO DIGITAL
Instrumento: Nível Digital Leica DNA03 (nº de série: 333660) e mira de ínvar GPCL3 gravada em código de barras com 3 m de comprimento (nº de série: 37968).
Data da inspeção: 19/09/2017

CLIENTE
Universidade Federal do Paraná Av. Coronel Francisco Heráclito dos Santos, nº 210, Jardim das Américas – Curitiba – PR.

PROCEDIMENTO
Calibração do sistema de nivelamento digital conforme procedimento apresentado por Gemin (2017) ¹ .

PADRÕES/INSTRUMENTOS UTILIZADOS NA CALIBRAÇÃO	
Interferômetro laser HP 10766A	Data da última verificação: 07/02/16
Sistema de calibração horizontal	Data da última verificação: 07/02/16

VALIDADE DO CERTIFICADO DE SERVIÇO
Válido por 12 meses a contar da data de inspeção.

LOCAL DA INSPEÇÃO E CONDIÇÕES AMBIENTAIS
Laboratório de Instrumentação Geodésica (LAIG) da Universidade Federal do Paraná. Temperatura: 24,1°C ± 0,5°C Umidade do ar: 42,0% Pressão atmosférica: 692,3 mmHg

RESULTADOS	
Acurácia do sistema calibrado e incerteza das medidas:	$0,024 \pm 0,002 \text{ mm}; \text{---}$
Equação para correção das leituras:	$h_c^{med} = h^{med} \cdot (1 - \gamma)$ $h^{corr} = h_c^{med} \cdot [1 + 0013 \cdot 10^{-8} + \alpha^{inv} \cdot (t - t^{ref})] + 2903 \cdot 10^{-11}$ <p>Onde: h^{corr} - Leitura corrigida; h_c^{med} - Leitura medida corrigida do fator de compensação; α^{inv} - Coeficiente de expansão termal do ínvar (12-13 ppm/°C); t - Temperatura no momento do levantamento em campo; t^{ref} - Temperatura de referência utilizada durante a calibração do sistema de nivelamento digital; γ - Constante adotada como fator de compensação ($\gamma = 0,028$)</p>

Os resultados apresentados neste documento aplicam-se somente aos itens calibrados.

Curitiba, 19 de Setembro de 2017.

Responsável
Eng.^a Cartógrafa Alyne R. S. Gemin

¹GEMIN, A. R. S. **Desenvolvimento de um sistema de calibração horizontal para sistemas de nivelamento digitais**. 139 f. Tese (Tese em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N° 7

DADOS DO SISTEMA DE NIVELAMENTO DIGITAL	
Instrumento: Nível Digital Leica DNA03 (n° de série: 333660) e mira de ínvar GPCL3 gravada em código de barras com 3 m de comprimento (n° de série: 37974).	
Data da inspeção: 21/09/2017	

CLIENTE	
Universidade Federal do Paraná Av. Coronel Francisco Heráclito dos Santos, n° 210, Jardim das Américas – Curitiba – PR.	

PROCEDIMENTO	
Calibração do sistema de nivelamento digital conforme procedimento apresentado por Gemin (2017) ¹ .	

PADROES/INSTRUMENTOS UTILIZADOS NA CALIBRAÇÃO	
Interferômetro laser HP 10766A	Data da última verificação: 07/02/16
Sistema de calibração horizontal	Data da última verificação: 07/02/16

VALIDADE DO CERTIFICADO DE SERVIÇO	
Válido por 12 meses a contar da data de inspeção.	

LOCAL DA INSPEÇÃO E CONDIÇÕES AMBIENTAIS	
Laboratório de Instrumentação Geodésica (LAIG) da Universidade Federal do Paraná. Temperatura: 22,2°C ± 0,5°C Umidade do ar: 45,5% Pressão atmosférica: 687,7 mmHg	

RESULTADOS	
Acurácia do sistema calibrado e incerteza das medidas:	$0,024 \pm 0,002 \text{ mm}; ---$
Equação para correção das leituras:	$h_c^{med} = h^{med} \cdot (1 - \gamma)$ $h^{corr} = h_c^{med} \cdot [1 + 0414 \cdot 10^{-8} + \alpha^{inv} \cdot (t - t^{ref})] + 1241 \cdot 10^{-11}$ <p>Onde: h^{corr} - Leitura corrigida; h_c^{med} - Leitura medida corrigida do fator de compensação; α^{inv} - Coeficiente de expansão termal do ínvar (12-13 ppm/°C); t - Temperatura no momento do levantamento em campo; t^{ref} - Temperatura de referência utilizada durante a calibração do sistema de nivelamento digital; γ - Constante adotada como fator de compensação ($\gamma = 0,028$)</p>

Os resultados apresentados neste documento aplicam-se somente aos itens calibrados.

Curitiba, 21 de Setembro de 2017.

Responsável
Eng.^a Cartógrafa Alyne R. S. Gemin

¹GEMIN, A. R. S. **Desenvolvimento de um sistema de calibração horizontal para sistemas de nivelamento digitais**. 139 f. Tese (Tese em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2017.