IURI MORAES BJORKSTROM

**Fundamentos da medição absoluta da aceleração de gravidade:
contribuição ao estabelecimento de referências na América Latina**

São Paulo
2021

IURI MORAES BJORKSTROM

**Fundamentos da medição absoluta da aceleração de gravidade:
contribuição ao estabelecimento de referências na América Latina**

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para a obtenção do título de
mestre em ciências.

Área de concentração: Engenharia de Transportes

Orientador: prof. dr. Denizar Blitzkow

São Paulo
2021

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.
São Paulo, 24 de maio de 2021

Iuri Moraes Bjorkstrom

Prof. Dr. Denizar Blotzkow

Catálogo na publicação

Bjorkstrom, Iuri Moraes

Fundamentos da medição absoluta da aceleração de gravidade: contribuição ao estabelecimento de referências na América Latina / I. M. Bjorkstrom – São Paulo, 2021.
100 p.

Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1. Geodésia física 2. Gravimetria 3. Medições absolutas I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II. t.

BJORKSTROM, I. M. Fundamentos da medição absoluta da aceleração de gravidade: contribuição ao estabelecimento de referências na América Latina. 2021. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2021.

Aprovado em: 25/03/2021

Banca examinadora

Prof. dr.: Denizar Blitzkow

Instituição: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Julgamento: Aprovado

Dr.: Carlos Alberto Corrêa e Castro Júnior

Instituição: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE

Julgamento: Aprovado

Dr.: Eduardo Andrés Lauría

Instituição: Instituto Geográfico Nacional de Argentina - IGN

Julgamento: Aprovado

Dedico esta dissertação a meu irmão Ivar (*in memoriam*) e à minha filha Rita, que acabou de chegar a este mundo. Que Deus os abençoe.

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Adriana, pelo incentivo, apoio, amor e companheirismo.

Ao meu pai Lars e à minha mãe Elizabeth, pelo encorajamento e suporte para minha caminhada em busca do conhecimento científico.

Ao meu orientador, professor Denizar Blitzkow, pela ótima acolhida quando bati à sua porta e pela forte amizade desenvolvida em anos de convivência. A oportunidade de trabalhar com a gravimetria e operar o A10 me proporcionou experiências únicas na vida.

À Ana Cristina Oliveira Cancoro de Matos, pela atenção, orientação, instrução e amizade.

Aos professores do Laboratório de Topografia e Geodesia (LTG), do Departamento de Engenharia de Transportes (PTR) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), pelo acolhimento e estímulo à pesquisa.

Ao Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo (IGC), pela possibilidade de operação e realização de campanhas com o gravímetro absoluto A10 de sua propriedade.

Ao Centro de Estudos de Geodesia (CENEGEO), pela infraestrutura, pela logística e pelo investimento realizado para que as referências de gravimetria absoluta pudessem ser materializadas com êxito.

Ao Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (IGVSB), que, mesmo em tempos difíceis, viabilizou recursos para a realização da campanha. Um especial abraço para o professor José Napoleón Hernández e para a equipe de campo.

Ao Instituto Geográfico Militar (IGM), no Equador, pela dedicação e pelo trabalho em equipe, em particular ao Fredy Flores, pelo acolhimento e pela amizade.

À Universidad de Costa Rica (UCR), pelo profissionalismo e pela preparação das estações, especialmente ao professor Juan Antonio Picado Salvatierra e aos participantes da campanha.

Ao Instituto Geográfico Nacional (IGN), na Argentina, em especial ao professor Eduardo Andrés Lauría, pelos comentários e pelas correções apontados em minha qualificação.

À equipe da fabricante Micro-g LaCoste, pelo apoio técnico, pela dedicação e pela paciência, particularmente a Fred Klopping, Brice Lucero e Brian Ellis, pelo acolhimento durante as visitas e pela amizade ao longo dos anos.

Aos colegas de trabalho e pesquisa, Ariele Battisti, Carlos Alberto Monteiro de Almeida, Hélio Lopes Guerra Neto e Valéria Silva, pela amizade que espero manter por muito tempo.

A Carlos Alberto Corrêa e Castro Junior, pelo incentivo à realização deste trabalho, pelo ensinamento e pela experiência compartilhados durante os trabalhos de campo realizados.

“A gravidade é a força física mais fraca do Universo, sendo 10^{40} vezes mais fraca que as forças eletrostáticas. Medir essa grandeza não é uma tarefa fácil.” (NIEBAUER, 2015, tradução nossa)

RESUMO

BJORKSTROM, I. M. **Fundamentos da medição absoluta da aceleração de gravidade:** contribuição ao estabelecimento de referências na América Latina. 2020. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2020.

Nos últimos anos, vem ocorrendo um grande esforço da comunidade científica para estabelecer um sistema internacional de altitudes denominado International Height Reference System (IHRS). Diferentemente dos sistemas tradicionais de referência altimétrica, baseados em altitudes niveladas a partir de uma origem (geralmente um marégrafo com longo período de observação), a materialização desse referencial internacional, chamado International Height Reference Frame (IHRF), contempla o caráter físico das altitudes e sua realização está relacionada com o campo de gravidade da Terra. Para este último, também se tornou necessária a convenção de um sistema internacional de referência chamado International Gravity Reference System (IGRS). Nesse contexto de modernização dos sistemas de altitudes, a gravimetria passou a desempenhar um papel fundamental. Definições e estratégias metrológicas para a observação e a validação de dados vêm sendo discutidas no processo de materialização desse novo sistema de referência denominado International Gravity Reference Frame (IGRF). Estabelecendo um diálogo entre a metrologia e a Geodesia, esta dissertação busca abordar práticas, técnicas e conceitos relacionados às medições absolutas da aceleração de gravidade. Busca também reunir e compartilhar toda a experiência adquirida em medições realizadas com o gravímetro absoluto A10 em cinco países da América Latina, incluindo o Brasil.

Palavras-chave: Geodésia física. Gravimetria. Medições absolutas.

ABSTRACT

BJORKSTROM, I. M. **Fundamentos da medição absoluta da aceleração de gravidade:** contribuição ao estabelecimento de referências na América Latina. 2020. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2020.

In recent years, there has been a great effort by the scientific community to establish an international altitude system called International Height Reference System (IHRs). Unlike traditional altimetric reference systems, based on leveled altitudes from an origin (usually a tide gauge with a long observation period), the materialization of this international reference called International Height Reference Frame (IHRF) contemplates the physical character of the altitudes and its realization is related to the Earth's gravity field. For the latter, the convention of an international reference system called International Gravity Reference System (IGRS) also became necessary. In this context of modernization of altitude systems, gravimetry started playing a fundamental role. Metrological definitions and strategies for data observation and validation have been discussed in the process of materializing this new reference system called International Gravity Reference Frame (IGRF). Establishing a dialogue between metrology and geodesy, this dissertation seeks to address practices, techniques, and concepts related to absolute measurements of gravity acceleration. It also seeks to gather and share all the experience acquired in measurements made with the absolute gravimeter A10 in five countries in Latin America, including Brazil.

Keywords: Physical geodesy. Gravimetry. Absolute measurements.

LISTA DE SIGLAS

AC	<i>Alternating current</i>
BGI	Bureau Gravimétrique International
BIPM	Bureau International des Poids et Mesures
CCM	Consultative Committee for Mass and Related Quantities
CENEGEO	Centro de Estudos de Geodesia
CEP	Celestial Ephemeris Pole
CICMA	Centro de Capacitação
DC	<i>Direct current</i>
DORIS	Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite
EOP	Earth Orientation Parameters
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
GGOS	Global Geodetic Observing System
GNSS	Global Navigation Satellite System
IAG	International Association of Geodesy
IAU	International Astronomical Union
ICGEM	International Center for Global Earth Models
ICRS	International Celestial Reference System
ICRF	International Celestial Reference Frame
IERS	International Earth Rotation and Reference Systems Service
IGC	Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo
IGN	Instituto Geográfico Nacional
IGM	Instituto Geográfico Militar
IGFS	International Gravity Field Service
IGRS	International Gravity Reference System
IGRF	International Gravity Reference Frame
IGS	International GNSS Service
IGSN-71	International Gravity Standardization Net 1971
IGVSB	Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar
IHRF	International Height Reference Frame
IHRS	International Height Reference System
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IRM	International Reference Meridian

IRP	International Reference Pole
ISG	International Service for the Geoid
ITRS	International Terrestrial Reference System
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
IUGG	International Union of Geodesy and Geophysics
JCGM	Joint Committee for Guides in Metrology
JILA	Joint Institute for Laboratory Astrophysics
LEO	Low Earth Orbit
LLR	Lunar Laser Ranging
LTG	Laboratório de Topografia e Geodesia
MI	Módulo de Interferometria
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
MQL	Módulo de Queda Livre
ON	Observatório Nacional
PTR	Departamento de Engenharia de Transportes
RENEGA	Rede Nacional de Estações Gravimétricas Absolutas
SEPIN	Serviço de Produtos de Informação
SGR	Sistema Geodésico de Referência
SI	Sistema Internacional de Unidades
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SLR	Satellite Laser Ranging
SS	<i>Superspring</i>
TIA	Time Interval Analyzer
TTL	Transistor-Transistor Logic
UCR	Universidad de Costa Rica
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
USP	Universidade de São Paulo
UTC	Tempo universal coordenado
VLBI	Very Long Baseline Interferometry
WGG	Working Group on Gravimetry

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	16
2.1 REFERÊNCIAS EM METROLOGIA E GEODESIA.....	16
2.2 CAMPO DE GRAVIDADE	20
2.3 PERTURBAÇÕES DO CAMPO DE GRAVIDADE	23
2.3.1 Marés terrestres	24
2.3.2 Movimento polar.....	25
2.3.3 Atmosfera	26
2.3.4 Carga hidrológica.....	27
2.3.5 Fenômenos geológicos	27
2.4 GRADIENTE	28
3 GRAVIMETRIA.....	29
3.1 BREVE HISTÓRICO	29
3.2 INSTRUMENTAÇÃO	31
3.3 MEDIÇÃO DA ACELERAÇÃO DE GRAVIDADE.....	37
3.3.1 Precisão, repetibilidade e acurácia	37
3.3.2 Ajustamento das observações	39
3.4 REDES E REFERÊNCIAS GRAVIMÉTRICAS.....	40
4 MEDIÇÕES ABSOLUTAS	42
4.1 GRAVÍMETRO A10.....	42
4.1.1 Módulo de Interferometria.....	43
4.1.2 <i>Laser</i>	43
4.1.3 Supermola.....	44
4.1.4 Módulo de Queda Livre.....	45
4.1.5 Central de controle	46
4.2 ACONDICIONAMENTO	47
4.3 TRANSPORTE E LOCAL DE MEDIÇÃO	48
4.4 MONTAGEM	50
4.5 PROCESSAMENTO DAS OBSERVAÇÕES	53
4.5.1 Leitura e cálculo do valor de aceleração	53
4.5.2 Redução ao solo	56
5 CAMPANHAS NA AMÉRICA LATINA.....	58
5.1 MEDIÇÕES NO BRASIL	58

5.2 MEDIÇÕES NA COSTA RICA	61
5.3 MEDIÇÕES NO EQUADOR	64
5.4 MEDIÇÕES NA VENEZUELA	67
5.5 MEDIÇÕES NA ARGENTINA	71
6 CONCLUSÃO	75
REFERÊNCIAS	78
APÊNDICE A – A10: INSTRUÇÕES E PROCEDIMENTOS DE APOIO	84

1 INTRODUÇÃO

Inúmeras modalidades de medições estão presentes em quase todas as atividades humanas. A evolução tecnológica vivenciada por diversas sociedades, a partir da segunda metade do século XX, revolucionou a maneira pela qual o ser humano apreende e se relaciona com o mundo a seu redor. Visando solucionar questões que lhes são pertinentes, cada ramo da ciência buscou desenvolver os meios necessários para qualificar e quantificar os fenômenos que compreendem seu objeto de estudo (SILVA, 2010).

A Geodesia, que estuda a forma, a dimensão e o campo de gravidade da Terra, veio se beneficiando enormemente desse grande avanço tecnológico, utilizando equipamentos e técnicas de medição cada vez mais sofisticadas.

Nos últimos anos, vem ocorrendo um grande esforço da comunidade científica para o estabelecimento de um sistema internacional de altitudes denominado International Height Reference System (IHRs). Definido pela resolução n. 1 da International Association of Geodesy (IAG), durante a assembleia-geral da International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG), em Praga, no ano de 2015, o IHRs deve ser materializado pelo International Height Reference Frame (IHRF). Durante a mesma assembleia-geral, a resolução n. 2 coloca que também deve ser estabelecido um sistema global de referência de gravidade absoluta, mais tarde denominado International Gravity Reference System (IGRS), a ser realizado pelo International Gravity Reference Frame (IGRF) (DREWES *et al.*, 2016).

Nesse contexto de modernização dos sistemas de altitudes, a gravimetria passou a ter um papel fundamental na materialização de referências terrestres. Referências primárias absolutas são estabelecidas servindo como marco para as densificações, para as linhas de calibração e para o ajustamento de redes gravimétricas já existentes.

Em permanente busca por medições mais consistentes, modernos gravímetros têm atingido resultados cada vez mais precisos, alcançando a resolução de leitura de até 1 ppb da aceleração do campo de gravidade terrestre (FORSBERG; SIDERIS; SHUM, 2005). Nessas medições, um largo espectro de ruídos se sobrepõe à grandeza medida, sendo fundamental um conhecimento sólido sobre os inúmeros pormenores envolvidos.

Depois da realização de campanhas gravimétricas na Venezuela, na Argentina, no Equador, na Costa Rica e no Brasil, experiências foram auferidas acerca do funcionamento, da manutenção e da operação do gravímetro absoluto A10, fabricado pela empresa norte-americana Micro-g LaCoste.

Adquirido pelo Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo (IGC) em 2013, o A10 n. 32 é operado, desde então, em parceria entre a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) e o Centro de Estudos de Geodesia (CENEGEO).

Considerando as estratégias metrológicas associadas à resolução n. 2 da IAG, esta dissertação pretende fornecer um arcabouço conceitual e técnico acerca das medições absolutas da aceleração de gravidade, de modo a contribuir com a materialização do IGRF. O conteúdo está organizado em seis capítulos, incluindo, no primeiro deles, uma introdução do leitor ao tema.

No segundo capítulo, é apresentada uma introdução aos referenciais geodésicos e metrológicos, bem como suas instituições reguladoras. Na sequência, são introduzidos alguns conceitos a respeito de campo de gravidade e fenômenos perturbadores associados, como as marés terrestres, os efeitos da atmosfera, entre outros. Por fim, discorre-se sobre a variação da aceleração de gravidade sobre a superfície terrestre e o gradiente vertical.

O terceiro capítulo trata da temática ligada à gravimetria, com a elencação de suas aplicações, seguida de um breve histórico. Uma parte desse capítulo é dedicada à instrumentação, sendo apresentada uma variedade de equipamentos destinados à medição da aceleração. Outra parte está relacionada às questões metrológicas, sendo discutidos alguns conceitos pertinentes. O capítulo é finalizado com uma breve abordagem sobre as redes gravimétricas.

No quarto capítulo, são apresentados os princípios e procedimentos da medição absoluta da aceleração de gravidade. Utilizando o gravímetro absoluto A10 como exemplo, o capítulo busca descrever seus principais componentes bem como seu funcionamento. Trata também de questões ligadas à logística e à montagem do equipamento. Por fim, uma visão mais detalhada do processamento de dados é apresentada.

O quinto capítulo traz os relatos e resultados das campanhas realizadas na América Latina, especificamente no Brasil, no Equador, na Venezuela, na Costa Rica e na Argentina. Nele são apresentados os resultados das medições e um mapa de localização das estações. São abordadas ainda as principais dificuldades enfrentadas e algumas peculiaridades locais.

O sexto e último capítulo descreve as estratégias metrológicas utilizadas pelas instituições científicas responsáveis para a validação de uma medição absoluta de gravidade. Nesse capítulo, são apresentados também os resultados das calibrações efetuadas no gravímetro durante o tempo em que foi utilizado.

O apêndice compõe-se de um manual de procedimentos, verificações e regulagens referentes ao gravímetro A10. É resultado de uma combinação de informações recolhidas ao

longo dos mais de seis anos de operação, incluindo duas visitas técnicas à fábrica onde o aparelho é produzido nos Estados Unidos, enriquecendo as instruções que integram o manual de operação fornecido pela fabricante.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 REFERÊNCIAS EM METROLOGIA E GEODESIA

Há muito tempo o ser humano vem realizando medições sobre grandezas do mundo a seu redor. Segundo Silva (2010), grandeza é o atributo de um fenômeno, de um corpo ou de uma substância que pode ser qualitativamente distinguido e quantitativamente determinado. A medição ou o ato de medir é a ação de avaliar uma grandeza comparando-a com outra da mesma espécie. Exemplos mais comuns de grandezas mensuráveis são: distância, temperatura, tempo e massa (SILVA, 2010).

Para comparar uma grandeza com outra, é necessário estabelecer uma referência. Uma unidade de medida é um conceito abstrato usado para expressar o valor unitário de determinada grandeza. É empregada para definir, realizar, conservar ou reproduzir medições. A medida é o valor numérico do resultado da comparação entre uma grandeza a ser avaliada e uma grandeza de referência. Normalmente, o valor de uma medida é expresso como o produto de um número seguido de sua unidade correspondente (JCGM, 2012).

À ciência que agrupa os conhecimentos sobre a arte de medir e de interpretar as medições realizadas dá-se o nome de metrologia. A definição absoluta de padrões internacionais de medidas e medições constitui um de seus objetos de estudo. A definição de metro, por exemplo, já passou por diversas modificações conceituais desde seu surgimento. Inicialmente, 1 m foi estabelecido como 1/10.000.000 do comprimento de um arco de meridiano medido da linha do equador ao polo (de 0° a 90° em latitude). Atualmente, o metro é definido pelo comprimento percorrido por um feixe de luz no vácuo durante um intervalo de tempo de 1/299.792.458 s. O intervalo de 1 s, por sua vez, é definido pelo tempo de duração de 9.192.631.770 oscilações da radiação correspondente à transição entre os dois níveis hiperfinos do estado fundamental do átomo de Césio -133 (INMETRO; CICMA; SEPIN, 2012).

Criado pela Convenção do Metro, assinada em Paris no ano de 1875, o Bureau International des Poids et Mésures (BIPM) é a atual instituição responsável por assegurar a padronização e a unificação mundial das medições. Com a missão de estabelecer os padrões fundamentais e as escalas para a medição das principais grandezas físicas conhecidas, o BIPM também é responsável por assegurar a coordenação das técnicas correspondentes de medição. Atualmente, é composto de dez comitês consultivos específicos, destinados a esclarecer as questões submetidas para estudo e para aconselhamento. Um desses comitês, denominado

Consultative Committee for Mass and Related Quantities (CCM), possui um grupo de trabalho dedicado exclusivamente às medições gravimétricas, que se chama Working Group on Gravimetry (WGG). Entre suas atividades, tem a missão geral de assegurar as boas práticas metrológicas na medição da aceleração de gravidade. No Brasil, cabe ao Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), autarquia federal, zelar pela aplicação das convenções internacionais de pesos e medidas no território brasileiro (INMETRO; CICMA; SEPIN, 2012).

Conforme se expandiam as relações comerciais, políticas e científicas entre os países, especialmente durante a segunda metade do século XX, tornava-se fundamental a adoção de um sistema bem definido de unidades bem definido que garantisse a equidade das relações de troca e o suporte dimensional para as ciências e a tecnologia (SILVA, 2010).

Nesse contexto de necessidade de padronização de pesos e medidas, foi publicada a primeira edição do Sistema Internacional de Unidades (SI), pelo BIPM, no ano de 1971. A organização e a preconização de sua utilização visavam integrar e homogeneizar o entendimento comum e assegurar a acreditação de um sistema universal (ROZENBERG, 2006).

A unidade de medida mais comumente utilizada pela gravimetria é o Gal, em homenagem ao cientista de Pisa, Galileu Galilei (1564-1642 d.C.). Por definição, 1 Gal equivale a 1 cm/s^2 . Nesse sistema de unidade, a aceleração de gravidade aproximada de $9,8 \text{ m/s}^2$ seria equivalente a 980 Gal (NIEBAUER, 2015). A tabela 1 apresenta algumas unidades submétricas do SI em comparação ao Gal e suas subunidades.

Tabela 1 – Unidades de aceleração

10^1	10^{-2}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-8}	10^{-9}
$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	$\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$ (Gal)	mGal	$\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	μGal	$\text{nm}\cdot\text{s}^{-2}$
9,852567413	985,2567413	985.256,7413	9.852.567,413	985.256.741,3	9.852.567.413

Fonte: Autor (2020).

A Geodesia teve muito de sua história associada à metrologia. Tendo como principal objeto de estudo a mensuração da forma da Terra, de seu campo de gravidade e do posicionamento de pontos sobre sua superfície, a Geodesia trata, entre outros assuntos, de efetuar medições. Desde sua concepção como ciência moderna, Friedrich Robert Helmert (1843-1917) define a Geodesia como a ciência da medição e do mapeamento da superfície terrestre (TORGE, 2001).

Diversas instituições estão envolvidas na produção do conhecimento científico, de modo a garantir a qualidade técnica de métodos e de procedimentos, a padronização de medidas e a

universalidade dos dados, por meio da publicação de diretrizes e normativas internacionais. Entre as mais antigas associações científicas, está a International Association of Geodesy (IAG), fundada em 1862. Suas atividades têm acompanhado os avanços da Geodesia com o passar do tempo e, atualmente, promove a cooperação científica e coordena uma série de grupos, serviços e comitês (TORGE, 2005).

Entre os serviços coordenados pela IAG, um em especial é responsável pela definição, pela materialização e pela manutenção dos sistemas de referência celeste e terrestre. Criado em 1987, o International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) tem a tarefa de determinar os parâmetros de orientação da Terra no espaço e também de organizar as atividades operacionais entre suas instituições participantes (IERS, 2015).

Considerando a necessidade de padronização e de estabelecimento de um sistema global de coordenadas para o posicionamento de um ponto sobre a superfície do planeta, dois sistemas de referência foram criados: o celeste e o terrestre (BLITZKOW *et al.*, 2011).

O International Celestial Reference System (ICRS) tem origem no baricentro do sistema solar. O eixo OX é orientado na direção do equinócio vernal para a época J2000; o eixo OZ é orientado na direção do polo celeste de referência também para a época J2000; e o eixo OY tem sua direção a 90° de OX, no sentido dextrogiro. Sua realização é dada pelo International Celestial Reference Frame (ICRF), por meio de um catálogo de coordenadas uranográficas de objetos extragalácticos. Essas coordenadas são obtidas por antenas do tipo Very Long Baseline Interferometry (VLBI), que realizam a interferometria das ondas de rádio emitidas por um quasar (do inglês, *quasi-stellar radio source*). Em razão da enorme distância que separa o observador e os quasares, estes são considerados fixos no espaço, pois o movimento próprio não é perceptível. Por causa dessa distância colossal – de 12 a 13 bilhões de anos-luz –, os quasares não apresentam paralaxe quando observados da superfície terrestre ou do baricentro do sistema solar (PETIT; LUZUM, 2010).

O International Terrestrial Reference System (ITRS) é um sistema geocêntrico e fixo na Terra. O eixo OX é orientado para o International Reference Meridian (IRM); o eixo OZ é orientado para o International Reference Pole (IRP); e o eixo OY é orientado a 90° de OX, no sentido dextrogiro. Esse sistema de referência é materializado pelo International Terrestrial Reference Frame (ITRF), que consiste em um catálogo de coordenadas e velocidades de uma série de estações do Global Navigation Satellite System (GNSS) para determinada época, publicadas periodicamente. Um exemplo de rede de estações de referência é o denominado International GNSS Service (IGS) (HOFMANN-WELLENHOF, 2008). Outro exemplo de

densificação do ITRF no continente americano é a rede do Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS).

A vinculação entre o sistema celeste (ICRS) e o sistema terrestre (ITRS) é feita por intermédio dos parâmetros de orientação da Terra no espaço. Estes descrevem a orientação do referencial terrestre, em função do tempo, em relação ao referencial celeste. Com esse referencial fixo no espaço, constatou-se a existência de quatro principais movimentos do eixo de rotação da Terra: a precessão; a nutação; o movimento do polo; e a deriva para. Esses parâmetros são definidos e monitorados pelo IERS e estão baseados em resoluções aprovadas pelas entidades internacionais como a IAG, a International Astronomical Union (IAU) e a International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) (BLITZKOW *et al.*, 2011).

A partir do ano de 2003, buscando agregar funções relacionadas ao monitoramento do planeta Terra e subsidiar a infraestrutura geodésica necessária para tal, a IAG criou uma plataforma de observação denominada Global Geodetic Observing System (GGOS). De maneira geral, o GGOS possui quatro principais áreas de atuação: o estabelecimento do International Height Reference Frame (IHRF); as pesquisas espaciais; o monitoramento do nível médio do mar; e o monitoramento de desastres naturais. Dentre os produtos oferecidos à comunidade científica, destacam-se os sistemas cartesianos de referência (ITRF e ICRF), as observáveis redes GNSS, os mapas ionosféricos e os parâmetros de rotação da Terra (FORSBERG *et al.*, 2005).

A figura 1 apresenta um desenho esquemático das principais estruturas de observação do sistema Terra. Nela é possível observar, além das redes GNSS e estações VLBI, técnicas de monitoramento de distância como o Satellite Laser Ranging (SLR) e o Lunar Laser Ranging (LLR). Na mesma figura, podem ser identificadas, além dos satélites dedicados ao estudo da altimetria, constelações de órbita baixa, denominadas Low Earth Orbit (LEO), utilizadas, entre outras aplicações, no estudo do campo gravitacional. Outro sistema de monitoramento, denominado Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite (DORIS), é dedicado ao controle orbital, às modelagens atmosférica e ionosférica, entre outros fenômenos geofísicos.

Figura 1 – GGOS: infraestrutura geodésica de observação.

Fonte: GGOS ([2020]).

Buscando promover produtos que satisfaçam às demandas do GGOS, a IAG também mantém um serviço denominado International Gravity Field Service (IGFS) que tem como objetivo coordenar a coleta, disseminar dados, promover cursos, produzir informações e materiais relacionados ao campo de gravidade terrestre. Para alcançar tal feito, o IGFS reúne instituições e serviços espalhados por diferentes partes do globo. Entre elas, podem-se citar o Bureau Gravimétrique International (BGI), o International Service for the Geoid (ISG) e o International Center for Global Earth Models (ICGEM) (IGFS, [2020]).

A proposta do IHRS, que está sendo materializada pelo International Height Reference Frame (IHRF), visa adotar e padronizar um sistema global de altitudes. Diferentemente dos sistemas tradicionais de referência altimétrica, baseados em altitudes niveladas a partir de uma origem – normalmente um marégrafo com longo período de observação –, a materialização do IHRF contempla o caráter físico das altitudes e sua realização está relacionada com o campo de gravidade terrestre (SÁNCHEZ; SIDERIS, 2017).

2.2 CAMPO DE GRAVIDADE

O estudo dos campos gravitacional e de gravidade da Terra vem atraindo a atenção de cientistas por muitas razões. Como resposta à influência da distribuição de massa no interior da crosta, a aceleração de gravidade ajuda a entender a estrutura interna do planeta e sua dinâmica. Para a Geodesia, o estudo do campo de gravidade é de fundamental importância para estabelecer altitudes com sentido físico. Não obstante, o campo gravitacional da Terra controla a órbita dos satélites e seu entendimento é fundamental para melhorar a predição de suas trajetórias (TORGE, 2001).

Todo corpo possui um campo gravitacional e a Terra segue o mesmo princípio. Porém, por causa da força centrífuga produzida pela rotação de seu corpo, o que sensibiliza os elementos sobre sua superfície é o campo de gravidade. Já os satélites, livres da ação da força centrífuga, estão sujeitos somente aos campos gravitacionais dos corpos celestes, inclusive o da Terra (JEKELI, 2015).

No ano de 1687, Isaac Newton (1643-1727) publicou sua obra *Philosophiae naturalis principia mathematica*, na qual apresentou, entre uma série de enunciados científicos, a Lei da Gravitação Universal. Duas partículas se atraem mutuamente com uma força proporcional ao produto de suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância que as separa, resultando em:

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{l^2} \quad (1)$$

Na expressão 1, G é a constante universal da gravitação e equivale a $6,6742 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ no Sistema Internacional de Unidades (SI).

Em um sistema cartesiano, o potencial gravitacional da Terra pode ser expresso em um ponto P pela expressão a seguir (HOFMANN-WELLENHOF; MORITZ, 2006):

$$V(P) = V(x, y, z) = G \iiint \frac{Q}{l} dv \quad (2)$$

Na expressão 2, P é um ponto de coordenadas (x, y, z) , G é a constante universal da gravitação, dv é um elemento de volume, Q é a densidade de massa do volume v e l é a distância entre o ponto P e o centro do elemento de volume dv .

Essa integral deve ser estendida sobre todo o corpo terrestre, que inclui as partes sólida, líquida e gasosa. No entanto, essa expressão possui somente um sentido teórico, já que sua realização prática requer o conhecimento detalhado sobre a distribuição de densidades no interior do planeta, até então desconhecido.

O potencial de gravidade (W) é a soma dos potenciais gravitacional (V) e centrífugo (V_c), este último causado pelo movimento de rotação da Terra.

$$V_c = \frac{1}{2} \omega^2 (x^2 + y^2) \quad (3)$$

Na expressão 3, ω é a velocidade angular de rotação da Terra. Somando-se as expressões 2 e 3, tem-se então:

$$W = (x, y, z) = V(x, y, z) + \frac{1}{2} \omega^2 (x^2 + y^2) \quad (4)$$

Resultante da força gravitacional (V) e da força centrífuga (V_c), o vetor gravidade (g) é o gradiente do potencial de gravidade, sendo as componentes do vetor as derivadas parciais de W em relação a x , y e z .

$$\mathbf{g} = \text{grad } W = \begin{vmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \end{vmatrix} \quad (5)$$

A magnitude de $\mathbf{g}$ é uma grandeza de extrema importância para a Geodesia, pois é a quantidade que mais facilmente se consegue observar sobre o campo de gravidade terrestre.

$$g = \|\mathbf{g}\| \quad (6)$$

O vetor $\mathbf{g}$ é orientado na direção da vertical ou linha de prumo, em qualquer ponto do campo de gravidade terrestre. Em um sistema de coordenadas geográficas astronômicas (ϕ, λ), a direção de $\mathbf{g}$ é definida para um ponto P pelo versor n :

$$\mathbf{n} = \begin{bmatrix} \cos\phi_P \cos\lambda_P \\ \cos\phi_P \sin\lambda_P \\ \sin\phi_P \end{bmatrix} \quad (7)$$

Pelos pontos do campo de gravidade passam diferentes superfícies equipotenciais, em que o valor de W é constante. Dada a diferença de densidade do interior da crosta terrestre, essas superfícies equipotenciais não são paralelas, apenas possuem uma diferença constante de potencial entre elas. Uma particular superfície equipotencial, que coincide com o nível médio não perturbado dos mares, limita um corpo denominado geoide. Usada como referência para os sistemas de altitude com sentido físico, a superfície geoidal teve seu valor (potencial) convencionado pela resolução n. 1 da IAG de 2015 (DREWES *et al.*, 2016):

$$W_0 = 62\,636\,853.4 \, m^2s^{-2} \quad (8)$$

A modelagem dessa superfície, de grande interesse para a Geodesia, depende diretamente da medição de g sobre a superfície do planeta, tarefa bastante complexa e que se utiliza de diversas técnicas (aérea, terrestre, marinha e espacial) para sua realização.

A ideia de um campo de gravidade estático é, todavia, meramente teórica. O potencial de gravidade para determinado ponto P , sob efeito do campo de gravidade terrestre, tem seu valor constantemente alterado quando se considera o tempo como uma dimensão de análise (NIEBAUER, 2015).

2.3 PERTURBAÇÕES DO CAMPO DE GRAVIDADE

Determinados fenômenos naturais produzem perturbações no campo de gravidade terrestre e podem ser detectados por meio das variações de g quando se observa um mesmo ponto do espaço por determinado intervalo de tempo. Entre esses fenômenos de natureza física, é possível citar as marés terrestres, o movimento do polo, as cargas atmosférica e hidrológica, além dos processos geológicos.

A ação perturbadora desses elementos pode afetar, além da aceleração de gravidade, o raio vetor geocêntrico, as altitudes geométrica e ortométrica, as ondulações do geoide, o desvio da vertical e o geopotencial de determinado ponto sobre a superfície terrestre (GEMAEL, 1999).

Levando em consideração a expressão 4, é possível representar o potencial de gravidade de um ponto P por:

$$Wp^{(t)}(x, y, z) = V(x, y, z) + Vc + D^t \quad (9)$$

Na expressão 9, V representa o potencial gravitacional da Terra, Vc o potencial centrífugo e D^t a perturbação sofrida pelo geopotencial em um determinado instante t . Alguns desses fenômenos possuem características aleatórias e esporádicas como vulcanismo, terremotos etc. Outros possuem características cíclicas ou lineares, permitindo a elaboração de modelos precisos de seu comportamento.

2.3.1 Marés terrestres

Pela diferença de atração, exercida por corpos celestes, entre o centro de massa e a superfície do planeta Terra, enquanto este perfaz seus movimentos próprios (rotação, translação, nutação e movimento do polo), as forças de maré têm como resultado a deformação da crosta terrestre e uma enorme movimentação da massa oceânica (GEMAEL, 1999).

O cálculo teórico da força de maré pode ser realizado de duas maneiras distintas: pelo cálculo direto do potencial de maré para um ponto P , em função do movimento orbital dos astros perturbadores, ou por sua representação em uma série de funções harmônicas esféricas.

A determinação direta do potencial de maré, também conhecida como Método das Efemérides, pode ser elaborada com alta precisão para uma Terra rígida, esférica, não rotante, homogênea, sem oceanos e atmosfera. Por um lado, seu erro está limitado exclusivamente pela qualidade das coordenadas dos astros perturbadores; por outro, erros nas quantidades angulares resultam em enormes deslocamentos do ponto calculado (AGNEW, 2015).

A representação do potencial de maré por meio de funções harmônicas esféricas utiliza em seu cálculo os coeficientes para cada constituinte de maré, em função do grau e da ordem do desenvolvimento em série. Catálogos do potencial gerado pela maré terrestre vêm sendo publicados desde o ano de 1921, possibilitando calcular as componentes de onda – amplitude e fase – para cada constituinte de maré em qualquer ponto P considerado em uma Terra rígida (CROSSLEY; HINDERER; RICCARDI, 2013).

As partes sólida e líquida do planeta têm respostas distintas quando submetidas à ação da força de maré. Por um lado, a elasticidade da crosta terrestre responde à atração dos corpos

celestes causando sua deformação, redistribuição de massa no interior do planeta e mudanças em seus parâmetros de orientação e rotação. Já a resposta do corpo líquido consiste em um fenômeno um pouco mais complexo e tem como resultado uma enorme movimentação da massa oceânica. Essa movimentação, além de contribuir com a deformação da crosta por meio da pressão exercida pela coluna de água, causa a elevação do nível do mar ao longo das faixas costeiras (VAN CAMP, 2003). Modelos globais de maré oceânica se utilizam de dados de altimetria por satélite para um cálculo mais acurado. Correções específicas para regiões costeiras são aplicadas para uma previsão mais assertiva (BOY *et al.*, 2003).

Figura 2 – Modelagem da maré terrestre.

Fonte: Agnew (2015).

A figura 2 apresenta um diagrama resumido do processo de modelagem da maré terrestre. Nela, observa-se que, depois de consideradas as deformações da superfície, provocadas nos modelos de Terra sólida e carga oceânica, as forças de maré são introduzidas para o ponto calculado do corpo deformado (atração direta) e somadas a fatores não relacionados (ambientais) para a determinação final do potencial de maré (AGNEW, 2015).

2.3.2 Movimento polar

O movimento do polo também é responsável por parte da alteração do potencial de gravidade do planeta. Trata-se da mudança de magnitude da força centrífuga causada pela mudança da posição do eixo de rotação da Terra (CROSSLEY; HINDERER; RICCARDI, 2013).

Essa mudança de posição do que se chama Celestial Ephemeris Pole (CEP), é observada em relação ao IRP, em termos de longitude e obliquidade. Diariamente são publicadas pelo

IERS um par de coordenadas do polo (X^p , Y^p) e constituem parte dos Earth Orientation Parameters (EOP) (BLITZKOW *et al.*, 2011).

Segundo Crossley *et al.* (2013), pode-se expressar a mudança da aceleração de gravidade em termos da posição do eixo de rotação, por:

$$\delta g \text{ (pm)} = -\delta\Omega^2 a \sin^2\theta (m1 \cos\lambda + m2 \sin\lambda) \quad (10)$$

Na expressão 10, $\delta\Omega^2$ representa o desvio do eixo de rotação, θ e λ são as coordenadas do ponto calculado e $m1$ e $m2$ são medidas em radianos (rad). Segundo o autor, a modelagem do movimento polar é muito bem definida pelos atuais instrumentos de observações espaciais, como o VLBI. O efeito sobre a aceleração de gravidade pode chegar até 15 μGal em certas partes do globo (CROSSLEY; HINDERER; RICCARDI, 2013).

2.3.3 Atmosfera

A atmosfera é constituída de uma mistura de gases que, sob efeito do campo de gravidade, são atraídos para o corpo do planeta. Atingindo uma média de 500 km de altura sobre a superfície terrestre, possui densidade de aproximadamente 1,3 kg/m³. A pressão que a atmosfera exerce sobre um ponto na superfície terrestre é o reflexo da massa da coluna de ar acima desse ponto. Ao nível do mar, a pressão atmosférica possui o valor médio de 1.013,25 hPa (AHRENS, 2009).

Segundo Crossley *et al.* (2013), a massa atmosférica exerce significativa influência no valor da aceleração de gravidade medida sobre a superfície terrestre, chegando a representar o equivalente a 10% do valor exercido pelo fenômeno da maré terrestre, por exemplo. A variação da pressão da atmosfera pode ser correlacionada com a variação do valor da aceleração de gravidade na razão aproximadamente de $-0,3 \mu\text{Gal/hPa}$. Essa relação é fruto da combinação entre a atração positiva que a massa atmosférica causa sobre o ponto medido e também pela deformação elástica que essa mesma massa causa na crosta durante o fenômeno de maré terrestre, também de forma positiva, diminuindo o valor da aceleração de gravidade medido sobre a superfície física do planeta (CROSSLEY; HINDERER; RICCARDI, 2013).

Analisando a contribuição que a massa atmosférica traz para a aceleração de gravidade medida na superfície terrestre, Merriam (1992) dividiu a atmosfera em zonas de influência, com base no raio de distância que a coluna de ar está do ponto medido. A zona 1 compreenderia um

cilindro com raio de 50 km, responsável por 90% do efeito da carga atmosférica. A zona 2 compreenderia um anel entre os 50 km e 500 km de diâmetro; seu efeito sobre o ponto medido é bem menor e possui componentes de carga quase horizontais, dada a curvatura da superfície terrestre. A zona 3, por sua vez, compreenderia o resto da carga atmosférica global, responsável por até 5% do efeito atmosférico na aceleração de gravidade de um ponto medido. Refinando o coeficiente de correlação entre a aceleração de gravidade e a pressão atmosférica, admitiu-se para a zona 1 o fator de $-0,356 \mu\text{Gal/hPa}$ que poderia variar de $-0,27$ a $-0,43 \mu\text{Gal/hPa}$ com a introdução, respectivamente, das zonas 2 e 3 (MERRIAM, 1992).

2.3.4 Carga hidrológica

Entre os fenômenos de difícil modelagem está o de carga hidrológica. O volume de água retida nos solos e aquíferos pode representar um enorme acréscimo de massa ao subsolo terrestre. Seu impacto sobre a aceleração de gravidade de determinado local, embora pequeno, pode ser observado por gravímetros específicos (VAN DAM; FRANCIS, 1998).

Estudos hidrogravimétricos passaram a reconhecer a correlação entre o módulo do vetor gravidade e as variáveis hidrológicas como o volume de precipitação e a capacidade de armazenamento da massa de água de determinado local. Valores observados durante um monitoramento realizado sobre um aquífero no Japão apontaram para uma variação de $19 \mu\text{Gal}$ em um intervalo de dois anos (NISHIJIMA *et al.*, 2016).

Mais recentemente, um estudo realizado com um gravímetro supercondutor buscou relacionar a variação diária de g , para uma pequena área de floresta, com o fenômeno da evapotranspiração dessa floresta. Segundo o autor, foi possível identificar correlações na ordem de $0,1 \mu\text{Gal}$, o que corresponderia a $1,7 \text{ mm}$ de chuva sobre uma área de 50 ha (VAN CAMP *et al.*, 2016).

2.3.5 Fenômenos geológicos

Eventos geológicos podem ser esporádicos e imprevisíveis, como terremotos e erupções vulcânicas, ou podem apresentar um comportamento mais regular, como o movimento das placas litosféricas. De uma maneira ou de outra, seus resultados exercem impacto direto sobre o campo de gravidade terrestre.

Por meio das redes de monitoramento GNSS, foi possível modelar com bastante precisão os movimentos tectônicos de placas que, em termos de aceleração de gravidade, são considerados variações lineares de longo período, principalmente pela movimentação vertical da crosta (TEFERLE *et al.*, 2006).

Quando se trata de fenômenos geológicos aleatórios como o sismicismo e o vulcanismo, os impactos sobre o geopotencial podem ser enormes, dependendo da magnitude dos fenômenos ocorridos.

2.4 GRADIENTE

Entende-se que a aceleração de gravidade medida sobre a superfície do planeta é variável. Para um mesmo ponto medido, a variação de g está basicamente relacionada às perturbações temporais sofridas pelo campo de gravidade, corrigidas, na medida do possível, por meio de modelos matemáticos aplicados. Quando se observam as variações da aceleração entre diferentes pontos medidos, outros fatores devem ser levados em consideração, como a litologia, o relevo, a latitude e a altitude da estação observada.

Segundo Castro Junior (2005), a variação de 3 m verticais (altitude) pode representar aproximadamente 1 mGal em termos de aceleração. Vale lembrar que a força gravitacional entre dois corpos é diretamente proporcional à distância que os separa (expressão 1). Já a variação da aceleração de gravidade entre latitudes polares e equatoriais, por exemplo, chega a atingir o valor de 5 Gal. Essa diferença, além de fruto do achatamento do planeta, é também exercida pela diminuição da força centrífuga nos polos (CASTRO JUNIOR, 2005).

Dá-se o nome de gradiente vertical de gravidade à variação do valor da aceleração de gravidade em função da diferença de altitude. Se um modelo da Terra com mesma massa (densidade homogênea) e mesma velocidade angular de rotação é assumido, tem-se o que se chama de gradiente de ar livre da Terra normal, equivalente a $3,086 \mu\text{Gal/cm}$, em termos de aceleração (GEMAEL, 1999).

No entanto, conforme exposto anteriormente, o embasamento geológico sobre o qual a medição é realizada e as condições do relevo a seu redor são responsáveis por parte da variação de g observada entre diferentes estações medidas. Da mesma forma, essa variação de massa da crosta terrestre também produz diferentes valores para o gradiente vertical correspondente e pode ser relacionada com a densidade de grupos de rochas (OMOSANYA *et al.*, 2012).

3 GRAVIMETRIA

Para Castro Junior (2005), a gravimetria pode ser compreendida como o conjunto de técnicas e procedimentos dedicados ao estudo das variações da aceleração de gravidade, ponto a ponto, sobre toda a superfície terrestre (CASTRO JUNIOR, 2005).

As medições do vetor gravidade são empregadas em diversos ramos da ciência aplicada e têm papel fundamental no estudo do planeta Terra. A partir da determinação da magnitude de g sobre a superfície terrestre, informações podem ser obtidas e correlacionadas.

Conforme exposto anteriormente, diversos fenômenos naturais geram impacto no campo de gravidade e podem ser observados nas variações de g . Medições gravimétricas podem ser utilizadas para detectar movimentos verticais da crosta (TEFERLE *et al.*, 2006), realizar monitoramento de aquíferos (NISHIJIMA *et al.*, 2016), pesquisar a prospecção de petróleo (BASKIN; JONES, 1993), estudar os modelos de densidade (OMOSANYA *et al.*, 2012), entre outras aplicações.

Para a Geodesia, os valores da aceleração de gravidade são de extrema importância para a determinação de grandezas que constituem seu objeto de estudo. A medição desses valores em diversas partes do planeta permitiu a realização dos primeiros cálculos sobre o achatamento e a forma da Terra (FISCHER, 1975), a quantificação precisa do fenômeno de maré terrestre (CROSSLEY; HINDERER; RICCARDI, 2013), a elaboração de modelos do geopotencial (BARTHELMES, 2009) e a determinação de modelos de ondulação geoidal (LAURÍA, 2018). Estes dois últimos são de fundamental importância para o estabelecimento do International Height Reference System (IHRS) (IHDE *et al.*, 2017).

Na engenharia, a gravimetria é empregada no estudo de barragens e de grandes reservatórios. As altitudes ditas científicas são cada vez mais utilizadas em projetos que requerem uma altitude com sentido físico, como canalização de água e esgoto, oleodutos, gasodutos e projetos de transposição hídrica em geral. Esses e outros empreendimentos necessitam da gravimetria para fornecer a acurácia demandada pela engenharia moderna.

3.1 BREVE HISTÓRICO

As primeiras observações sobre o campo de gravidade de que se tem notícia remontam ao século IV a.C., época em que Aristóteles (384-322 a.C.), filósofo de Estagira, acreditava na existência de uma força natural que fazia todos os corpos tenderem para o centro da Terra, entendendo que objetos mais pesados caíam mais rápido do que objetos mais leves. Somente

quase 2 mil anos mais tarde é que Galileu Galilei (1564-1642 d.C.), considerado o pai da gravimetria, testou e refutou parcialmente a teoria de Aristóteles, jogando pedras de diferentes tamanhos da Torre de Pisa (FISCHER, 1975).

Pode-se dizer que, de certa forma, a gravimetria teve sua história associada com a medição do tempo. Durante o século XVII, em seus experimentos, Galileu também notou que o período de um pêndulo não estava relacionado com a amplitude de seu movimento, e sim com o comprimento da haste pendular, o que poderia possibilitar a medição do tempo. Em 1657, Christiaan Huygens (1629-1695 d.C.) construiu o primeiro relógio utilizando o princípio do pêndulo.

Além do comprimento de sua haste, o período de um pêndulo está relacionado com a aceleração de gravidade. Na expressão 11, T é o período, l é o comprimento da haste e g é a aceleração de gravidade:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (11)$$

Levando em consideração que o pêndulo poderia ser igualmente usado para medir a aceleração de gravidade, foi Pierre Bouguer (1698-1758 d.C.), matemático e astrônomo francês, que popularizou as medidas pendulares de g durante o século XVIII (NIEBAUER, 2015).

Alcançando uma resolução de leitura de até 1 ppm, o pêndulo permitiu a determinação da aceleração de gravidade em diversos pontos sobre a superfície do planeta; com isso, grandes campanhas de medição passaram a ser realizadas (MORELLI *et al.*, 1974).

Em Viena, no ano de 1900, visando-se à uniformização de dados e procedimentos para as medições, decidiu-se convencionar um valor absoluto da aceleração de gravidade para determinada estação de referência, consistindo na primeira tentativa de definir um *datum* gravimétrico para as medidas que vinham sendo realizadas. Alguns anos mais tarde, em 1909, um valor estabelecido na Universität Potsdam, na Alemanha, foi adotado como oficial (CASTRO JUNIOR, 2005). A figura 3 apresenta a imagem de um modelo de gravímetro pendular.

Figura 3 – Gravímetro pendular de Felix Andries Vening Meinesz (1887-1966).

Fonte: Root (2016).

O sucesso advindo das medições pendulares perdurou até meados do século XX, com a invenção do gravímetro de mola, na década de 1940. Um equipamento robusto e relativamente fácil de operar, esse gravímetro relativo permitia a determinação de diferenças no valor da aceleração de maneira rápida e eficaz. Ao contrário da técnica pendular, os gravímetros de mola permitiam a medição de uma série de estações por dia, com precisão até dez vezes superior (GEMAEL, 1999).

A partir da década de 1960, com o aperfeiçoamento das câmaras de vácuo, da eletrônica e dos relógios de precisão, tornou-se possível substituir também as medições absolutas pendulares pelas medições balísticas de queda livre. Na década de 1980, essa nova técnica passou a vigorar como recomendação da International Association of Geodesy (IAG) para a determinação absoluta da aceleração de gravidade sobre a superfície terrestre (DREWES, 2012).

3.2 INSTRUMENTAÇÃO

Conforme apresentado nos capítulos anteriores, a grandeza que é objeto da gravimetria é o módulo do vetor gravidade (g) – isto é, a aceleração – do campo de gravidade da Terra. Independentemente do tipo de uso dos gravímetros, é possível classificar esses instrumentos em relativos ou absolutos.

Atualmente, os gravímetros são considerados absolutos quando medem a aceleração de gravidade diretamente sobre unidades do Sistema Internacional de Medidas (SI). Para tanto,

devem possuir um relógio atômico para a determinação precisa do tempo e um *laser* estabilizado para a medição da distância. Já os gravímetros relativos diferenciam-se basicamente dos absolutos pelo fato de não medirem diretamente a aceleração de gravidade, e sim uma unidade instrumental, retificada por uma constante de calibração, determinada para cada gravímetro, objetivando transformar a leitura do equipamento em unidades de aceleração (NIEBAUER, 2015). As figuras 4 e 5 apresentam dois modelos de gravímetros relativos, produzidos, respectivamente, na segunda metade do século XX e em meados do século XXI.

Figura 4 – Modelo G de gravímetro relativo da fabricante LaCoste & Romberg.

Fonte: LaCoste & Romberg (2004).

Figura 5 – Modelo Burris™ de gravímetro relativo da fabricante ZLS.

Fonte: ZLS Corporation ([2020]).

Gravímetros relativos medem a força necessária para manter uma massa de teste estacionária em equilíbrio, quando colocada em suspensão por um sistema de molas e hastes.

Duas configurações distintas de equilíbrio do conjunto de molas são utilizadas nesses equipamentos. A primeira, denominada instável, suspende a massa de teste em um sistema de molas a 45° da linha de prumo. A segunda configuração, denominada estável, suspende a massa de teste em um conjunto vertical (paralelo à linha de prumo) de molas (SEIGEL, 1995).

Por um lado, a configuração vertical da mola (estável) demanda um alinhamento extremamente preciso do conjunto em relação à direção da linha de prumo. Por outro, a configuração de semiequilíbrio da mola (instável) proporciona uma boa sensibilidade mecânica. Ambos dispõem de um conjunto de sensores e capacitores que convertem a força necessária para o restauro da mola à posição de equilíbrio em unidades instrumentais de leitura (NIEBAUER, 2015).

Esses tipos de gravímetros relativos não sofreram muitas modificações ao longo do tempo. Alguns modelos receberam uma interface digital para sua operação e leitura. A figura 6 apresenta um gravímetro relativo digital que opera sob o princípio estável, com uma mola de quartzo na posição vertical.

Figura 6 – Modelo CG-5 Scintrex Autograv™ System de gravímetro relativo da fabricante Scintrex.

Fonte: Scintrex (2012).

Gravímetros embarcados em veículos como aeronaves e navios são utilizados na gravimetria aérea e marinha, respectivamente. São gravímetros relativos suportados por uma plataforma estabilizadora que compensa as oscilações, nos três eixos (Ω , Φ e k) do veículo de transporte. A figura 7 mostra um desses modelos.

Figura 7 – Modelo TAGS-7 de gravímetro relativo de ar e mar da fabricante Micro-g LaCoste.

Fonte: Micro-g LaCoste ([2020d]).

Alguns tipos de gravímetros relativos se destinam a observações contínuas e de longo período. São normalmente utilizados para a observação dos fenômenos perturbadores do campo de gravidade, como maré terrestre, cargas hidrológicas, movimentos verticais da crosta etc. Exemplo de tal modalidade é dado pelo gPhoneX, modelo mostrado na figura 8.

Figura 8 – Modelo gPhoneX de gravímetro relativo da fabricante Micro-g LaCoste.

Fonte: Micro-g LaCoste ([2020c]).

Há outro tipo de gravímetro relativo, também destinado a monitoramentos contínuos de longa duração, denominado supercondutor. Esse tipo de equipamento possui a maior resolução de leitura entre todos os gravímetros existentes. Seu princípio de funcionamento também almeja o equilíbrio de uma massa de teste; no entanto, um campo magnético produzido por uma corrente elétrica é utilizado para levitar essa massa de teste, constituída de uma esfera de nióbio (Nb). A variação da corrente necessária para manter a esfera em levitação é então convertida em valores de aceleração de gravidade (CROSSLEY; HINDERER; RICCARDI, 2013).

Figura 9 – Modelo *iGrav*® de gravímetro supercondutor da fabricante GWR.

Fonte: GWR Instruments ([2020]).

Apesar de a técnica ter sido desenvolvida na década de 1960 pelo Joint Institute for Laboratory Astrophysics (JILA), somente no ano de 1986 é que os primeiros gravímetros absolutos de queda livre foram disponibilizados comercialmente. Paralelamente ao desenvolvimento do gravímetro JILA g, um consórcio entre instituições norte-americanas e alemãs desenvolveu um gravímetro denominado FG5. Sem tanta instabilidade no *laser* como seu congênere JILA g, o FG5, fabricado pela empresa Micro-g LaCoste, rapidamente se tornou o instrumento mais utilizado para medições absolutas da aceleração de gravidade, posição que ocupa até os dias de hoje (NIEBAUER *et al.*, 1995). Ambos os gravímetros aparecem nas figuras 10A e 10B.

Figura 10 – Modelos de gravímetros absolutos: FG5 (A) e JILA g (B).

A

B

Fonte: Micro-g LaCoste ([2020b]); ÖGK (2009).

Os gravímetros absolutos passaram a oferecer valores confiáveis da aceleração de gravidade com a precisão de poucos microgals (μGal). No entanto, a portabilidade ainda era uma questão limitadora na realização de medições, requerendo, adicionalmente, ambientes estáveis, abrigados e muito tempo entre a montagem e a operação. Pode-se considerar que foi somente na década de 2000, com o lançamento do modelo A10, apresentado na figura 11, que grandes campanhas de gravimetria absoluta puderam ser realizadas (MÄKINEN; SĘKOWSKI; KRYŃSKI, 2010; JIANG *et al.*, 2013; KRYŃSKI; SĘKOWSKI, 2010).

Figura 11 – Modelo A10 de gravímetro da fabricante Micro-g LaCoste.

Fonte: Micro-g LaCoste ([2020a]).

Atualmente, uma empresa de nacionalidade francesa está desenvolvendo uma técnica de interferometria com átomos frios colocados em queda livre. Embora em fase de teste, os resultados são bastante promissores, apresentando desvios médios de $7 \mu\text{Gal}$ em comparação realizada com o gravímetro absoluto FG-5 (MERLET *et al.*, 2010).

Figura 12 – Modelo Absolute Quantum Gravimeter de gravímetro de átomos frios da fabricante Muquans.

Fonte: Muquans (2019).

3.3 MEDIÇÃO DA ACELERAÇÃO DE GRAVIDADE

Conforme exposto anteriormente, diversos fenômenos naturais se sobrepõem ao sinal medido da aceleração de gravidade. Somando-se a isso, há questões pertinentes ao universo das medições, como desempenho instrumental, procedimentos e tratamento de dados, para que se possam obter resultados confiáveis para cada medição executada.

3.3.1 Precisão, repetibilidade e acurácia

O termo precisão é largamente utilizado para qualificar uma medição, medida ou equipamento. Equivocadamente associada à resolução ou a uma menor quantidade da grandeza medida que um equipamento é capaz de quantificar, a precisão está, na verdade, relacionada com a dispersão de valores observados e o desvio-padrão de uma medida.

Segundo Niebauer (2015), a precisão das medições da aceleração de gravidade está relacionada a quatro questões distintas: a qualidade do instrumento, o ruído do local de medição, a duração do tempo da medição e a frequência dos ruídos/sinais que possam afetar o resultado. A precisão da medida pode ser afetada por qualquer um desses elementos ou pela combinação de alguns deles. A qualidade do instrumento deve ser boa o suficiente para reportar um valor estável durante o tempo de medição. No entanto, se o ruído do local da medição for alto, as respostas do equipamento podem passar despercebidas. Nesses casos, a precisão da medição estará vinculada ao nível de perturbação da estação ocupada. A duração do tempo de medição é também um parâmetro fundamental na precisão de uma medida. Do ponto de vista da metrologia, em observações de maior duração, a probabilidade de detecção de anomalias durante a medição também aumenta, podendo fornecer mais parâmetros de análise da própria medida. Por fim, os ruídos que atingem o local da medida ao longo do período de medição têm alta correlação com a duração e a frequência em que a medição está sendo realizada. Alguns dos ruídos/sinais que acometem as medições gravimétricas possuem diversos componentes e podem ser agrupados segundo suas frequências e amplitude, conforme ilustra a figura 13 (NIEBAUER, 2015).

Figura 13 – Fenômenos perturbadores do campo de gravidade.

Fonte: Crossley, Hinderer e Riccardi (2013).

Os componentes dos gravímetros tendem a desgastar-se durante a vida útil do instrumento e, assim, apresentar certo desvio ou “tara” em seus resultados ao longo do tempo. Isso pode ser causado pelo desgaste da massa de teste depois de inúmeras quedas ou até mesmo pela condensação de umidade em certas partes do equipamento. Nesse sentido, a repetibilidade talvez seja a característica de um equipamento com maior valor prático, pois permite avaliar seu desempenho em condições reais de uso (JIANG *et al.*, 2013).

Testes de repetibilidade podem trazer informações importantes sobre a variação de resultados obtidos por um mesmo equipamento. Para realizar análises criteriosas de repetibilidade, é necessário que a estação escolhida esteja o mais longe possível de qualquer fonte de ruído. Dessa forma, garante-se que qualquer desvio analisado seja fruto das incertezas sistêmicas de operação do gravímetro sem influência de fatores externos.

Partindo do princípio de que os gravímetros absolutos satisfazem as mais altas demandas metrológicas, assume-se frequentemente que o resultado obtido passe a ser também considerado o mais acurado. A acurácia, na verdade, está relacionada ao conceito de exatidão; é a qualidade de ser verdadeiro e livre de erros. Há quem possa considerar que esse conceito só pertence ao universo teórico, já que no mundo físico a realidade mostra que toda

medida/medição é eivada de erros. Nunca será possível determinar a acurácia de determinado equipamento a não ser que outro melhor exista (NIEBAUER, 2015).

3.3.2 Ajustamento das observações

Toda grandeza que necessita ser observada e medida para ser quantificada ou qualificada é passível de erros pelo próprio ato de medir. Toda medição estará sempre condicionada a erros de operação, precisão do equipamento e condições ambientais que possam afetar seus resultados (GEMAEL; MACHADO; WANDRESEN, 2015).

Levando em consideração as incertezas próprias do ato de medir, observações superabundantes são efetuadas sobre a grandeza mensurada, com o objetivo de ajustar seus valores por meio de algum método matemático. Ajustar significa abdicar da pretensão de obter o valor verdadeiro de determinada grandeza medida, em favor de um valor estimado para a grandeza mensurada (BLITZKOW, 2019, informação verbal).

Segundo Gemael, Machado e Wandresen (2015), a impossibilidade de obter o valor verdadeiro de determinada grandeza faz com que sempre haja um conjunto de resíduos ou desvios, qualquer que seja o valor observado. Um modelo que aborda essa questão, o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), parte do princípio de que o resultado mais representativo de determinada grandeza auferida é aquele cujo somatório dos quadrados dos resíduos seja mínimo (GEMAEL; MACHADO; WANDRESEN, 2015):

$$\sum_{i=1}^n v_i^2 = \min \quad (12)$$

Quando as observações possuem diferentes graus de confiança, torna-se necessária a atribuição de pesos às medidas realizadas. Geralmente, a atribuição de pesos é inversamente proporcional à variância da observação. Ou seja, atribui-se um peso maior para as observações que não desviaram muito do valor estimado e um peso menor para aquelas que apresentaram grande desvio.

$$\sum_{i=1}^n P_i v_i^2 = \min \quad (13)$$

No caso de observações diretas sobre a grandeza auferida, as incógnitas são compostas de valores observados ajustados; no caso de observações indiretas, busca-se estimar grandezas que se vinculam com as observadas, denominando-as parâmetros. O método paramétrico utiliza expressões de observação. Em um sistema linear, tem-se:

$$La = Lb + V \quad (14)$$

Na expressão 14, o vetor La representa as observações ajustadas, o vetor Lb representa os valores observados e o vetor V , os resíduos. Em um sistema não linear, tem-se (GEMAEL; MACHADO; WANDRESEN, 2015):

$$La = F(Xa) \quad (15)$$

Nesses casos, deve-se linearizar o modelo e adotar valores aproximados para os parâmetros, em que $Xa = Xo + X$, sendo X um parâmetro de correção ao valor inicial adotado (Xo).

3.4 REDES E REFERÊNCIAS GRAVIMÉTRICAS

A ideia de uma rede gravimétrica está diretamente relacionada com um Sistema Geodésico de Referência (SGR). Atualmente, a materialização do International Gravity Reference Frame (IGRF) mobiliza distintas instituições ao redor do globo. Como o planeta apresenta condições naturais, geológicas e climáticas diversas, além de ser coberto em sua grande parte por um vasto oceano, essa não é uma tarefa fácil.

Conceitualmente, as redes gravimétricas receberam diversas classificações entre os autores que abordaram o assunto. Alguns se valem de uma conotação mais política e propõem uma divisão entre redes nacionais e internacionais, redes regionais e estaduais etc. Outros autores utilizam uma ordem de grandeza em suas classificações como redes de primeira ordem, segunda ordem, rede básica etc. (CASTRO JUNIOR, 2005).

Independentemente do tipo de classificação que recebem, redes gravimétricas são conjuntos de pontos com valores conhecidos de g . Por meio das técnicas de medição disponíveis, o valor da aceleração de gravidade pode ser estabelecido de forma relativa ou absoluta.

Esforços internacionais para a consolidação de um consistente sistema de referência global de gravidade somente ganharam forma no ano de 1971, durante a assembleia-geral da International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG), realizada em Moscou, quando foi aprovada a primeira rede global de estações gravimétricas, a International Gravity Standardization Net 1971 (IGSN-71). Composta inicialmente de 1854 estações, nas quais foram realizadas 200 medições pendulares, 10 medidas absolutas e 24.000 medidas relativas, a IGSN-71 foi compilada e ajustada por um pequeno grupo de trabalho da IAG (MORELLI *et al.*, 1974).

Com o passar dos anos, diversos circuitos gravimétricos foram sendo realizados e adicionados às redes gravimétricas nacionais, adensando a cobertura territorial. Ao mesmo tempo, antigas estações da IGSN-71 foram sendo destruídas gradativamente (CASTRO JUNIOR, 2005).

O estabelecimento de referências absolutas de gravidade é bastante recente quando comparado às redes relativas. No Brasil, a primeira rede absoluta consolidada foi a Rede Nacional de Estações Gravimétricas Absolutas (RENEGA), estabelecida pela Universidade Federal do Paraná (UFPR) em parceria com a Leibniz Universität Hannover, no final dos anos 1980. Nela foram realizadas medidas com o gravímetro JILA g-3 em sete estações no território brasileiro (RUMMEL; HIPKIN, 1990).

No ano de 2004, o Observatório Nacional (ON) adquiriu um gravímetro absoluto modelo FG-5, instalado na cidade de Vassouras, no estado do Rio de Janeiro. A partir de 2013, com a aquisição do gravímetro absoluto A10 pelo Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo (IGC), diversas campanhas foram conduzidas com o apoio do Centro de Estudos de Geodesia (CENEGEO) e da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). Depois da materialização da referência no estado de São Paulo, foram implantadas estações na Venezuela (2016), na Argentina (2014-2017), no Equador (2017), na Costa Rica (2019) e nas regiões brasileiras Norte, Centro-Oeste, Sudeste e Sul.

4 MEDIÇÕES ABSOLUTAS

Ao contrário das medições relativas que necessitam de um valor inicial de referência para depois determinar as diferenças de magnitude do vetor gravidade (g) entre as estações medidas, as observações absolutas não dependem de qualquer outro fator externo, além dos dados gerados e das correções aplicadas na própria medição.

Conforme exposto anteriormente, medições absolutas são assim caracterizadas pelo fato de que observam parâmetros diretamente relacionados às grandezas do Sistema Internacional de Unidades (SI) – distância e tempo. Para tal, utilizam basicamente a técnica de interferometria a *laser* e um relógio atômico para garantir que as medidas estejam conforme os padrões internacionais estipulados. A medição é realizada colocando-se, repetidas vezes em queda livre, uma massa de teste dentro de uma câmara de vácuo, enquanto a medição precisa do tempo e o deslocamento dessa massa de teste são determinados (NIEBAUER, 2015).

4.1 GRAVÍMETRO A10

Fabricado pela empresa norte-americana Micro-g LaCoste, o modelo foi elaborado com o objetivo de ser um equipamento de fácil manuseio e transporte quando comparado a outros instrumentos de medição absoluta da aceleração de gravidade. É composto de três módulos distintos, conectados por dois cabos coaxiais, conforme ilustra a figura 14:

Figura 14 – Módulos do modelo A10, gravímetro da fabricante Micro-g LaCoste.

Fonte: Autor (2020).

Embora goze de um procedimento de operação relativamente simples, são sofisticadas as técnicas envolvidas na medição precisa do tempo e da distância de um objeto em queda livre.

4.1.1 Módulo de Interferometria

No Módulo de Interferometria (MI), encontram-se dois principais componentes: o sistema de isolamento sísmico denominado *superspring* (SS) – a supermola – e o conjunto óptico necessário à realização da interferometria a *laser*.

A interferometria de deslocamento é uma técnica de medição baseada na combinação de dois feixes de *laser* polarizados e estabilizados, emitidos pela mesma fonte emissora, mas que percorrem trajetórias distintas desde sua emissão. Enquanto um feixe incide sobre o objeto monitorado, o outro se mantém em uma referência fixa. Posteriormente, esses feixes são recombinados para produzir a interferometria óptica, ou melhor, as franjas interferométricas (BOBROFF, 1993).

4.1.2 Laser

Para garantir os padrões metrológicos internacionais, o A10 utiliza um *laser* emitido dentro de um cilindro contendo hélio (He) e neônio (Ne), envolto em um tubo aquecedor. Os gases e o sistema de controle da temperatura garantem extrema estabilidade ao sistema. O *laser* é capaz de emitir duas frequências distintas (com comprimentos de onda de aproximadamente $\lambda = 633 \text{ nm}$), ambas polarizadas linearmente e ortogonalmente entre si (MICRO-G LaCOSTE, 2012).

Até atingir o equilíbrio térmico adequado a seu funcionamento, flutuações da temperatura podem causar a alteração da frequência do *laser* em centenas de mega-hertz (MHz). Por isso, todo o conjunto interferométrico está alojado em um módulo independente, com um delicado controle térmico. Uma vez que o conjunto (módulo e *laser*) entra em equilíbrio, pode-se estabilizar o *laser* (Laser Lock) em qualquer uma das duas frequências especificadas como vermelha e azul (*red and blue*) (FALK *et al.*, 2012).

A figura 15 apresenta um esquema da trajetória percorrida pelo *laser* até sua saída do MI. Emitido o *laser*, um prisma desvia 40% de sua potência para um fotodiodo (referência fixa) e permite a passagem do restante que incidirá na massa de teste. Depois de sua reflexão pelo

prisma em queda livre (massa de teste), o *laser* retorna para o MI e, por meio de um conjunto óptico, os feixes são então recombinados.

Figura 15 – Esquema do sistema de interferometria.

Fonte: Micro-g LaCoste (2012).

Mesmo possuindo alta estabilidade, é recomendado que o *laser* seja calibrado periodicamente. Segundo Dykowski e Kryński (2016), existem duas incertezas que podem ser geradas pelo mal funcionamento do *laser*. A primeira se refere às instabilidades de longo termo e consiste em uma deriva da frequência, podendo chegar a 5 MHz em um período de cinco anos, que corresponde a $2 \mu\text{Gal}/\text{ano}$. A segunda diz respeito a instabilidades momentâneas do comprimento de onda emitido pelo *laser*, atingindo valores de 0,3 MHz, que, por sua vez, correspondem a perturbações na ordem de $0,7 \mu\text{Gal}$ em termos de aceleração (DYKOWSKI; KRYŃSKI; SĘKOWSKI, 2016).

4.1.3 Supermola

O sistema de isolamento sísmico é um sofisticado conjunto de molas denominado *superspring* (SS), que visa absorver os possíveis ruídos durante uma medição. Trata-se de um sistema de isolamento de longo período, projetado para manter o conjunto interferométrico livre de movimentos verticais de alta frequência. A SS garante, teoricamente, que qualquer mudança no comprimento de onda do feixe de *laser* emitido seja apenas resultado da aceleração da massa de teste.

A SS está configurada de modo que um primeiro conjunto de três molas suporte toda a estrutura interna de apoio. Dentro da mola e suspenso por uma mola central, encontra-se o

prisma de referência. Por meio de um motor de controle (servomotor), a posição vertical do prisma é monitorada de modo a garantir a estabilidade no comprimento da mola central, que suporta o prisma de referência. Dessa forma, o sistema é capaz de absorver ruídos com frequências maiores que 0,03 Hz (MICRO-G LaCOSTE, 2012).

Figura 16 – Módulo de Interferometria (MI): esquema da supermola (SS; do inglês, *superspring*).

Fonte: Micro-g LaCoste (2012).

4.1.4 Módulo de Queda Livre

O Módulo de Queda Livre (MQL) comporta dois principais componentes do conjunto de medição: a câmara de vácuo e o mecanismo de lançamento e recepção da massa de teste.

A câmara de vácuo consiste em um cilindro metálico capaz de manter uma pressão inferior a $1 \cdot 10^{-4}$ Pa (NIEBAUER *et al.*, 1995). Inicialmente, o vácuo é estabelecido de forma mecânica por intermédio de uma bomba de ar. Posteriormente, é mantido por uma bomba de íons, na qual uma pequena corrente elétrica aciona duas placas de alta voltagem que produzem aproximadamente 3.800 V. O campo eletromagnético produzido é maior do que a energia que mantém coesas as moléculas de ar presentes no interior da câmara, fazendo com que elas sofram uma separação iônica e sejam aderidas na superfície da placa. Daí o nome bomba de íons.

Por um lado, o sistema de queda livre possui um mecanismo de lançamento e retorno da massa de teste, capaz de executar o procedimento repetidas vezes, de maneira não destrutiva, de modo a preservar a integridade do objeto lançado. Por outro, o sistema tem a capacidade de lançar a massa de teste em uma trajetória perfeitamente vertical, garantindo que ela não rotacione ou translate demasiadamente em seu trajeto.

Figura 17 – Esquema do Módulo de Queda Livre (MQL).

Fonte: Micro-g LaCoste (2012).

4.1.5 Central de controle

A central de controle é composta de uma série de unidades eletrônicas (exBox, Dropper Controller, Patch Panel e Control Unit) envolvidas por uma caixa protetora. Pode-se dizer que ela é a interface integradora do gravímetro absoluto, comportando as conexões entre os módulos de medição (MI e MQL) e o computador. Este último analisa e interpreta os sinais recebidos e os converte em valores de aceleração de gravidade.

Figura 18 – Central de controle.

Fonte: Autor (2017).

Diversas operações são realizadas na central de controle. Algumas são manuais, como a ativação do *laser*; outras requerem o auxílio de um multímetro para verificar dados como temperatura, voltagem e amperagem de certos componentes.

4.2 ACONDICIONAMENTO

Enquanto o gravímetro não está em campo realizando medições, é recomendado que ele seja acomodado em uma sala climatizada e adequada para sua manutenção e operação. O equipamento só deve ser totalmente desligado caso não venha a ser utilizado por um longo período e/ou transportado por longas distâncias. Caso contrário, é ideal que a bomba de íons e o aquecimento do MI permaneçam sempre energizados, poupando-se assim o tempo de estabelecimento do vácuo no MQL e de alcance do equilíbrio térmico do conjunto sempre que se for medir.

O A10 possui uma série de parâmetros de funcionamento que necessitam estar equacionados para o sucesso de uma medição. Primeiramente, deve-se programar a temperatura do instrumento. O *laser* deve possuir 10°C e o MI 5°C a mais que a máxima temperatura esperada para a estação de medição. Depois de cada regulagem, o sistema demora aproximadamente 2 h para atingir o equilíbrio térmico. Durante as campanhas, é possível que as temperaturas sejam eventualmente ajustadas entre estações com grande amplitude térmica. Segundo a fabricante, em temperaturas acima dos 35°C, o equipamento fica extremamente vulnerável a falhas, especialmente a bomba de íons. E, em temperaturas abaixo de 0°C, torna-se necessário ligar o aquecimento do MQL para o bom funcionamento do gravímetro.

Outro parâmetro a ser verificado é a potência do *laser*, que deve ser superior a 250 μ V, bem como a leitura do fotodiodo, que deve ser próxima de -1 V. Dessa forma, é possível garantir os padrões necessários para a realização da interferometria. Vale lembrar que a potência do *laser* está diretamente relacionada ao equilíbrio térmico do conjunto.

O correto nivelamento e alinhamento dos módulos (MQL e MI) com relação à trajetória vertical do *laser* é um parâmetro fundamental para garantir uma boa leitura. Desajustes de alinhamento causarão um desvio na observação das franjas interferométricas. Para obter precisão de leitura de 1 μ Gal, o gravímetro precisa estar nivelado com, no máximo, 9 s de arco de desajuste, o equivalente a aproximadamente 45 μ rad (NIEBAUER, 2015).

Conforme exposto anteriormente, a bomba de íons é um dispositivo que sempre fica ligado. O monitoramento de sua corrente e voltagem deve ocorrer com certa frequência, mesmo com o gravímetro fora de operação. Dessa forma, é possível evitar danos na bomba desligando

o sistema se a voltagem estiver abaixo de 3.600 V. Uma boa leitura de corrente e voltagem se aproxima dos valores de 0,5 A e 3.900 V, respectivamente.

Além das verificações elencadas anteriormente, é ideal que se realize uma completa verificação de cabos e conexões, bem como um teste de funcionamento completo. Com uma boa regulagem e aferição do instrumento em laboratório, espera-se que, no campo, apenas pequenos ajustes sejam necessários durante a montagem, mais bem descritos no item 4.4.

No apêndice desta dissertação, apresentam-se outros procedimentos e eventuais regulagens mais complexas. Vale lembrar que os ajustes que requerem a retirada da tampa de qualquer um dos módulos ou da central de controle devem somente ser realizados em um ambiente controlado. A tampa, além de manter o equilíbrio térmico do instrumento, protege os componentes ópticos de poeira e outras partículas que possam afetar seu bom funcionamento.

4.3 TRANSPORTE E LOCAL DE MEDIÇÃO

Para que uma observação da aceleração absoluta de gravidade possa ser realizada com sucesso, certas condições devem ser atendidas também com relação à logística de transporte do equipamento e à escolha do local da medição.

Conforme exposto anteriormente, diversos sinais não gravitacionais se sobrepõem à leitura efetuada pelos gravímetros; assim, o ideal é que as estações estejam o mais longe possível de atividades humanas, corpos hídricos e demais fontes de ruído. Também é recomendado que o equipamento seja posicionado em uma base sólida, preferencialmente sobre um embasamento rochoso (MÄKINEN; SĘKOWSKI; KRYŃSKI, 2010).

Em campanha realizada na Costa Rica, em janeiro de 2019, estruturas de concreto foram construídas especificamente para os pontos de medição, contribuindo para resultados bastante precisos. A figura 19 apresenta um esquema dos marcos construídos.

Figura 19 – Modelo dos marcos implantados na Costa Rica.

Fonte: Lucke (2019).

O veículo utilizado também deve satisfazer algumas condições para que as medições e o transporte ocorram de forma adequada. A primeira delas é possuir uma alimentação elétrica capaz de carregar a bateria de 12 V que deve ser utilizada pelo gravímetro. Em função da manutenção do vácuo no MQL e do equilíbrio térmico do aquecimento do MI, o equipamento nunca é desligado completamente. Se a campanha de medição durar mais do que um dia, é recomendado que a bateria do gravímetro seja carregada durante a noite, em razão da baixa carga que o alternador de um veículo é capaz de fornecer. Isso pode ser realizado com um carregador de baterias, que transforma corrente alternada 110/220 V em corrente contínua de 12 V.

É ideal que o veículo utilizado seja amplo, de modo que as caixas de transporte fiquem bem acomodadas e tenham fácil acesso. Um espaço interno para que o profissional de campo possa realizar as verificações na central de controle e operar o *software* também se faz

necessário. A figura 20 mostra o interior do veículo utilizado pelo Centro de Estudos de Geodesia (CENEGEO) para a realização das medições com o gravímetro A10 n. 32.

Figura 20 – Adaptações do interior do veículo da CENEGEO para medições com o gravímetro A10.

Fonte: Autor (2019).

4.4 MONTAGEM

Estabelecido o ponto a ser observado e posicionado o MI, iniciam-se os trâmites de verificação e montagem do instrumento. Esses procedimentos foram elencados em uma tabela de campo que é preenchida para cada medição. Nela constam, além das etapas de montagem, dados de controle como temperatura, voltagem, coordenadas (do ponto e do polo), nome da estação, horário da medição, entre outras informações.

A sequência de procedimentos necessários para colocar o gravímetro A10 em operação pode dividir-se em três fases distintas. A primeira consiste em uma etapa de monitoramento, na qual se utiliza o multímetro para verificar as temperaturas do MI, do MQL e do *laser*, bem como a corrente e a voltagem da bomba de íons.

A segunda etapa consiste em um processo de nivelamento e verticalização. Inicialmente, um sistema automático (*autolevel*) é responsável pelo alinhamento horizontal do MI. O nivelamento pode ser monitorado também com o multímetro, verificando sua inclinação nos eixos *X* e *Y*.

Com o MI devidamente nivelado, deve-se garantir que o *laser* emitido esteja perfeitamente alinhado com a direção vertical. Isso é realizado com o auxílio de uma luneta, que é momentaneamente posicionada sobre o MI. O feixe de *laser* emitido pelo conjunto óptico atinge o sistema de espelhos da luneta, onde parte é refletida diretamente para o visor, parte incide em um recipiente com etanol. O etanol possui uma tensão superficial mínima e garante que sua superfície estará sempre na horizontal. O feixe de *laser* refletido pelo etanol percorre então um sistema de lentes que permite ser visualizado em conjunto com o feixe de referência, sob a forma de dois pontos no visor da luneta. Qualquer desalinhamento do *laser* da trajetória vertical fará com que os feixes apresentem um deslocamento no visor da luneta. Quando os dois pontos estão relativamente próximos um do outro, é possível atuar em dois botões no topo do MI, até que se alcancem a verticalidade do sistema e a consequente coincidência dos feixes em um só ponto.

Figura 21 – Leitura da verticalidade do *laser* na estação de Esparza, Costa Rica.

Fonte: Autor (2019).

Com o *laser* devidamente verticalizado, o MQL é posicionado sobre o MI, mediante três apoios. Além destes, o MQL possui três hastes de alumínio fixadas em seu exterior, que, uma vez rebaixadas, sustentarão o módulo e preservarão sua orientação. Com o MQL devidamente apoiado sobre as hastes, o MI é rebaixado em alguns milímetros (mm), de modo que o conjunto óptico da interferometria não seja perturbado pelas quedas da massa de teste.

Com essa etapa equacionada, é necessário verificar a verticalização do MQL posicionado sobre o MI, para garantir que o *laser*, já verticalizado, sempre atinja o centro da massa de teste durante a queda livre. Para isso, utiliza-se um espectrômetro. Nesse procedimento pode aparecer um fenômeno que se chama respiro. Ele acontece quando o MQL não está completamente verticalizado, resultando em uma leitura de ondas interferométricas com diferentes amplitudes. O ideal é obter amplitudes de 4 V com diferença de no máximo 800 mV entre as ondas ou o equivalente a 20%. No pé de cada haste de alumínio, há um pequeno parafuso para nivelar o módulo e, conseqüentemente, eliminar o respiro da leitura.

Figura 22 – Leitura das franjas e nivelamento do MQL na estação de Nicoya, Costa Rica.

Fonte: Autor (2019).

Com o sistema completamente alinhado, a última etapa antes da programação do *software* consiste em um processo de estabilização da SS. Pequenos pulsos elétricos são enviados para que o conjunto de molas entre em posição de equilíbrio, o que se verifica com o auxílio do multímetro. Uma vez atingida a estabilização, essa posição passa a ser monitorada e usada como parâmetro para identificar possíveis vibrações que o sistema interferométrico possa sofrer.

Nesse momento, o equipamento está pronto para ser programado. Por meio da introdução no computador de um *hardware* externo denominado Time Interval Analyzer (TIA) – ou melhor, *TIA card* –, o *software* passa a controlar todo o conjunto.

4.5 PROCESSAMENTO DAS OBSERVAÇÕES

O *software* g-9 é a interface informatizada do gravímetro e é por ele que as medições são programadas, processadas, visualizadas e armazenadas. Inicialmente, são introduzidos os dados da estação e algumas informações que servirão de parâmetro para as correções aplicadas, como a maré terrestre e a carga atmosférica.

O *software* dispõe de dois modelos globais distintos de maré terrestre pré-programados, o modelo ETGTAB e o modelo de Berger, para a correção dos valores observados de aceleração de gravidade.

Enquanto o modelo de Berger emprega o método das efemérides para a determinação do potencial de maré, o modelo ETGTAB se vale do método de desenvolvimento harmônico. Uma comparação realizada por Van Camp (2003) entre os dois métodos de cálculo apontou para uma discordância entre os valores menor que $0,5 \mu\text{Gal}$ (VAN CAMP, 2003).

A correção atmosférica depende da leitura da pressão ambiente, realizada por um barômetro integrado ao gravímetro, e do valor de altitude do ponto medido. Partindo do valor da pressão atmosférica ao nível do mar ($1.013,25 \text{ hPa}$), o *software* utiliza um gradiente aproximado de $0,12 \text{ hPa/m}$ para reduzir o valor da pressão à altitude do ponto e também realiza uma leitura local da pressão atmosférica. Os dois valores (medido e calculado) são então comparados para determinar a magnitude da correção aplicada.

Por fim, dois tipos de coordenadas são inseridas: o chamado movimento do polo devido à rotação terrestre e as coordenadas geográficas do ponto a ser medido. É importante ter especial atenção com as coordenadas e o tempo universal coordenado (UTC) definido, pois implicam diretamente algumas das correções aplicadas.

4.5.1 Leitura e cálculo do valor de aceleração

No processo de interferometria realizado, são monitoradas as mudanças de frequência do *laser*, causadas pela aceleração da massa de teste em queda livre. O feixe de *laser* que é refletido pelo prisma da massa de teste apresenta seu comprimento de onda alterado quando comparado à frequência do feixe de *laser* fixo, usado como referência. A figura 23 ilustra a trajetória do *laser* e seu comportamento associado às posições da massa de teste nos tempos e distâncias (D_i e T_i).

Figura 23 – Trajetória da queda.

Fonte: Micro-g LaCoste (2012).

Segundo Niebauer (1989), a determinação da aceleração de gravidade pelo método da queda livre baseia-se na aplicação do método de ajustamento pelos mínimos quadrados para a determinação da posição da massa de teste em função quadrática tempo (NIEBAUER, 1989).

A dificuldade de uma aproximação não linear para a expressão de queda faz com que um gradiente vertical seja previamente assumido no momento em que os pares de tempo e distância são ajustados em uma parábola simples. Tendo g e x_0 como parâmetros livres a serem determinados, a expressão de observação é dada por:

$$x_i = x_0 + v_0 t_i^{\sim} + \frac{g_0 t_i^{\sim 2}}{2} + \frac{\gamma x_0 t_i^{\sim 2}}{2} + \frac{1}{6} \gamma v_0 t_i^{\sim 3} + \frac{1}{24} \gamma g_0 t_i^{\sim 4} \quad (16)$$

$$t^{\sim} = t_i - \frac{(x_i - x_0)}{c}$$

Na expressão 16, v_0 , x_0 , e g_0 representam a velocidade, posição inicial e aceleração de gravidade para o instante $t = 0$, respectivamente. O γ é o gradiente vertical assumido e c , a velocidade da luz (NIEBAUER *et al.*, 1995).

Como os valores da aceleração variam ao longo da altura (gradiente vertical), o valor de aceleração reportado pela aplicação do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) corresponde a uma espécie de média das observações (pares de distância e tempo) obtidas ao longo da trajetória de cada queda.

Depois de ajustados os parâmetros, é possível introduzi-los novamente nas expressões de observação e obter a altura exata da queda para a qual o valor de aceleração foi mais bem determinado. Essa altura é chamada de altura efetiva de medição (*effective measurement height*) e corresponde a aproximadamente um terço da distância da queda (NIEBAUER, 1989).

As observações são constituídas de quedas de 1 s. Na prática, isso significa uma queda livre de 0,5 s e um reposicionamento de mais 0,5 s para obter uma leitura de 1 Hz. O intervalo entre cada queda pode ser alterado bem como a quantidade de quedas que comporá os conjuntos de medidas. Cada conjunto utiliza uma frequência distinta para o *laser*, sendo necessário realizar um número par de conjuntos de observações para ter equilíbrio nas frequências.

Além dos valores da aceleração de gravidade determinados para cada queda, o *software* também fornece as incertezas estatísticas relacionadas para cada conjunto, como o desvio-padrão, o gráfico de distribuição das observações, a porcentagem de rejeição e a média dos valores de aceleração.

Figura 24 – Tela do *software* durante um conjunto de quedas.

Fonte: Autor (2018).

Finalizado o conjunto de observações, a precisão da medição é calculada e somada à incerteza sistemática do equipamento, resultando no valor total das incertezas associadas à medida, conforme as expressões 17 e 18:

$$\delta_{stat} = \sigma / \sqrt{N_{sets}} \quad (17)$$

$$\delta_{total} = \sqrt{\delta_{sys}^2 + \delta_{stat}^2} \quad (18)$$

Sendo δ a incerteza, σ o desvio-padrão e N o número de conjuntos observados. As correções provenientes dos modelos de maré terrestre, movimento do polo e carga atmosférica são aplicadas instantaneamente aos valores auferidos. Posteriormente, é possível verificar a magnitude das correções aplicadas, em termos de aceleração, sobre todo o conjunto de observações realizado.

Figura 25 – Resultados finais, correções e incertezas associadas.

Fonte: Autor (2018).

4.5.2 Redução ao solo

Deve-se lembrar que todos os gravímetros têm uma altura de referência para suas medidas, sendo necessário realizar a redução do valor medido, ao marco de medição, geralmente sobre o piso. A altura instrumental varia entre cada equipamento utilizado, ainda

que do mesmo modelo. No *software* g-9, a redução do valor de aceleração ao solo ocorre de forma automática a partir da altura efetiva de medição e utiliza o gradiente de ar livre para realizar o cálculo. Buscando uma maior acurácia para os resultados, pode-se substituir o gradiente da terra normal por um gradiente local no processo de redução do valor de g ao marco de medição (JIANG *et al.*, 2013).

Geralmente, o gradiente local é auferido por meio de gravímetros relativos. Para isso, são necessários ao menos dois conjuntos de medidas de aceleração de gravidade, verticalmente separadas por uma distância conhecida. Em uma aproximação linear, divide-se a diferença entre os valores medidos pela distância, obtendo-se um valor médio de variação naquela trajetória. Essa estimativa também pode ser estabelecida utilizando-se uma aproximação polinomial (DYKOWSKI; KRYŃSKI, 2016).

5 CAMPANHAS NA AMÉRICA LATINA

Conforme mencionado na introdução, a aquisição do gravímetro absoluto A10 n. 32 trouxe novas possibilidades e desafios para a gravimetria nacional. A necessidade de implantação de redes gravimétricas absolutas globais era uma realidade que mobilizava pesquisadores, institutos de pesquisa, universidades e recursos para suas respectivas materializações nacionais.

A Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), em parceria com diversas instituições e com a coordenação do Centro de Estudos de Geodesia (CENEGEO), veio realizando diversas medições no continente latino-americano desde o ano de 2013, contribuindo com o estabelecimento de mais de 140 referências de gravidade absoluta distribuídas em cinco países, incluindo o Brasil.

5.1 MEDIÇÕES NO BRASIL

Diversas campanhas foram conduzidas em território nacional, resultando em 46 estações que vão de Santana do Livramento, na divisa com o Uruguai, até Manaus, na Amazônia, conforme mostra o mapa 1.

Mapa 1 – Estações absolutas no Brasil (2013-2020).

Fonte: Autor (2020).

Densificações estaduais foram, estão sendo e planejam ser realizadas. O estado de São Paulo teve sua rede gravimétrica absoluta estabelecida entre os anos de 2013 a 2016. Contando

com 18 estações, as referências foram materializadas em quatro campanhas distintas. O mapa 2 apresenta a distribuição das referências dentro dos limites estaduais.

Mapa 2 – Referência gravimétrica absoluta do estado de São Paulo (2020).

Fonte: Autor (2020).

Algumas estações foram objeto de reobservações, como São Paulo e Valinhos. Outras também tiveram valores medidos pelo Observatório Nacional (ON).

Algumas estações previamente estabelecidas demonstraram muita instabilidade e foram então substituídas por outros locais mais adequados, com menos ruído. O resultado final foi uma referência com desvio-padrão médio de $12,91 \mu\text{Gal}$ e incerteza final média de $12,04 \mu\text{Gal}$.

Tabela 2 – Medições no estado de São Paulo (2013-2016)

Estação	Gravidade (μGal)	Desvio-padrão (μGal)	Precisão (μGal)	Incerteza (μGal)
Araçatuba	978.565.670,55	1,75	0,55	10,73
Botucatu	978.556.697,76	10,55	3,34	11,22
Cachoeira Paulista	978.607.992,75	2,40	0,85	10,75
Cananeia	978.934.212,85	14,63	5,17	11,89
Dracena	978.583.040,90	5,67	2,00	10,90
Franca	978.392.999,78	40,38	14,28	17,85
Ilha Solteira	978.522.646,42	8,44	2,67	11,04
IAG – São Paulo	978.641.826,89	16,02	2,75	11,06
IAG – Valinhos	978.563.660,03	2,52	0,89	10,75
Itapeva	978.680.643,05	39,55	13,98	17,61
Jaboticabal	978.512.667,36	1,24	0,44	10,72
Lins	978.589.267,04	12,66	4,48	11,61
Ourinhos	978.638.570,11	13,39	4,74	11,72
Presidente Prudente	978.606.283,15	5,19	1,83	10,87
São Carlos	978.489.667,70	20,96	6,63	12,60
São José do Rio Preto	978.516.288,12	21,21	7,50	13,08
Tupã	978.575.665,55	11,32	4,00	11,44
Ubatuba	978.809.388,65	4,44	1,57	10,83

Fonte: Autor (2020).

Em Minas gerais, mediante esforços realizados em conjunto com a Universidade Federal de Uberlândia (UFU), o estabelecimento da referência absoluta no estado está em processo de implantação, com mais de 14 estações medidas. O Paraná também tem planos para estabelecer um referencial absoluto de gravidade.

5.2 MEDIÇÕES NA COSTA RICA

A campanha de medições realizada na Costa Rica contou com a participação da Universidad de Costa Rica (UCR) e do Instituto Geográfico Nacional (IGN), além do CENEGEO e da EPUSP. No total, 18 estações foram implantadas e medidas em pontos estratégicos espalhados pelo país, conforme o mapa 3.

Mapa 3 – Estações absolutas na Costa Rica (2019).

Fonte: Autor (2020).

A Costa Rica é um país com alta atividade vulcânica e sismológica. Processos de deformação da crosta causados por falhas geológicas e processos de subducção, além de mudanças na distribuição interna de massa fruto da movimentação do magma, podem modificar os valores de aceleração de gravidade medidos com o passar do tempo.

Pelas condições geofísicas apresentadas, a expectativa ao iniciar a campanha era de realizar medições com alta dispersão de dados. No entanto, aproveitando-se do conhecimento sobre as estruturas geológicas do país, a maioria das estações foi construída sobre uma sólida camada de fluxo piroclástico, que, com os marcos de concreto, garantiram enorme estabilidade

às medições. O resultado foi uma referência com desvio-padrão médio de 8,94 μGal e incerteza final média de 11,39 μGal .

Tabela 3 – Medições na Costa Rica (2019)

Estação	Gravidade (μGal)	Desvio-padrão (μGal)	Precisão (μGal)	Incerteza (μGal)
UCR Ingeniería	977.902.847,91	18,44	5,83	12,2
Aeropuerto Tobías	977.961.008,17	2,98	1,22	10,82
Cerro de la Muerte	977.457.661,67	3,38	1,38	10,81
Buenos Aires	978.046.815,73	5,05	1,79	10,88
UCR Golfito	978.226.043,25	41,59	13,15	16,96
Marina Quepos	978.195.232,39	1,71	0,61	10,73
Esparza	978.151.698,05	9,35	2,96	11,14
Universidad Nacional	978.258.671,00	4,84	1,71	10,87
Liberia	978.190.304,03	3,82	1,21	10,78
Parque Nacional Santa Rosa	978.175.960,54	6,92	2,45	10,99
Bomberos Tilarán	978.088.316,83	17,38	5,5	12,05
Los Chiles	978.240.484,86	10,18	3,22	11,19
EIT Laboratório	977.901.833,89	3,4	1,2	10,8
Sarapiquí	978.169.550,97	1,28	0,52	10,73
Gandoca	978.179.897,80	5,89	1,86	10,88
UCR Limón	978.208.462,95	10,06	3,18	11,18
UCR Turrialba	978.049.133,87	8,96	2,83	11,1
Heredia	977.910.982,85	5,64	1,78	10,88

Fonte: Autor (2020).

A campanha foi realizada durante os meses de janeiro e fevereiro de 2019 com duração total de dez dias. Embora as distâncias entre as estações não fossem tão grandes, a demora no deslocamento foi o principal obstáculo encontrado. A variação do clima em virtude principalmente da diferença de altitude precisou ser levada em consideração no ajuste da temperatura interna do gravímetro A10.

O destaque ficou para a linha de calibração entre UCR Ingeniería e Cerro de la Muerte, com uma diferença de altitude de mais de 2.000 m. Surpreendentemente, um dos pontos mais estáveis foi Quepos, apresentando incerteza final de 10,73 μGal , localizado à beira do oceano Pacífico, em uma marina local.

Figura 26 – Medição na estação de Quepos, Costa Rica.

Fonte: Autor (2019).

Figura 27 – Barraca utilizada na estação de Los Chiles para proteção contra o vento.

Fonte: Autor (2019).

5.3 MEDIÇÕES NO EQUADOR

Os resultados das observações apresentaram desvio-padrão médio de 11,62 μGal e incerteza final média de 11,54 μGal . Algumas reobservações foram realizadas na estação Chimborazo, ao pé do vulcão, além de quatro outras. Os resultados apresentados revelaram concordância com as incertezas associadas das respectivas medições. Na tabela 4, são apresentados os valores finais de g .

Tabela 4 – Medições no Equador (2017)

Estação	Gravidade (μGal)	Desvio-padrão (μGal)	Precisão (μGal)	Incerteza (μGal)
Chimborazo	976.834.449,03	19,87	6,29	12,85
Coca	977.922.852,42	4,14	1,31	10,79
Cuenca	977.311.763,18	3,20	1,01	10,76
Esmeraldas	978.016.458,85	23,62	7,47	13,09
Gualaquiza	977.741.555,50	7,78	2,46	10,99
Guayaquil	978.136.589,54	6,47	2,04	10,91
Hualtaco	977.964.811,58	8,86	2,80	11,08
Ibarra	977.344.888,41	19,39	6,47	12,87
IEE	977.075.085,33	16,77	5,30	11,95
IGM	977.245.471,90	24,36	7,71	13,22
Lago Agrio	977.918.574,89	7,94	2,51	11,00
Libertad	978.096.247,01	9,16	2,90	11,10
Loja	977.447.480,46	6,27	1,98	10,90
Macará	977.986.442,70	4,01	1,27	10,79
Macas	977.616.159,80	6,32	2,00	10,90
Montecristi	978.044.749,72	20,87	6,60	12,58
Pedernales	978.039.607,33	12,74	4,03	11,45
Quevedo	977.980.385,49	12,59	3,98	11,43
Riobamba	977.285.738,18	6,78	2,14	10,92
San Lorenzo	978.011.674,27	9,64	3,41	11,24
Santo Domingo	977.895.756,76	13,23	4,18	11,50
Shell	977.675.931,14	4,81	1,52	10,83
Templete Tribuna	977.210.675,77	6,51	2,06	10,93
Tena	977.812.132,11	10,01	3,17	11,18
Tulcán	977.237.593,15	25,19	7,97	13,36

Fonte: Autor (2020).

Figura 28 – Veículo utilizado para o transporte durante a campanha no Equador.

Fonte: Autor (2017).

Figura 29 – Medição na estação Cotopaxi (IEE), Equador.

Fonte: Autor (2017).

5.4 MEDIÇÕES NA VENEZUELA

A implantação da referência gravimétrica absoluta da Venezuela foi um grande desafio técnico e logístico. Com a possibilidade de transportar o gravímetro por terra, foram percorridos mais de 3.000 km, além de um trecho em uma balsa (figura 30) que conecta as cidades brasileiras de Porto Velho, em Rondônia, e Manaus, no Amazonas.

Figura 30 – Balsa sobre o rio Madeira.

Fonte: Autor (2016).

As estações foram observadas durante o mês de julho de 2016. O mapa 5 mostra suas localizações.

Mapa 5 – Estações absolutas na Venezuela (2016).

Fonte: Autor (2020).

O resultado foi uma referência com 13 pontos medidos e um desvio-padrão médio de $10,09 \mu\text{Gal}$, com incerteza média de $12,10 \mu\text{Gal}$, conforme os valores apresentados na tabela 5.

Tabela 5 – Medições na Venezuela (2015-2016)

Estação	Gravidade (μGal)	Desvio-padrão (μGal)	Precisão (μGal)	Incerteza (μGal)
Ciudad Bolívar	978.115.296,66	3,93	1,39	10,80
Caracas Observatory	978.024.419,35	14,14	5,00	11,82
Caracas USB	977.967.734,67	5,16	1,82	10,87
El Calvario	978.163.622,74	1,27	0,45	10,72
Elorza	978.064.738,46	4,10	1,45	10,81
Junquito	977.794.752,17	4,03	1,43	10,81
La Guaira	978.214.046,52	2,73	0,97	10,76
Maracaibo	978.185.774,43	8,84	3,13	11,16
Maturín	978.003.365,30	2,57	0,81	10,74
Mérida	977.352.183,29	65,39	23,12	25,48
Puerto Ayacucho	978.043.824,53	1,76	0,62	10,73
Santa Elena	977.822.037,47	3,16	1,29	10,79
Santa Inés	978.051.153,91	14,05	4,97	11,81

Fonte: Autor (2020).

Figura 31 – Interior do veículo utilizado na campanha da Venezuela.

Fonte: Autor (2016).

Figura 32 – Medição na estação de Mérida, Venezuela.

Fonte: Autor (2016).

5.5 MEDIÇÕES NA ARGENTINA

A referência gravimétrica absoluta da Argentina foi realizada durante os anos de 2014 e 2016. Foi a mais extensa campanha realizada entre os países trabalhados, contemplando o ponto mais meridional, localizado em Ushuaia. Um total de 38 estações foram estabelecidas em terras argentinas, conforme ilustrado no mapa 6.

Fonte: Autor (2020).

As observações apresentaram desvio-padrão médio de $6,35 \mu\text{Gal}$ e incerteza média final de $11,03 \mu\text{Gal}$, conforme os valores apresentados na tabela 6.

Tabela 6 – Medições na Argentina (2014; 2016)

Estação	Gravidade (μGal)	Desvio-padrão (μGal)	Precisão (μGal)	Incerteza (μGal)
Bahía Blanca	980.046.306	14,69	5,20	11,90
Buenos Aires	980.226.369	8,47	3,00	11,16
Choele Choel	980.080.513	10,89	3,28	11,20
Colón	979.517.745	6,46	2,29	10,95
Comodoro Rivadavia	980.663.785	3,09	1,09	10,77
El Chaltén	980.859.012	5,29	1,67	10,84
Esperanza	981.084.725	2,65	0,94	10,75
Esquel	980.226.369	8,47	3,00	11,16
Fitz Roy	980.722.275	3,90	1,18	10,78
Ituzaingó	979.122.730	13,75	4,84	11,76
La Florida	979.317.072	2,06	0,73	10,74
Laguna Yema	978.882.640	6,99	2,47	10,99
Lihuel Calel	979.874.407	2,32	0,82	10,74
Malargüe	979.325.675	3,31	1,10	10,77
Mendoza	979.199.490	9,30	3,10	11,15
Mercedes	979.239.894	1,10	0,39	10,72
Neuquén	979.965.775	5,39	1,63	10,83
Perito Moreno	980.624.589	8,15	2,88	11,09
Puerto Iguazú	978.905.485	5,44	1,92	10,88
Puerto San Julián	980.993.874	2,30	0,81	10,74
Quimilí	979.123.374	11,58	4,09	11,47
Río Grande	981.417.709	4,68	1,48	10,83
Rioja	979.042.368	8,79	3,11	11,15
Roberts	979.723.615	6,37	2,25	10,95
Rosario	979.548.507	4,70	1,66	10,84
San Antonio Oeste	980.215.206	2,44	0,86	10,75
San Cristóbal	979.327.584	3,72	1,32	10,79
San Juan	979.141.702	0,71	0,24	10,72
San Lorenzo	979.165.412	14,41	5,09	11,86
San Miguel de Tucumán	978.885.908	16,85	5,96	12,26
San Rafael	979.495.639	2,90	0,87	10,75
Tandil	979.903.742	3,22	1,14	10,77
Tres Lagos	980.959.930	5,82	2,00	10,90
Ushuaia	981.465.004	2,21	0,74	10,74
Victoria	979.752.810	12,67	4,48	11,61
Vicuña Mackenna	979.579.983	5,16	1,83	10,87
Villa San Lorenzo	978.409.435	0,98	0,35	10,72
Villa María	979.473.651	10,15	3,59	11,30

Fonte: Autor (2020).

As maiores dificuldades enfrentadas foram as grandes distâncias percorridas e a condição de certas estradas, que, por vezes, demandaram alguns ajustes de alinhamento do *laser*. Nas proximidades da cordilheira dos Andes, a regulação da temperatura dos módulos foi fundamental, dada a variação térmica entre as estações medidas.

Figura 33 – Medição na estação El Zonda, Argentina.

Fonte: Carlos Alberto Monteiro de Almeida (2014).

Figura 34 – Medição na estação Iguazú, Argentina.

Fonte: Carlos Alberto Monteiro de Almeida (2014).

6 CONCLUSÃO

Com relação ao trabalho apresentado, buscou-se reunir referências, conceitos, instrumentos e práticas da medição absoluta da aceleração de gravidade. Discorrendo sobre o funcionamento detalhado do gravímetro A10, as experiências adquiridas durante as campanhas realizadas na América Latina também foram sumarizadas e seus resultados apresentados.

Sob coordenação do Consultative Committee for Mass and Related Quantities (CCM) do Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), em conjunto com a comissão n. 2 da International Association of Geodesy (IAG), responsável pelos modelos de campo de gravidade e suas variações temporais, o Working Group on Gravimetry (WGG), grupo de trabalho dedicado à gravimetria, zela pela qualidade das medições absolutas da aceleração utilizadas no processo de materialização do International Gravity Reference Frame (IGRF). Visando à implementação de padrões e procedimentos metrológicos, o WGG publicou, no ano de 2014, uma estratégia para aproximar as medições absolutas realizadas na prática aos mais altos padrões do Sistema Internacional de Unidades (SI), em termos de tempo e distância auferidos pelos gravímetros absolutos (MARTI *et al.*, 2014).

Segundo essa estratégia, para que uma medição seja validada e incorporada ao banco de dados, é necessário garantir a confiabilidade do equipamento que as produziu. Isso pode ser obtido de algumas maneiras distintas. A primeira é por meio da calibração direta do *laser* e do relógio atômico do gravímetro. Com isso, garante-se a estabilidade do comprimento de onda do *laser* e das oscilações do relógio utilizado.

Uma outra maneira de garantir a confiabilidade de um dado de gravimetria absoluta é realizada por meio da calibração por comparação. Preferencialmente a comparação deve ser feita executando-se medições sobre o mesmo ponto (ou o mais próximo possível), simultânea e sequencialmente, utilizando diversos gravímetros absolutos, denominada Key Comparisson (KC). Dessa maneira, é possível avaliar o desempenho de cada equipamento considerando a média dos resultados como a melhor estimativa do valor real ou acurado de cada ponto. Com isso, pode-se determinar qual é o desvio intrínseco de cada instrumento e também um valor extremamente confiável para as estações medidas (SCHMERGE *et al.*, 2012; JIANG *et al.*, 2013).

Outra forma de realizar uma calibração por comparação é a medição contra uma referência, que pode ser um gravímetro ou uma estação certificada. Caso seja um gravímetro, o mesmo deve possuir uma certificação denominada CMC (Calibration Measure Capability). Caso seja uma estação, a mesma deve possuir observações de longo período com gravímetros

supercondutores e medições periódicas com gravímetros absolutos. Em ambos os casos o gravímetro sob teste, tem seus resultados comparados às referências levando em consideração as incertezas envolvidas na medição (MARTI *et al.*, 2014).

No caso do gravímetro A10 n. 32, foram realizadas duas calibrações/aferições do instrumento nos anos de 2016 e 2019, durante revisões técnicas realizadas na própria fábrica, em Lafayette, no Colorado, Estados Unidos. No ano de 2016, após a substituição de alguns componentes, duas medidas foram realizadas sobre uma estação de controle para garantir a conformidade após os ajustes realizados. Já no ano de 2019, além da calibração por comparação, foi aplicada uma correção no relógio na ordem de 0,004 Hz, estabilizando a frequência de pulsos em 10.000.000,005 Hz. Na calibração do *laser*, os valores corrigidos foram na ordem de 0,069 MHz, estabilizando sua frequência em 632,9919482 nm (MICRO-G LaCOSTE, 2019).

As calibrações por comparação foram realizadas sobre duas estações, denominadas MGL-03 (2019) e MAJ4 (2016), localizadas dentro das instalações da empresa. Essas estações tiveram seus valores de referência estabelecidos por mais de dez gravímetros absolutos do modelo FG-5, além de um gravímetro supercondutor. Os valores observados pelo gravímetro A10 n. 32 são comparados na tabela 7 com os valores de referência para cada estação.

Tabela 7 – Valores observados pelo gravímetro A10 n. 32 nas estações de referência da fabricante (2016; 2019)

Data	Estação	Valor observado (μGal)	Valor de referência (μGal)	Desvio (μGal)
8/3/2016	MAJ4	979.632.918,1	979.632.921,2	3,1
15/3/2016	MAJ4	979.632.922,4	979.632.921,2	-1,2
23/7/2019	MGL-03	979.631.873,1	979.631.877,5	4,4
10/8/2019	MGL-03	979.631.877,3	979.631.877,5	0,2
12/8/2019	MGL-03	979.631.879,8	979.631.877,5	-2,3
13/8/2019	MGL-03	979.631.881,1	979.631.877,5	-3,6
13/8/2019	MGL-03	979.631.883,6	979.631.877,5	-6,1
13/8/2019	MGL-03	979.631.881,5	979.631.877,5	-4,0
15/8/2019	MGL-03	979.631.877,4	979.631.877,5	0,1

Fonte: Autor (2020).

Vale lembrar que a medição do dia 23 de julho de 2019 foi realizada antes dos ajustes e reparos subsequentes e mesmo assim não apresentou desvio fora do esperado. Nos demais resultados, todos apresentaram conformidade com as especificações técnicas do fabricante de aproximadamente 10 μGal de incerteza final.

Mesmo sem a implementação do processo de validação e certificação de uma medida de aceleração absoluta de gravidade por parte da IAG, do BIPM e de seus respectivos grupos de trabalho, o cuidado com o gravímetro A10 n. 32 busca seguir as recomendações e estratégias

metrológicas, por meio das revisões de fábrica e constantes manutenções ao longo dos anos de operação.

Os esforços para a concretização do IGRF ainda estão longe de conhecer seu termo. Muitos países da América Latina ainda não possuem estações gravimétricas absolutas de referência e algumas das redes relativas existentes carecem de campanhas de densificação. A cooperação entre os diversos organismos e instituições, responsáveis pela cartografia nacional de seus respectivos países, é a chave para a realização de novas campanhas. Nesse sentido, a realização desta pesquisa pretende, em um sentido mais prático, subsidiar as futuras ações e aprofundar o conhecimento sobre o tema.

REFERÊNCIAS¹

AGNEW, D. C. Earth tides. In: HERRING, T. (ed.). **Treatise on geophysics, v. 3: geodesy**. Editor-in-chief: G. Schubert. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2015. p. 151-178.

AHRENS, C. D. **Meteorology today: an introduction to weather, climate, and the environment**. 9th ed. Belmont: Brooks/Cole; Cengage Learning, 2009.

BARTHELMES, F. **Definition of functionals of the geopotential and their calculation from spherical harmonic models: theory and formulas used by the calculation service of International Centre for Global Earth Models (ICGEM)**, <http://icgem.gfz-potsdam.de>. Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ); Helmholtz-Zentrum, 2009.

BASKIN, D. K.; JONES, R. W. Prediction of oil gravity prior to drill-stem testing in Monterey Formation reservoirs, offshore California. **The American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, v. 77, n. 9, p. 1479-1487, 1993.

BLITZKOW, D. [Informação verbal]. São Paulo, 2019.

BLITZKOW, D.; MATOS, A. C. O. C. de; GUIMARÃES, G. do N.; COSTA, S. M. A. O conceito atual dos referenciais usados em geodésia. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 63, n. 5, p. 633-648, 2011.

BOBROFF, N. Recent advances in displacement measuring interferometry. **Measurement Science and Technology**, v. 4, n. 9, p. 907-926, 1993.

BOY, J.-P.; LLUBES, M.; HINDERER, J.; FLORSCH, N. A comparison of tidal ocean loading models using superconducting gravimeter data. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 108, n. B4, p. 1-17, 2003.

CASTRO JUNIOR, C. A. C. **Contribuição ao estabelecimento de um sistema gravimétrico para a América do Sul**. 2005. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

CROSSLEY, D.; HINDERER, J.; RICCARDI, U. The measurement of surface gravity. **Reports on Progress in Physics**, v. 76, n. 4, 046010, 2013.

DREWES, H. The geodesist's handbook 2012. **Journal of Geodesy**, v. 86, n. 10, p. 787-974, 2012.

DREWES, H.; KUGLITSCH, F.; ADÁM, J.; RÓZSA, S. The geodesist's handbook 2016. **Journal of Geodesy**, v. 90, n. 10, p. 907-1205, 2016.

DYKOWSKI, P.; KRYŃSKI, J. Quality assessment of the new gravity control in Poland: first estimate. In: JIN, S.; BARZAGI, R. (eds.). **IGFS 2014: proceedings of the 3rd International Gravity Field Service (IGFS)**, Shanghai, China, June 30-July 6, 2014. Cham (Switzerland): Springer, 2016. (International Association of Geodesy Symposia Book Series, 144).

¹ De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 6023).

DYKOWSKI, P.; KRYŃSKI, J.; SEKOWSKI, M. The A10 gravimeter total uncertainty budget estimation: a case study using the A10-020. *In*: RIZOS, C.; WILLIS, Pascal (eds.). **IAG 150 years**: proceedings of the 2013 IAG Scientific Assembly in Potsdam, Germany, 1-6 September, 2013. Cham (Switzerland): Springer, 2016. (International Association of Geodesy Symposia,143).

ELLIS, Brian. [Sem título]. Destinatário: Iuri Moraes Bjorkstrom. [S.l.], 21 jun. 2018a. 1 mensagem eletrônica.

ELLIS, Brian. [Sem título]. Destinatário: Iuri Moraes Bjorkstrom. [S.l.], 29 out. 2018b. 1 mensagem eletrônica.

FALK, R.; MÜLLER, J.; LUX, N.; WILMES, H.; WZIONTEK, H. Precise gravimetric surveys with the field absolute gravimeter A-10. *In*: KENYON, S. C.; PACINO, M. C.; MARTI, U. J. (eds.). **Geodesy for Planet Earth**: proceedings of the 2009 IAG Symposium, Buenos Aires, Argentina, 31 August-4 September 2009. Berlin; Heidelberg: Springer, 2012. (International Association of Geodesy Symposia,136).

FISCHER, I. The figure of the earth: changes in concepts. **Geophysical Surveys**, v. 2, n. 1, p. 3-54, 1975.

FORSBERG, R.; SIDERIS, M. G.; SHUM, C. K. The gravity field and GGOS. **Journal of Geodynamics**, v. 40, n. 4-5, p. 387-393, 2005.

GEMAEL, C. **Introdução à geodésia física**. Curitiba: Editora UFPR, 1999.

GEMAEL, C.; MACHADO, A. M. L.; WANDRESEN, R. **Introdução ao ajustamento de observações**: aplicações geodésicas. 2nd ed. Curitiba: Editora UFPR, 2015.

GERMAK, A.; FRANCIS, O.; BECKER, M.; INGLIS, D.; ROBINSON, I. The 8th International Comparison of Absolute Gravimeters 2009: the first Key Comparison (CCM.G-K1) in the field of absolute gravimetry. **Metrologia**, v. 49, n. 6, p. 666-684, 2012.

GLOBAL GEODETIC OBSERVING SYSTEM (GGOS). Vienna, [2020]. Disponível em: www.ggos.org. Acesso em: 25 jul. 2020.

GWR INSTRUMENTS. iGRAV® gravit sensors. **GWR Instruments**. San Diego, [2020]. Disponível em: www.gwrinstruments.com/igrav-gravity-sensors.html. Acesso em: 25 jul. 2020.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GNSS – Global Navigation Satellite Systems**: GPS, GLONASS, Galileo, and more. Wien: Springer, 2008.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; MORITZ, H. **Physical geodesy**. 2nd ed. Wien: Springer, 2006.

IHDE, J.; SÁNCHEZ, L.; BARZAGHI, R.; DREWES, H.; FOERSTE, C.; GRUBER, T.; LIEBSCH, G.; MARTI, U.; PAIL, R.; SIDERIS, M. Definition and proposed realization of the International Height Reference System (IHRs). **Surveys in Geophysics**, v. 38, n. 3, p. 549-570, 2017.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO); CENTRO DE CAPACITAÇÃO (CICMA); SERVIÇO DE PRODUTOS DE INFORMAÇÃO (SEPIN). **Sistema Internacional de Unidades: SI**. Duque de Caxias, 2012. Disponível em: http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/si_versao_final.pdf. Acesso em: 25 jul. 2020.

INTERNATIONAL EARTH ROTATION AND REFERENCE SYSTEMS SERVICE (IERS). **IERS Annual Report 2015**. Editors: W. R. Dick; D. Thaller. Frankfurt: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2015.

INTERNATIONAL EARTH ROTATION AND REFERENCE SYSTEMS SERVICE (IERS). **IERS Conventions (2010)**. Editors: G. Petit; B. Luzum. Frankfurt: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. (IERS Technical Note, 36).

INTERNATIONAL GRAVITY FIELD SERVICE (IGFS). IGFS services and centres. Thessaloniki, [2020]. Disponível em: <http://igfs.topo.auth.gr/igfs-services-and-centres>. Acesso em: 25 jul. 2020.

JEKELI, C. Potential theory and the static gravity field of the Earth. In: HERRING, T. (ed.). **Treatise on geophysics**, v. 3: geodesy. Editor-in-chief: G. Schubert. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2015. p. 9-35.

JIANG, Z.; PÁLINKÁŠ, V.; ARIAS, F. E.; LIARD, J.; MERLET, S.; WILMES, H.; VITUSHKIN, L.; ROBERTSSON, L.; TISSERAND, L.; SANTOS, F. P. dos; BODART, Q.; FALK, R.; BAUMANN, H.; MIZUSHIMA, S.; MÄKINEN, J.; BILKER-KOIVULA, M.; LEE, C.; CHOI, I. M.; KARABOCE, B.; JI, W.; WU, Q.; RUESS, D.; ULLRICH, C.; KOSTELECKÝ, J.; SCHMERGE, D.; ECKL, M.; TIMMEN, L.; LE MOIGNE, N.; BAYER, R.; OLSZAK, T.; ÅGREN, J.; DEL NEGRO, C.; GRECO, F.; DIAMENT, M.; DEROUSSI, S.; BONVALOT, S.; KRYŃSKI, J.; SEKOWSKI, M.; HU, H.; WANG, L. J.; SVITLOV, S.; KRYŃSKI, J.; OLSZAK, T.; BARLIK, M.; DYKOWSKI, P. New gravity control in Poland: needs, the concept and the design. **Geodesy and Cartography**, v. 62, n. 1, p. 3-21, 2013.

JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY (JCGM). **International Vocabulary of Metrology: Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM)**. 3rd ed. 2008 version with minor corrections. Sèvres, 2012. Disponível em: <https://www.bipm.org/en/publications/guides/vim.html>. Acesso em: 25 jul. 2020.

KRYŃSKI, J.; SEKOWSKI, M. Surveying with the A10-20 absolute gravimeter for geodesy and geodynamics: first results. **Geophysical Research Abstracts**, v. 12, EGU2010-8167, 2010.

LaCOSTE & ROMBERG. **Instruction manual for model G & D gravity meters**. Austin, 2004.

LAURÍA, E. A. **Medición y cálculo de la Red Gravimétrica Nacional: Red Argentina de Gravedad Absoluta**. 2018. 274 f. – Escuela de Agrimensura, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (FCEIA), Universidad Nacional de Rosario (UNR), Rosario, 2018.

LUCERO, Brice. [Sem título]. Destinatário: Iuri Moraes Bjorkstrom. [S.l.], 3 maio 2018.

LUCKE, Oscar. [Sem título]. Destinatário: Iuri Moraes Bjorkstrom. [S.l.], 26 jun. 2019. 1 mensagem eletrônica.

MÄKINEN, J.; SEKOWSKI, M.; KRYŃSKI, J. The use of the A10-020 gravimeter for the modernization of the Finnish First Order Gravity Network. **Geoinformation Issues**, v. 2, n. 12, p. 17-29, 2010.

MARTI, U.; RICHARD, P.; GERMAK, A.; VITUSHKIN, L.; PÁLINKÁŠ, V.; WILMES, H. CCM – IAG strategy for metrology in absolute gravimetry: role of CCM and IAG. *CCM Publications and Bibliography*, p. 1-8, 2014.

MERLET, S.; BODART, Q.; MALOSS, N.; LANDRAGIN, A.; SANTOS, F. P. dos; GITLEIN, O.; TIMMEN, L. Comparison between two mobile absolute gravimeters: optical versus atomic interferometers. **Metrologia**, v. 47, n. 4, p. L9-L11, 2010.

MERRIAM, J. B. Atmospheric pressure and gravity. **Geophysical Journal International**, v. 109, n. 3, p. 488-500, 1992.

MICRO-G LaCOSTE. **A-10 user's manual**. Lafayette, 2012.

MICRO-G LaCOSTE. **Micro-g LaCoste instrument service data report**. Lafayette, 2019.

MICRO-G LaCOSTE. A10 portable absolute gravity meter. **Micro-g LaCoste**, Lafayette, [2020a]. Disponível: <http://microglacoste.com/product/a10-outdoor-absolute-gravimeter>. Acesso em: 25 jul. 2020.

MICRO-G LaCOSTE. FG5-X absolute gravity meters. **Micro-g LaCoste**, Lafayette, [2020b]. Disponível: <http://microglacoste.com/product/fg5-x-absolute-gravimeter>. Acesso em: 25 jul. 2020.

MICRO-G LaCOSTE. gPhoneX gravity meter. **Micro-g LaCoste**, Lafayette, [2020c]. Disponível: <http://microglacoste.com/product/gphonex-gravimeter>. Acesso em: 25 jul. 2020.

MICRO-G LaCOSTE. TAGS-7 dynamic gravity meter **Micro-g LaCoste**, Lafayette, [2020d]. Disponível: <http://microglacoste.com/product/tags-7-dynamic-gravity-meter>. Acesso em: 25 jul. 2020.

MORELLI, C.; GANTAR, C.; HONKASALO, T.; McCONNEL, R. K.; TANNER, J. G.; SZABO, B.; UOTILA, U.; WHALEN, C. T. **The International Gravity Standardisation Net 1971 (IGSN71)**. Paris: Bureau Central de l'Association Internationale Géodésique, 1974. (Publication Spéciale, 4).

MUQUANS. **Absolute Quantum Gravimeter**: a free-fall absolute gravimeter based on laser-cooled atoms. Talence: Institut d'Optique d'Aquitaine, 2019. (μQUANS Precision Quantum Sensors). Disponível em: https://www.muquans.com/wp-content/uploads/2019/03/muquans_aqg.pdf. Acesso em: 25 jul. 2020.

NIEBAUER, T. M. The effective measurement height of free-fall absolute gravimeters. **Metrologia**, v. 26, n. 2, p. 115-118, 1989.

NIEBAUER, T. M. Gravimetric methods: absolute and relative gravity meter: instruments concepts and implementation. *In: HERRING, T. (ed.). Treatise on geophysics, v. 3: geodesy.* Editor-in-chief: G. Schubert. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2015. p. 37-57.

NIEBAUER, T. M.; SASAGAWA, G. S.; FALLER, J. E.; HILT, R.; KLOPPING, F. A new generation of absolute gravimeters. **Metrologia**, v. 32, n. 3, p. 159-180, 1995.

NISHIJIMA, J.; UMEDA, C.; FUJIMITSU, Y.; TAKAYAMA, J.; HIRAGA, N.; HIGUCHI, S. Repeat absolute and relative gravity measurements for geothermal reservoir monitoring in the Ogiri Geothermal Field, Southern Kyushu, Japan. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, n. 42, 0122004, 2016.

OMOSANYA, K. O.; MOSURO, G. O.; LANIYAN, T. A.; OGUNLEYE, D. Prediction of gravity anomaly from calculated densities of rocks. **Advances in Applied Science Research**, v. 3, n. 4, p. 2059-2068, 2012.

ÖSTERREICHISCHE GEODÄTISCHE KOMMISSION (ÖGK). Conrad Observatory: Trafelberg. **Österreichische Geodätische Kommission**, Wien, 2009. Disponível em: <http://www.oegk-geodesy.at/austria/archives-2009-trafelberg.html>. Acesso em: 25 jul. 2020.

PETIT, G.; LUZUM, B. (eds.). **IERS conventions (2010)**. Frankfurt, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. (IERS Technical note n. 36). Disponível em: <https://www.iers.org/IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/TechnicalNotes.html>. Acesso em: 25 jul. 2020.

ROOT, B. C. The gravimeter of professor Vennig Meinesz. **DeepEarthScience**, 1^o jun. 2016. Disponível em: <http://deepearthscience.blogspot.com/2016/06/the-gravimeter-of-professor-venning.html>. Acesso em: 25 jul. 2020.

ROZENBERG, I. M. **O Sistema Internacional de Unidades: SI**. 3. ed. São Paulo: Instituto Mauá de Tecnologia, 2006.

RUMMEL, R.; HIPKIN, R. G. (eds.). **Gravity, gradiometry, and gravimetry**: symposium n. 103, Edinburgh, Scotland, August 8-10, 1989. New York: Springer, 1990. (International Association of Geodesy Symposia, 103).

SÁNCHEZ, L.; SIDERIS, M. G. Vertical datum unification for the International Height Reference System (IHRs). **Geophysical Journal International**, v. 209, n. 2, p. 570-586, 2017.

SCHMERGE, D.; FRANCIS, O.; HENTON, J.; INGLES, D.; JONES, D.; KENNEDY, J. R.; KRAUTERBLUTH, K.; LIARD, J.; NEWELL, D.; SANDS, R.; SCHIEL, J.; SILLIKER, J.; VAN WESTRUM, D. Results of the first North American comparison of absolute gravimeters, NACAG-2010. **Journal of Geodesy**, v. 86, n. 8, p. 591-596, 2012.

SCINTREX. **CG-5 Scintrex Autograv™ System Operation Manual**. Concord, 2012.

SEIGEL, H. O. **A guide to high precision land gravimeter surveys**. Concord: Scintrex Limited, 1995.

SILVA, I. da. **História dos pesos e medidas**. 2. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2010.

TEFERLE, F. N.; BINGLEY, R. M.; WILLIAMS, S. D. P.; BAKER, T. F.; DODSON, A. H. Using continuous GPS and absolute gravity to separate vertical land movements and changes in sea-level at tide-gauges in the UK. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 364, n. 1841, p. 917-930, 2006.

TORGE, W. **Geodesy**. 3rd ed. Berlin: W. de Gruyter, 2001.

TORGE, W. The International Association of Geodesy 1862 to 1922: from a regional project to an international organization. **Journal of Geodesy**, v. 78, n. 9, p. 558-568, 2005.

VAN CAMP, M. Efficiency of tidal corrections on absolute gravity measurements at the Membach station. **Proceedings of the Workshop IMG2002**, v. 10, n. table 1, p. 99-103, 2003.

VAN CAMP, M.; DE VIRON, O.; PAJOT-MÉTIVIER, G.; CASENAVE, F.; WATLET, A.; DASSARGUES, A.; VANCLOOSTER, M. Direct measurement of evapotranspiration from a forest using a superconducting gravimeter. **Geophysical Research Letters**, v. 43, n. 19, p. 10225-10231, 2016.

VAN DAM, T. M.; FRANCIS, O. Two years of continuous measurements of tidal and nontidal variations of gravity in Boulder, Colorado. **Geophysical Research Letters**, v. 25, n. 3, p. 393-396, 1998.

ZLS CORPORATION. Burris Gravity Meter™ for Land Applications. **ZLS Corporation**, Austin, [2020]. Disponível em: http://zlscorp.com/?page_id=33. Acesso em: 25 jul. 2020.

APÊNDICE A – A10: INSTRUÇÕES E PROCEDIMENTOS DE APOIO

A.1 FERRAMENTAS E ACESSÓRIOS

É imperativo que, durante qualquer regulagem que envolva a retirada da tampa do gravímetro A10, este esteja em um ambiente abrigado e livre de poeira e que o operador esteja com as mãos lavadas e as ferramentas a serem utilizadas limpas.

Para a realização da maioria das leituras e regulagens do gravímetro A10, é necessário um conjunto de ferramentas e acessórios. Entre as ferramentas, as mais utilizadas são as chaves Allen, Phillips e de fenda. Quanto aos acessórios, são três: um multímetro, um potenciômetro e um espectrômetro.

O multímetro digital é um aparelho de medição capaz de auferir a medida de unidades de corrente, tensão, capacitância e resistência elétrica, entre outras grandezas. No A10, a leitura mais corriqueira é a tensão dos circuitos elétricos, realizada no modo de corrente contínua (DC; do inglês, *direct current*). Para facilitar a verificação de parâmetros de funcionamento do equipamento, outras grandezas, como temperatura e corrente elétrica, tiveram suas unidades de medida convertidas em tensão elétrica. Por exemplo, a temperatura do *laser*, do Módulo de Interferometria (MI) e do Módulo de Queda Livre (MQL), é obtida no multímetro multiplicando-se a leitura por 100. Isso significa que 0,422 V é equivalente a 42,2°C de temperatura.

O potenciômetro é utilizado para medir a potência do *laser*. Para isso, utiliza-se um tubo para alinhar o feixe de *laser* no sensor do potenciômetro. Isso é realizado acoplando o colimador e o sensor nas extremidades do tubo. Caso o tubo possua uma lente polarizadora, deve-se regular a lente para a maior potência possível e travá-la nessa posição. O potenciômetro não possui regulagens para a operação. A quantidade de luz é apresentada na tela em microwatts (μW), uma vez que o aparelho seja conectado e ligado.

O espectrômetro é utilizado para a verificação das franjas interferométricas e para outras regulagens que podem ser monitoradas por intermédio de parâmetros de resposta às ondas eletromagnéticas. Ele possui uma série de regulagens, a depender do uso pretendido. A presença de duas entradas, A e B, permite verificações simultâneas. Para a verificação das franjas, utiliza-se somente uma das duas entradas. A configuração do tipo de corrente elétrica deve ser ajustada para alternada (AC; do inglês, *alternating current*) no menu Options, deixando Full e Probe em 1:1. No gráfico, deve-se ajustar a escala do eixo X para 2 μs e a do eixo Y para 1 V.

Alternativamente, pode-se apertar o botão Auto para que as escalas se ajustem automaticamente.

A.2 MÓDULO DE INTERFEROMETRIA

A.2.1 Regulagem da temperatura

O controle de temperatura tanto do *laser* como do próprio MI é realizado por meio de um sistema composto de pequenos radiadores, ativados por corrente elétrica e monitorados por um termostato. Toda vez que a temperatura programada é atingida, a corrente é interrompida. Uma vez que o conjunto se resfrie, os radiadores são novamente ativados para manter o equilíbrio térmico. O controle desse termostato é realizado por dois parafusos localizados no interior da caixa de circuitos do MI. Na figura A.1, a caixa de circuitos está aberta e a temperatura está sendo monitorada diretamente na placa.

Figura A.1 – Detalhe do *box* de circuitos do Módulo de Interferometria (MI).

Fonte: Autor (2018).

Geralmente, a caixa de circuitos fica coberta por uma tampa protetora. Para facilitar a eventual regulagem de temperatura, na lateral do *box* existem três conexões que permitem seu monitoramento pelo multímetro, sem retirar a tampa. Esta também possui dois orifícios que permitem acessar os parafusos de regulagem com uma chave de fenda.

A.2.2 Limpeza do conjunto óptico

Para realizar a limpeza dos componentes ópticos, deve-se ter em mãos um *spray* de ar comprimido, uma bisnaga de álcool anidro ou benzina, algodão e uma vareta de madeira de 15 cm. Para a limpeza da ponta da fibra óptica, deve-se desrosquear sua ponta e, com cuidado, removê-la do adaptador.

Figura A.2 – Limpeza da fibra óptica.

Fonte: Lucero (2018).

Depois de sua remoção, deve-se utilizar a bisnaga de álcool para limpar a fibra, com pequenos jatos. É necessário utilizar o algodão enrolado na ponta da vareta para tirar o excesso. Em seguida, utilizar o *spray* de ar para remover eventuais partículas e secar completamente a fibra.

Para a limpeza dos demais componentes ópticos, deve-se umedecer o algodão com álcool e passá-lo gentilmente sobre a superfície do objeto. É importante garantir que o algodão não esteja encharcado, de modo que nenhuma gota de álcool respingue sobre outros componentes.

A.2.3 Alinhamento da fibra óptica

Para obter a potência necessária para uma medição, deve-se alinhar a fibra óptica ao *laser* por meio do conjunto de cinco eixos.

Figura A.3 – Detalhe do conjunto de cinco eixos.

Fonte: Lucero (2018).

Esse é um procedimento extremamente delicado, em que o sucesso é fruto da paciência. Com o potenciômetro encaixado no tubo polarizador e este regulado para sua máxima potência, deve-se iniciar uma sequência de interações entre os cinco eixos até que se obtenha uma potência maior que $250 \mu\text{W}$.

Em uma situação em que a potência não está longe do valor desejado, é recomendado que se atue inicialmente no conjunto dos eixos Z. Como o sistema é extremamente delicado, atuar nos eixos X e Y (transladar) pode implicar uma perda significativa de potência, caso o operador não tenha certa experiência.

Já em uma situação de completo desalinhamento da fibra, por exemplo, quando se regula a polarização, a leitura do potenciômetro fica próxima de zero. Nesses casos, deve-se desrosquear o colimador da extremidade do tubo e olhar o feixe do *laser* diretamente na lente do colimador. É um processo demorado até que se alcance algum brilho, mas deve-se ter muito cuidado. Uma vez que o *laser* é alinhado à fibra, por menor que seja a potência resultante, o operador deve retirar imediatamente os olhos do colimador, para evitar danos à visão. A partir desse momento, deve-se recolocar o colimador na extremidade do tubo e voltar e realizar a leitura por meio do potenciômetro. Atuando sucessivamente nos eixos X, Y e Z, deve-se alcançar a potência desejada.

A.2.4 Regulagem da polarização

A polarização do *laser* está relacionada com sua entrada e sua saída da fibra óptica, a partir de sua fonte emissora. O procedimento a seguir instrui o operador em como posicionar a fibra sobre o *laser*, de modo a garantir a correta polarização do conjunto. Como não se pode rotacionar o *laser*, o ajuste é feito no conjunto dos cinco eixos. Primeiramente, devem-se soltar os três parafusos pretos indicados na figura A.4.

Figura A.4 – Detalhe dos parafusos.

Fonte: Lucero (2018).

Feita a operação, a fibra deve girar livremente. Uma alternativa é marcar com uma caneta a posição inicial da fibra com relação à plataforma dos parafusos, para manter o controle de rotação. Outro cuidado é manter os parafusos levemente apertados, mas de tal modo que a fibra ainda possa rotacionar. Dessa forma, será fácil apertar novamente o conjunto sem que a fibra também rotacione, eventualmente além do desejado. Uma vez que se soltem os parafusos, é muito provável que se perca o alinhamento do feixe de *laser* na fibra, já que todo o conjunto dos eixos se solta. Consequentemente perde-se a potência. Assim, será necessário alinhar novamente o *laser* na fibra após cada rotação aplicada.

Para saber que posição deverá ser adotada para a fibra, deve-se realizar o teste de rejeição com o auxílio de um tubo polarizador, conforme ilustra a figura A.5.

Figura A.5 – Tubo polarizador.

Fonte: Autor (2018).

Depois de rotacionar a fibra, apertar os parafusos e alinhar o *laser* novamente ao conjunto, deve-se regular o polarizador do tubo até que se obtenha a maior potência, por exemplo, $40,2 \mu\text{W}$. Em seguida, deve-se regular novamente o polarizador para que se obtenha a menor potência, por exemplo, $0,44 \mu\text{W}$. Com a menor potência regulada, deve-se segurar gentilmente a fibra para transferir o calor das mãos. Isso deve fazer com que o valor obtido no potenciômetro flutue em virtude da perturbação causada na fibra, por exemplo, $0,14 \mu\text{W}$. Com os valores devidamente anotados, deve-se calcular a taxa de rejeição por meio da seguinte expressão:

$$Mp/(mr - Mr) \geq 100$$

Na expressão, Mp é o valor da maior potência encontrada, Mr é o valor da máxima rejeição (fibra perturbada) e mr é o valor da mínima rejeição de potência. Utilizando os valores dos exemplos citados anteriormente, a expressão ficaria:

$$40,2/(0,44 - 0,14) = 134 \text{ (ok!!!)}$$

Caso se obtenha uma taxa menor que 100, deve-se rotacionar a fibra novamente, alinhar o *laser* e recalcular até que um valor melhor ou igual seja obtido.

A.2.5 Regulagem do fotodiodo

Na parte superior do MI, o *laser* segue um duplo trajeto através de um prisma: parte do feixe segue na vertical para incidir no prisma da queda livre; parte segue em um fotodiodo (um pequeno cilindro de metal) que pode ser visto na parte traseira da placa eletrônica verde. Colocando um papel, pode-se observar o *laser* na direção do diodo, ou seja, no meio do pequeno círculo, conforme mostra a figura A.6.

Figura A.6 – Ponto no fotodiodo.

Fonte: Autor (2018).

A centragem propriamente dita precisa ser feita eletronicamente. Para garantir essa condição, deve-se seguir o procedimento seguinte. Liga-se o voltímetro no pino Analog Fringes na parte externa da base do MI. Deve-se ler um valor da ordem de $-1,0$. Caso isso não ocorra, é necessário atuar primeiramente nos dois parafusos do espelho em 45° indicados na figura A.7.

Figura A.7 – Parafusos do espelho.

Fonte: Lucero (2018).

Enquanto se monitora o multímetro, devem-se ajustar os dois parafusos, de modo a obter o valor mais negativo possível. Feito isso, é preciso executar um procedimento de regulagem dos espelhos, utilizando como referência a posição da chave Allen. Partindo da posição em que a leitura é a mais negativa possível, deve-se girar a chave no sentido anti-horário até que se obtenha o valor zero no multímetro. Em seguida, é necessário anotar a posição da chave. Feito isso, deve-se repetir o procedimento girando a chave no sentido horário dessa vez. Na sequência, é preciso anotar a posição da chave. Utilizando essas duas posições anotadas da chave Allen, deve-se, finalmente, girar o parafuso para que a chave fique no meio. Ao imaginar um relógio cujas leituras anotadas da posição da chave fossem equivalentes a 2 h e 9 h, por exemplo, a posição mediana seria 5h30.

A.2.6 Nivelamento do Módulo de Interferometria

Conforme exposto no quarto capítulo desta dissertação, o primeiro processo de nivelamento é o do MI. Caso não se observe que os valores de x e y se aproximem de zero ao se acionar o autonivelamento, podem-se realizar alguns testes no modo manual. Para isso, deve-se assegurar que o autonivelamento esteja ligado. Feito isso, coloca-se o botão x/y no modo Manual X e, posteriormente, deve-se girar o botão para mais ou menos, de modo a regular a

inclinação do eixo para um valor próximo de zero. Na sequência, é preciso realizar o mesmo procedimento para o eixo Y. Caso o problema persista, é provável que o pêndulo ou o circuito elétrico a ele atrelado esteja danificado.

A.2.7 Verticalização do *laser*

Caso o *laser* esteja com um grande desvio da vertical, é provável que não se consiga verticalizá-lo por intermédio dos botões externos de regulação presentes no topo do MI. Nesse caso, é necessário retirar a tampa do MI e, com o auxílio de um prato de madeira furado no meio, apoiar a luneta e atuar em uma em L para verticalizar o *laser*. Cada extremidade dessa peça regula a inclinação do *laser* em um dos eixos (X e Y).

A.3 MÓDULO DE QUEDA LIVRE

A.3.1 Estabelecimento do vácuo

O vácuo se torna necessário quando a bomba de íons é desligada por muito tempo, como no caso de transporte aéreo ou desligamento completo do MQL. Essa operação pode levar de algumas horas até poucos dias, dependendo de quanto tempo a bomba de íons tiver permanecido desligada. Inicia-se o vácuo com a bomba de íons desligada.

Para fazer o vácuo, é necessário baixar as hastes e elevar o MQL, de modo que a conexão com a bomba de vácuo se torne adequada. Deve-se assegurar que a válvula de ar da câmara de vácuo esteja fechada (sempre está). Em seguida, inicia-se a retirada das tampas dos conectores e procede-se ao encaixe do tubo de conexão entre a bomba e com a câmara de vácuo. Deve-se posicionar a bomba levando em consideração o encolhimento do tubo, de modo que não haja tensão na conexão.

Ligando a bomba, uma luz azul ficará piscando e um som parecido a uma turbina de avião será ouvido. O som ficará cada vez mais agudo e, após algum tempo, a luz azul cessará de piscar. A partir desse momento, pode-se iniciar a abertura da válvula de forma lenta e gradual, sempre se observando se a luz azul volta a piscar. Se isso ocorrer, volta-se a fechar a válvula; aguardam-se alguns minutos e inicia-se o procedimento novamente. A abertura da válvula deverá ser realizada inicialmente em pequenas amplitudes de volta, sempre atentando para o som da bomba e observando a luz azul. Com esta permanecendo fixa, passa-se a abrir mais generosamente até o fim. Depois de certo período de funcionamento, que pode ser de horas

ou poucos dias, monitoram-se a voltagem e a corrente da bomba de íons. Para tanto, liga-se a chave da bomba de íons na estação central, verificam-se os valores de corrente e de voltagem no multímetro. (As bombas de ar e de íons não devem permanecer ligadas simultaneamente por tempo prolongado.) Em condições operacionais, a corrente deve ficar abaixo de 0,5 A e a voltagem entre 3.800 V e 3.900 V. Ao longo do processo de estabelecimento do vácuo, esses valores podem ser menos rigorosos, sobretudo a corrente que pode estar entre 0,5 A e 1,0 A. Ao ligar a bomba de íons, se os valores estiverem fora do prescrito, principalmente se a voltagem estiver abaixo de 3.600 V, deve-se desligá-la e manter por mais tempo a bomba de ar funcionando exclusivamente.

Ao se constatarem valores de voltagem e de corrente dentro dos limites aceitáveis, inicia-se o processo de fechamento vagaroso da válvula. A cada fração pequena de volta, verificam-se a corrente e a voltagem. Segue-se o procedimento desde que os valores se mantenham; em caso contrário, para-se o processo de fechamento, retornando levemente a abertura da válvula, e aguardam-se instantes. Se o processo de vácuo estiver avançado, a tendência é equilibrar os valores de corrente e voltagem. Fecha-se mais uma fração de volta mantendo o monitoramento. A constatação da constância nos valores de corrente e voltagem indica que a válvula pode ser fechada com uma amplitude maior. Sempre monitorando os referidos valores, completa-se o fechamento da válvula. Ainda se mantém a bomba de ar ligada. Permanece-se monitorando os valores por cerca de 20 min. Se o processo do vácuo ainda não for suficiente, pode ocorrer de os valores se alterarem, ou seja, a corrente aumentar e a voltagem diminuir. Deve-se, então, abrir de imediato e continuamente a válvula, desligar logo em seguida a bomba de íons e aguardar por mais algumas horas, repetindo em seguida o procedimento.

A.3.2 Ajuste da voltagem da bomba de íons

Para regular a voltagem das placas dentro da bomba de íons, é necessário acessar a placa de circuitos na parte externa da câmara de vácuo, conforme a figura A.8.

Figura A.8 – Placa de circuitos da bomba de íons.

Fonte: Micro-g LaCoste (2019).

Em primeiro lugar, é preciso garantir a conexão do cabo de alta-tensão entre ExtPow e a bomba de íons (cabo vermelho e preto). Com a bomba de íons ligada e o multímetro em +VCC e GND, deve-se ajustar o R1 até que seja exibida a voltagem de 3,8 V.

Depois, é necessário desligar a bomba de íons na central de controle, desconectar o cabo vermelho e preto da bomba de íons e garantir que essa extremidade não esteja tocando em nada. Em seguida, deve-se voltar a ligar a bomba de íons na central de controle. Agora com o multímetro em GND e Imon, é preciso regular o R10 até que seja exibida a voltagem de 0 V. Na sequência, deve-se desligar a bomba de íons novamente, reconectar o cabo de alta-tensão (vermelho e preto) e religar a bomba na central.

Para monitorar a voltagem e a corrente diretamente nas placas, é necessário conectar o multímetro em GND e Imon, a fim de monitorar a corrente, e em HVmon, a fim de monitorar a voltagem. Os valores de leitura de corrente devem estar abaixo de 0,200 V e os valores para a voltagem devem estar entre 3,8 V e 4 V, valores correspondentes a 3,8 kV e 4,0 kV.

A.3.3 Ajuste do perfil de queda

Caso a massa de teste esteja entrando em contato com a MQL, certos ajustes podem ser realizados. Para isso, um gráfico do perfil de queda deve ser obtido.

Primeiramente, deve-se garantir que o gravímetro esteja montado e alinhado corretamente, conferindo se as conexões Analog do MI estão conectadas ao T-Connector e se este tem a conexão com o In/Out da parte traseira do Drop Controller. Em seguida, é necessário conectar o Channel A do osciloscópio em Sphere, na parte frontal do Drop Controller. O osciloscópio deve estar configurado segundo a figura A.9.

Figura A.9 – Regulagens do espectrômetro.

Fonte: Autor (2018).

Deve-se pressionar Reset/Init para acender a luz do Drop na parte frontal do Drop Controller. Em seguida, aperta-se o Trigger, primeiro para que a massa levante e novamente para que ela caia. O perfil somente é gerado após a queda. Na central de controle, é preciso remover a tampa da caixa de circuitos e localizar o R56, pós-*gain*. Em seguida, deve-se ajustar sempre com um quarto de volta por vez. Deve-se localizar o R64 pós-*damp* e ajustá-lo com não mais que meia volta, conforme a figura A.10. Enquanto são realizados os ajustes, é preciso monitorar o perfil de queda até que se assemelhe com a figura A.11.

Figura A.10 – Placa de circuitos do Dropper.

Fonte: Ellis (2018b).

Figura A.11 – Perfil de queda desejado.

Fonte: Micro-g LaCoste (2018).

A.3.4 Nivelamento do Módulo de Queda Livre

O nivelamento do MQL é realizado mediante a leitura das franjas, conforme exposto anteriormente. O MQL é colocado sobre o MI por meio de três apoios reguláveis. Se a leitura

das franjas (sem desacoplar) não estiver boa (baixa amplitude e respiro), será necessário transladar e nivelar os três pés de apoio.

Para a transladação do MQL sobre seus pés de apoio, é necessário soltar os três conjuntos de três parafusos que estão contra a base. Uma vez liberado, movimenta-se gentilmente o cilindro todo para conseguir centralizar o módulo. Isso implica obter uma amplitude adequada das franjas, ou seja, próxima de 4,0 V.

Figura A.12 – Detalhe dos pés de apoio do MQL.

Fonte: Autor (2018).

Nos casos de respiro, deve-se afrouxar somente a ruela superior (amarela) de dois dos três parafusos de apoio, usando a chave especialmente destinada para isso. Eles afrouxam no sentido horário. Na sequência, gira-se com os dedos a parte inferior para um lado e para outro olhando para as franjas e certificando-se de que a situação melhore. Quando o desnivelamento é muito grande, é possível que, acionando um apoio, ele melhore um pouco, mas não que atinja o ideal. Aciona-se, então, o outro apoio, fazendo o mesmo procedimento até que se chegue ao ponto ideal. (Dado o peso do gravímetro, fica difícil girar o botão quando apoiado. Para isso, levanta-se levemente o MQL com uma mão e gira-se com a outra, abaixando em seguida para ver o resultado, pois é claro que, ao ser levantado, ocorre desnivelamento. Trata-se de uma operação delicada, que precisa ser feita com cuidado. Admitindo-se que em algum momento se nivele o MQL como explicado antes, ele não se desnivelará facilmente.

A.4 PROBLEMAS E SOLUÇÕES

A.4.1 Present Command

Pode acontecer de o computador não reconhecer como *hardware* externo o Time Interval Analyzer (TIA) – ou melhor, o TIA *card*. Para garantir que a conexão esteja conforme os padrões, é possível realizar uma checagem.

No Command Prompt do MS Windows, deve-se digitar a seguinte sentença e depois pressionar a tecla Enter:

```
C:\Program Files\Guide\GT65XPCI\BIN>presente 0 ..\fpga
```

Caso o *software* e o *hardware* estejam funcionando corretamente, o Command Prompt apresentará uma tabela com os parâmetros de leitura do TIA *card*, conforme a figura A.13.

Figura A.13 – Present Command.

```

C:\Windows\system32\cmd.exe
Microsoft Windows [Version 6.1.7601]
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. All rights reserved.

C:\Users\FG5-302>cd C:\
C:\>cd "Program Files"
C:\Program Files>cd Guide
C:\Program Files\Guide>cd GT65XPCI
C:\Program Files\Guide\GT65XPCI>cd BIN
C:\Program Files\Guide\GT65XPCI\BIN>present 0 ..\fpga
Initializing, loading and calibrating the instrument...

+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| Channel | Center | Input Signal | Neg Peak | Input Signal | End point |
|         |        | Pos Peak    |          | Frequency    |           |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| 0       | 2.536  | 2.533       | 2.539    | DC Signal    |           |
| 1       | 0.005  | 0.004       | 0.007    | No Signal    |           |
| ARM     | -0.059 | -0.116      | -0.001   |              |           |
| CLK     | -0.059 | -0.118      | 0.001    |              |           |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+

C:\Program Files\Guide\GT65XPCI\BIN>

```

Fonte: Ellis (2018a).

Se a visualização da tabela com os dados não ocorrer, provavelmente há um problema de comunicação entre o computador e o cartão. É preciso checar todas as conexões e garantir que os *drivers* estejam corretamente instalados.

A.4.2 Visualização da luneta

Caso o *laser* esteja demasiadamente fora da direção vertical, é possível que, na utilização da luneta, não se enxergue o ponto em seu visor. Para corrigir a situação, deve-se usar um pedaço de papel branco para tentar identificar em que direção ocorreu sua deriva. Observando o caminho percorrido pelo feixe de *laser* no conjunto óptico da luneta, interrompe-se momentaneamente o trajeto do *laser* com a folha de papel, na tentativa de nela visualizar a divergência entre o ponto projetado e o refletido pelo álcool.

A.4.3 Problemas nas franjas

Caso as franjas não apareçam no espectrômetro, depois de realizados os procedimentos corretos de conexão e operação, deve-se checar se a MQL está no modo OSC e se a massa de teste está se movendo (barulho do motor). Também é preciso certificar-se de que a orientação da MQL esteja correta sobre o MI. Só há uma posição correta em que as maçanetas são coincidentes e uma das hastes de apoio da MQL fica na frente do botão de destrave da supermola (SS; do inglês, *superstring*). É preciso garantir que a configuração do espectrômetro esteja correta. Na dúvida, pode-se apertar o botão automático, a fim de que ele ajuste os eixos para as amplitudes apresentadas. É importante checar se não há nenhum fusível queimado na central de controle. Por fim, é necessário verificar se há TTL Fringes – Transistor-Transistor Logic (TTL). Para isso, deve-se conectar o multímetro na saída TTL localizada na base do MI e colocar a MQL em modo de oscilação. As franjas TTL apresentarão uma onda quadrática em vez de senoidal.

Caso se verifique uma onda TTL, é possível que seja necessária a regulagem do fotodiodo.

A.4.4 Alta dispersão das observações

Caso as medições apresentem alto desvio-padrão, pode-se suspeitar inicialmente de dois fatores, ademais das condições de ruído da própria estação. O primeiro é se o Laser Lock está acionado. O segundo é se a SS está destravada e devidamente zerada. Caso os valores persistam, é recomendada a calibração do equipamento pela fabricante.