

ANÁLISE CRÍTICA DAS FONTES DE INCERTEZA ASSOCIADAS À MEDIÇÃO DA  
ACELERAÇÃO DA GRAVIDADE TERRESTRE NO LABORATÓRIO DE  
GRAVIMETRIA DO OBSERVATÓRIO NACIONAL

Rodrigo Lima Melhorato

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica do Observatório Nacional/MCTI, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Grau de Mestre em Geofísica.

Orientador: Mauro Andrade de Sousa

Rio de Janeiro

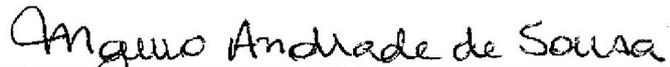
Janeiro de 2015

"ANÁLISE CRÍTICA DAS FONTES DE INCERTEZA ASSOCIADAS A MEDIÇÃO  
DA GRAVIDADE TERRESTRE NO LABORATÓRIO DE GRAVIMETRIA DO  
OBSERVATÓRIO NACIONAL"

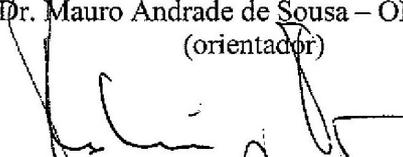
RODRIGO LIMA MELHORATO

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-  
GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA DO OBSERVATÓRIO NACIONAL COMO PARTE  
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE  
EM GEOFÍSICA.

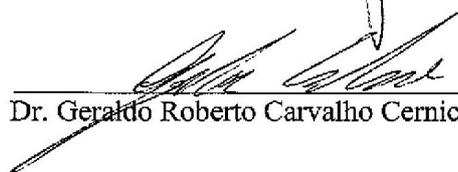
Aprovada por:



Dr. Mauro Andrade de Sousa – ON/MCTI  
(orientador)



Dr. Andrés Reinaldo Rodríguez Papa – ON/MCTI



Dr. Geraldo Roberto Carvalho Cernicchiaro – MCTI/CBPF



Dr. Mauricio Nogueira Frota – PUC- RJ

RIO DE JANEIRO – BRASIL

26 DE JANEIRO DE 2015

Melhorato, Rodrigo Lima

Análise Crítica das Fontes de Incerteza Associadas à Medição da Aceleração da Gravidade Terrestre no Laboratório de Gravimetria do Observatório Nacional/Rodrigo Lima Melhorato. – Rio de Janeiro: ON/MCTI, 2015.

108 p.: il.

Orientador: Mauro Andrade de Sousa

Dissertação de Mestrado – ON/MCTI/Programa de Pós-Graduação em Geofísica, 2015.

Referências Bibliográficas: p. 57 – 59.

1. Calibração de gravímetros. 2. Análise crítica das fontes de incerteza. 3. Rastreabilidade metrológica. I. Sousa, Mauro Andrade de. II. Observatório Nacional/MCTI, Programa de Pós-Graduação em Geofísica. III. Análise Crítica das Fontes de Incerteza Associadas à Medição da Aceleração da Gravidade Terrestre no Laboratório de Gravimetria do Observatório Nacional.

*“It is better to be roughly right than precisely wrong”*

*John Maynard Keynes.*

# Agradecimentos

À Deus em primeiro lugar.

À minha família, principalmente aos meus pais, que me deram força e coragem para persistir nesta caminhada.

À minha amada Alana Kock, pelo carinho e compreensão nos momentos tão distantes que tivemos que dividir durante o mestrado.

Aos colegas de apartamento, José Carlos Vieira Aguiar e Hugo Ritt, pelos momentos de alegria, companheirismo, amizade e frustrações financeiras que dividimos.

Ao grande amigo Sandrigo Sorti, pelas palavras de força e por sempre acreditar no meu trabalho.

À amiga Evelyn Kivitz, pela revisão dos textos em inglês, quando precisei.

À CAPES e ao CNPq, pelos recursos financeiros concedidos.

À Comissão de Pós-Graduação em Geofísica, pela atenção quando precisei.

Ao Dr. Geraldo Cernicchiaro, do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, por encaminhar-me ao Observatório Nacional.

Ao Dr. Mauro Andrade de Sousa, pela orientação e pelo período de aprendizagem no Laboratório de Gravimetria.

Ao Dr. Andrés Reinaldo Rodriguez Papa, pela amizade e por sempre se colocar a disposição.

Às colegas da secretaria da COGE, Selma e Raissa.

Ao colega Dirlei Ferreira, pela boa conversa diária e amizade construída neste período de ON.

Meus eternos agradecimentos à Olivia Woyames Pinto, pela sua colaboração na análise de incerteza e revisão do Capítulo 4.

Ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Geofísica, pela contribuição na minha formação acadêmica.

Aos colegas Helber Macedo, Michel Torres e Patrícia Rosa, da Pós-Graduação em Geofísica.

Ao grande colega Maciel, o famoso “Vidão”, e à nossa galera do almoço: Germano, Roberto, Kennedy e Helder.

Ao colega Juarez Lourenço, pelas críticas na revisão do texto.

Aos colegas do LabGrav/ON, José Farias de Albuquerque e Joelson Moreira, pelos momentos de aprendizagem no laboratório e em trabalhos de campo, e também pelos momentos de descontração nas horas vagas.

Aos colegas do Observatório Magnético de Vassouras, Alberto dos Santos e Vitor Bernardes.

Resumo da Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica do Observatório Nacional/MCTI como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Geofísica.

## ANÁLISE CRÍTICA DAS FONTES DE INCERTEZA ASSOCIADAS À MEDIÇÃO DA ACELERAÇÃO DA GRAVIDADE TERRESTRE NO LABORATÓRIO DE GRAVIMETRIA DO OBSERVATÓRIO NACIONAL

Rodrigo Lima Melhorato

Janeiro/2015

Orientador: Mauro Andrade de Sousa

Programa: Geofísica

O presente trabalho propõe uma metodologia de calibração e ensaio de gravímetros relativos Scintrex, modelo CG-5, na forma de procedimentos técnico-científicos. Também é realizada a análise crítica das fontes de incerteza associadas à medição da aceleração da gravidade local com estes instrumentos. É apresentada uma proposta para a calibração de gravímetros absolutos com a finalidade de melhorar a cadeia de rastreabilidade metrológica da grandeza gravidade no País. Os procedimentos técnico-científicos foram testados em campo e laboratório, e os resultados mostram-se satisfatórios. Com estas propostas, espera-se que este trabalho seja uma colaboração inicial para atender alguns dos vários requisitos técnico-científicos que irão compor o Manual da Qualidade do Laboratório de Gravimetria do Observatório Nacional.

**Palavras-chave:** Calibração de gravímetros, Análise crítica das fontes de incerteza, Rastreabilidade metrológica.

Abstract of Dissertation presented to Observatório Nacional/MCTI as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Geophysics.

CRITICAL ANALYSIS OF UNCERTAINTY SOURCES ASSOCIATED TO  
MEASUREMENT OF TERRESTRIAL GRAVITY ACCELERATION IN  
OBSERVATÓRIO NACIONAL'S GRAVIMETRY LABORATORY

Rodrigo Lima Melhorato

January/2015

Advisor: Mauro Andrade de Sousa

Department: Geophysics

This work proposes a calibration methodology and measurements with Scintrex gravimeters, CG-5 model, in the form of technical-scientific procedures. It is also carried out a critical analysis of the sources of uncertainty associated with measuring acceleration local with these instruments. It is presented a proposal for the calibration of absolute gravimeters in order to improve the metrological traceability of the quantity gravity in the country. The technical-scientific procedures were tested in field and in laboratory and the results are satisfactory. With these proposals, it is expected this work to be an initial collaboration of some of the various technical-scientific requirements that will complete the Quality Manual of Observatório Nacional's Gravimetry Laboratory.

**Keywords:** Gravimeters calibration, Critical analysis of uncertainty sources, Metrological traceability.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>xiv</b>
<b>Lista de Abreviaturas</b>	<b>xv</b>
<b>Capítulo 1 – Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 HISTÓRICO	1
1.2 A ESCOLHA DO SISTEMA DE GESTÃO DA QUALIDADE	2
<b>Capítulo 2 – Instrumentação e Infraestrutura</b>	<b>5</b>
2.1 GRAVÍMETROS ABSOLUTOS	7
2.2 GRAVÍMETROS RELATIVOS	11
2.3 INFRAESTRUTURA	13
<b>Capítulo 3 – Calibrações e Ensaios</b>	<b>15</b>
3.1 PROCEDIMENTOS DE CALIBRAÇÃO DE PADRÕES ABSOLUTOS: UMA PROPOSTA	16
3.2 PROCEDIMENTOS DE CALIBRAÇÃO DE PADRÕES RELATIVOS SCINTREX CG-5	19
3.3 PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS UTILIZANDO PADRÕES RELATIVOS SCINTREX CG-5	20
3.3.1 <i>Procedimento de ensaio de intervalo gravimétrico</i>	20
3.3.2 <i>Procedimento de ensaio do gradiente vertical de gravidade (GVG)</i>	21
<b>Capítulo 4 – Tratamento da Incerteza</b>	<b>23</b>
4.1 AVALIAÇÃO DA INCERTEZA	24
4.2 CORREÇÕES E INCERTEZA ASSOCIADA ÀS DETERMINAÇÕES ABSOLUTAS DE GRAVIDADE	29
4.3 CORREÇÕES E INCERTEZA ASSOCIADA ÀS DETERMINAÇÕES RELATIVAS DE GRAVIDADE	30
4.3.1 <i>Fontes de incerteza no processo de calibração dos gravímetros Scintrex CG-5</i>	31
4.3.2 <i>O coeficiente linear residual de escala dos gravímetros Scintrex CG-5</i>	36
4.3.3 <i>Fontes de incerteza nos ensaios de intervalos gravimétricos</i>	38
4.3.4 <i>Fontes de incerteza no ensaio do GVG</i>	40
<b>Capítulo 5 – Resultados e Discussão</b>	<b>43</b>
5.1 RESULTADO DA ICAG-2013	43
5.2 GVG NA LCGAN E EM OUTRAS ESTAÇÕES DA RGFB	46
5.3 RESULTADO DOS INTERVALOS DE GRAVIDADE NA LCGAN	48
<b>Capítulo 6 – Conclusões e Perspectivas</b>	<b>54</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>57</b>

<b>Apêndice A – Procedimento Técnico-Científico – Avaliação Rotineira</b>	<b>60</b>
<b>Apêndice B – Procedimento Técnico-Científico – Ensaio de <i>g</i></b>	<b>73</b>
<b>Apêndice C – Procedimento Técnico-Científico – Ensaio do GVG</b>	<b>85</b>

# Lista de Figuras

Figura 1-1. Principais referências utilizadas na elaboração e consolidação da ISO/IEC 17025 (Felippes <i>et al.</i> , 2011). _____	3
Figura 2-1. Gravímetros absolutos (a) Micro-g LaCoste FG-5 #223 e (b) Micro-g LaCoste A-10 #011. Gravímetros relativos (c) Scintrex CG-5 #600 e #839 e (d) LC & R G257, G602, G622. Todos disponíveis no LabGrav/ON. _____	6
Figura 2-2. Gravímetro absoluto JILAg-3 do Institut für Erdmessung (IfE) utilizado em campanhas de gravimetria absoluta em vários países (Timmen <i>et al.</i> , 2008). _____	7
Figura 2-3. Desenho esquemático dos componentes do gravímetro absoluto Micro-g LaCoste FG-5 (Micro-g LaCoste, 2006). _____	8
Figura 2-4. Princípio básico de determinação da aceleração da gravidade pelo método de queda-livre utilizado pelos gravímetros Micro-g LaCoste A-10 & FG5 (Micro-g LaCoste, 2006 & 2008). _____	9
Figura 2-5. Visão interna de um gravímetro relativo Scintrex CG-5. _____	11
Figura 2-6. Visão interna de um gravímetro relativo do tipo LaCoste & Romberg modelo G.12	
Figura 2-7. Sala dos padrões do LabGrav/ON em Vassouras – RJ. _____	13
Figura 2-8. Disposição das estações da Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira. _____	14
Figura 2-9. Disposição das estações pertencentes à Linha de Calibração Gravimétrica de Agulhas Negras Negras. _____	14
Figura 3-1. Estrutura do WULG. (a) Disposição dos pilares (b) Gravímetro supercondutor OSG-CT040 instalado na galeria anexa (c) Gravímetros sobre os pilares durante uma comparação. _____	17
Figura 3-2. Sugestão de comparação dos padrões absolutos de gravidade A-10 #011 e FG-5 #223 sobre os pilares do LabGrav/ON em Vassouras – RJ. _____	18
Figura 3-3. Metodologia adotada na determinação do GVG utilizando ambas as técnicas: piso-bancada e piso-tripé. _____	22
Figura 4-1. Exemplo clássico na metrologia para ilustrar os conceitos de exatidão e precisão. _____	23
Figura 4-2. Exemplo de diagrama de Ishikawa. _____	26

Figura 4-3. Fluxograma simplificado para ilustrar o roteiro de cálculo de incertezas segundo o ISO GUM (2012).	27
Figura 4-4. Continuação do fluxograma.	28
Figura 4-5. Componentes de incerteza associadas às medidas absolutas utilizando gravímetros Micro-g LaCoste.	29
Figura 4-6. Localização do sensor do gravímetro Scintrex CG-5 (Scintrex, 2010).	31
Figura 4-7. Componentes de incerteza considerados na calibração de gravímetros do tipo Scintrex CG-5.	32
Figura 4-8. Diagrama de Ishikawa representando os componentes de incerteza do coeficiente linear residual de escala.	37
Figura 4-9. Diagrama de Ishikawa representando os componentes de incerteza considerados em ensaios utilizando gravímetros Scintrex CG-5.	38
Figura 4-10. Diagrama de incerteza para a determinação do gradiente vertical de gravidade.	40
Figura 5-1. Grau de equivalência entre os gravímetros absolutos participantes da ICAG-2013 (Francis <i>et al.</i> , 2014).	45
Figura 5-2. Gravímetro FG-5 #223 sobre o pilar B4 do <i>Walferdange Laboratory Underground for Geodynamics</i> em Luxemburgo durante a ICAG-2013.	45
Figura 5-3. Módulo do gradiente vertical de gravidade nas estações da LCGAN.	46
Figura 5-4. Módulo do gradiente vertical de gravidade em algumas das estações da RGFB.	48
Figura 5-5. Aceleração da gravidade na estação CAL02 da LCGAN.	50
Figura 5-6. Aceleração da gravidade na estação CAL03 da LCGAN.	51
Figura 5-7. Aceleração da gravidade na estação CAL04 da LCGAN.	51
Figura 5-8. Aceleração da gravidade na estação CAL05 da LCGAN.	52

# Lista de Tabelas

Tabela 2-1. Padrões relativos e absolutos disponíveis no LabGrav/ON (Sousa & Melhorato, 2014).	12
Tabela 4-1. Incertezas padrão típicas de um gravímetro absoluto FG-5. Em Marés terrestres e Carregamento oceânico os valores deverão ser multiplicados pelas suas respectivas correções.	30
Tabela 4-2. Descrição das fontes de incerteza consideradas no processo de calibração de gravímetros Scintrex CG-5.	33
Tabela 4-3. Descrição das fontes de incerteza da Figura 4-9.	39
Tabela 4-4. Descrição das fontes de incerteza consideradas na determinação do GVG utilizando os gravímetros Scintrex CG-5 e uma trena graduada em mm.	41
Tabela 5-1. Determinação do gradiente vertical de gravidade nas estações da LCGAN.	46
Tabela 5-2. Determinação do gradiente vertical de gravidade em algumas das estações da RGFB com $k = 2$ .	47
Tabela 5-3. Valores absolutos de gravidade reprocessados para a altura do sensor (26 cm) dos gravímetros CG-5 com $k = 2$ .	49
Tabela 5-4. Intervalos de gravidade ao longo da LCGAN. T e R representam o total e a quantidade de intervalos rejeitados, respectivamente, durante o processamento com $k = 2$ .	49
Tabela 5-5. Valores de gravidade ao longo da LCGAN obtidos com os gravímetros Scintrex CG-5 #600 e #839 com $k = 2$ .	50
Tabela 5-6. Coeficientes lineares residuais de escala determinados para ambos os gravímetros Scintrex CG-5 em questão com $k = 2$ .	52
Tabela 5-7. Comparativo entre os intervalos relativos de gravidade medidos pelo gravímetro Scintrex CG-5 #600 corrigidos do coeficiente linear residual de escala com $k = 2$ .	53
Tabela 5-8. Comparativo entre os intervalos relativos de gravidade medidos pelo gravímetro Scintrex CG-5 #839 corrigidos do coeficiente linear residual de escala com $k = 2$ .	53

# Lista de Símbolos

$g$	Aceleração da gravidade local
$\delta g$	Intervalo de gravidade ou intervalo gravimétrico
$CA_{\text{sensor}}$	Correção de altura do sensor
$k$	Fator de abrangência
$u_c$	Incerteza padrão combinada
$U$	Incerteza expandida
$v_{\text{eff}}$	Número efetivo de graus de liberdade
$\alpha$	Coefficiente linear residual de escala

# Lista de Abreviaturas

<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>BIPM</b>	Bureau International des Poids et Mesures
<b>CCM</b>	Consultative Committee on Mass and Related Quantities
<b>CIPM</b>	Comité International dês Poids et Mesures
<b>COGE</b>	Coordenação de Geofísica
<b>GNSS</b>	Global Navigation Satellite System
<b>GUM</b>	Guide to the expression of uncertainty in measurement
<b>GVG</b>	Gradiente Vertical de Gravidade
<b>IAG</b>	International Association of Geodesy
<b>ICAG</b>	International Comparison of Absolute Gravimeters
<b>IEC</b>	International Electrotechnical Commission
<b>IFCC</b>	International Federation of Clinical Chemistry
<b>IGSN</b>	International Gravity Standardization Net
<b>INMETRO</b>	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization
<b>IUPAC</b>	International Union of Pure and Applied Chemistry
<b>IUPAP</b>	International Union of Pure and Applied Physics
<b>LabGrav/ON</b>	Laboratório de Gravimetria do Observatório Nacional
<b>LCGAN</b>	Linha de Calibração Gravimétrica de Agulhas Negras
<b>LC &amp; R</b>	LaCoste & Romberg
<b>MAST</b>	Museu de Astronomia e Ciências Afins
<b>NMI</b>	Nacional Metrology Institute
<b>ON</b>	Observatório Nacional
<b>OIML</b>	International Organization of Legal Metrology
<b>RGFB</b>	Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira
<b>SGQ</b>	Sistema de Gestão da Qualidade
<b>SI</b>	Sistema Internacional de Unidades

**VIM** Vocabulário Internacional de Metrologia  
**WGG** Working Group on Gravimetry

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Histórico

O interesse em entender o movimento de queda dos corpos é alvo de indagação desde a era Aristotélica. No início do século XVII, Galileu Galilei contribuiu de forma significativa para o nascimento da ciência moderna, introduzindo a experimentação para a confirmação de hipóteses. Galileu executou experimentos envolvendo pêndulos e os associou ao fenômeno da aceleração natural e, conforme descreve Hawking (2005), também iniciou a elaboração de um modelo para descrever o movimento de corpos em queda livre.

O método pendular foi bastante difundido e perdurou por séculos na determinação da *aceleração da gravidade* –  $g$ . No Brasil, os registros datam de meados do século XIX pelo então Imperial Observatório Nacional:

O Observatório Nacional é a instituição brasileira que há mais tempo tem realizado pesquisa em gravimetria. A gravimetria no Observatório Nacional remonta a meados do século XIX, quando Cândido Baptista de Oliveira construiu um pêndulo de Foucault em outubro de 1851 nas dependências do então Imperial Observatório Nacional. Pouco depois, no início do século XX, um dispositivo tetrapendular Sterneck passou a operar no novo prédio do ON em São Cristóvão, hoje sede do Museu de Astronomia e Ciências Afins. Em 1955, o ON adquiriu o gravímetro Worden W178 e iniciou os levantamentos gravimétricos terrestres no Brasil de forma sistemática. A partir de 1967, o gravímetro LaCoste & Romberg G61, cedido em comodato pelo Interamerican Geodetic Survey, substituiu o W178 nestes levantamentos. (SOUSA, M. A. de. *A Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira.*)<sup>1</sup>

Embora o método pendular ainda seja muito utilizado em aulas práticas para ilustrar a determinação de  $g$ , pouco contribui nas investigações metrológicas ou geofísicas em função da exatidão e precisão exigidas atualmente.

---

<sup>1</sup>Disponível em: <[http://www.on.br/conteudo/coge/servicos/rede\\_fund\\_grav/rede\\_fund\\_grav.html](http://www.on.br/conteudo/coge/servicos/rede_fund_grav/rede_fund_grav.html)>. Acesso em: 16 de março de 2014.

O desenvolvimento de tecnologia permite avançar em técnicas de instrumentação com elevados níveis de exatidão e precisão e, quando possível, com redução das dimensões nos sistemas de detecção. Neste sentido, os gravímetros se enquadram como tecnologia de maiores exatidão e precisão para as medições da *aceleração da gravidade local*.

A COGE/ON tem a sua disposição cinco gravímetros relativos e dois absolutos e, desde 1988, atende diversas solicitações de laboratórios metrológicos no Brasil. Para estes laboratórios, conhecer a *aceleração da gravidade local* e a componente vertical de seu gradiente é fundamental na calibração de transdutores de pressão, viscosímetros, balanças de peso morto e torquímetros. Portanto, conhecer o valor de  $g$  com elevada exatidão e precisão, advém da busca pelo controle de qualidade nos processos industriais devido às normalizações vigentes.

## **1.2 A escolha do Sistema de Gestão da Qualidade**

Em tempos atuais muito se discute quanto à eficiência e a qualidade no processo de fabricação de produtos e serviços prestados à sociedade. A versatilidade do acesso à informação é tamanha que contribui de forma significativa quando se deseja obter informações detalhadas sobre um determinado assunto, permitindo assim, que os indivíduos estabeleçam seus critérios de aceitação/rejeição sobre certo produto ou serviço oferecido. Dependendo do produto, alguns consumidores pouco se importam em conhecer a procedência de tal. Em contrapartida, se o uso deste possui relevância para o indivíduo, logo, busca-se optar por aquele que possui algum selo de certificação que ateste sua qualidade.

Um SGQ é aquele que tem a capacidade de gerenciar suas atividades rotineiras em forma de procedimentos técnico-científicos, os quais são regidos por um Manual da Qualidade e documentos auxiliares em conformidade com alguma norma técnica, objetivando a satisfação de clientes<sup>2</sup>. Clientes, no contexto do LabGrav/ON, representam os laboratórios de metrologia que solicitam a determinação da *aceleração da gravidade local*

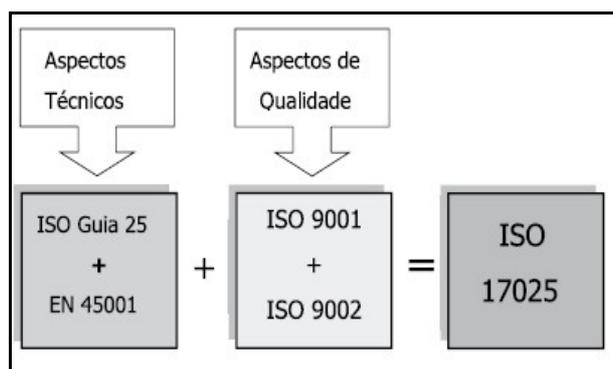
---

<sup>2</sup>Disponível em: <<http://www.nitmantiqueira.org.br/portal/images/pdf/documentacao/cit-orientacoes-sistema-gestao-qualidade.pdf>>. Acesso em: 20 de agosto de 2014.

para que esta seja utilizada como uma constante metrológica local, seja durante os ensaios ou calibrações de seus padrões.

Das normas concomitantes com um SGQ, a que melhor se ajusta aos objetivos do LabGrav/ON é a ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005. Esta norma teve sua elaboração inicial segundo as experiências vivenciadas com o ABNT ISO/IEC Guia 25 e com a EN 45001. Sua primeira edição teve como referências a ABNT NBR ISO 9001:1994 e a ABNT NBR ISO 9002:1994, sendo posteriormente substituídas pela ABNT NBR ISO 9001:2000, tornando necessária a readequação da ABNT ISO/IEC 17025.

Como se pode observar na Figura 1-1, se os laboratórios atendem aos requisitos da norma ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005, também estarão operando segundo a ABNT NBR ISO 9001:



**Figura 1-1.** Principais referências utilizadas na elaboração e consolidação da ISO/IEC 17025 (Felippes *et al.*, 2011).

A norma ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005 - *Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração*; permite a quem deseja implantá-la, executar ensaios e calibrações de instrumentos utilizando métodos normalizados ou não e ainda, métodos desenvolvidos pelo laboratório.

Com a finalidade de garantir a cadeia de rastreabilidade metrológica (VIM, 2012), e pela tradição que a instituição possui na aquisição de dados gravimétricos, o LabGrav/ON vêm se adequando ao processo de implantação da norma 17025 para ensaios e calibrações de instrumentos referente à grandeza *gravidade* no país. Para contribuir com este processo

e para que o LabGrav/ON seja acreditado pelo INMETRO em futuro próximo, os objetivos deste trabalho consistem em:

- Dispor de procedimentos técnico-científicos de calibração e ensaio utilizando padrões relativos Scintrex, modelo CG-5;
- Desenvolver métodos para a calibração de padrões absolutos para melhorar a rastreabilidade da grandeza *gravidade* no país;
- Apurar as fontes de incerteza das medições gravimétricas quando utilizados os gravímetros relativos Scintrex, modelo CG-5;
- Apresentar o roteiro de cálculo de incertezas fundamentados no *Guide to the expression of uncertainty in measurement* (GUM, 2012).

## Capítulo 2

### Instrumentação e Infraestrutura

Em ensaios para determinação da *aceleração da gravidade local*, podem ser utilizados gravímetros (padrões) absolutos e/ou relativos (Figura 2-1). Para os padrões absolutos somente será descrito um dos tipos de gravímetros balísticos, ou seja, cuja determinação de  $g$  é realizada pelo método de queda livre. O gravímetro FG-5, desenvolvido pela Micro-g LaCoste, representa atualmente o estado da arte dos instrumentos absolutos para obtenção de  $g$ . Estes instrumentos são capazes de determinar a aceleração da gravidade local com precisão<sup>3</sup> e exatidão de 2  $\mu\text{Gal}$ . O *Gal*, em homenagem a Galileu, é a unidade utilizada pela comunidade Geofísica e de metrologia em gravidade e sua equivalência no SI é:

$$1 \mu\text{Gal} = 1 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}^2 \quad (2-1)$$

Além do gravímetro FG-5, a Micro-g disponibiliza o modelo A-10. O princípio de funcionamento de ambos é similar, porém com especificidades que os caracterizam para cada finalidade: O FG-5 foi desenvolvido para aplicações laboratoriais, enquanto o A-10 possui maior robustez e praticidade para operações de campo.

---

<sup>3</sup> Considerando sítios não ruidosos.



(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 2-1.** Gravímetros absolutos (a) Micro-g LaCoste FG-5 #223 e (b) Micro-g LaCoste A-10 #011. Gravímetros relativos (c) Scintrex CG-5 #600 e #839 e (d) LC & R G257, G602, G622. Todos disponíveis no LabGrav/ON.

O antecessor ao FG-5 é o gravímetro JILAg (Figura 2-2), desenvolvido no *Joint Institute of Laboratory Astrophysics* (Zumberge *et al.*, 1982). Sua metodologia de funcionamento é semelhante à do FG-5 e experimentos mostraram perfeita concordância entre os resultados fornecidos por ambos os modelos (Timmen *et al.*, 2008).

O JILAg-3 foi a terceira de seis gerações deste instrumento o qual foi utilizado pelo Institut für Erdmessung (IfE) da Universidade de Hannover para a implantação de mais de 130 estações gravimétricas absolutas pelo mundo, incluindo o programa de gravimetria absoluta realizado na América do Sul (Torge *et al.*, 1994). Das 22 estações implantadas no

continente sul-americano, sete estão no Brasil, as quais atuam como *datum* absoluto para a RGFB.

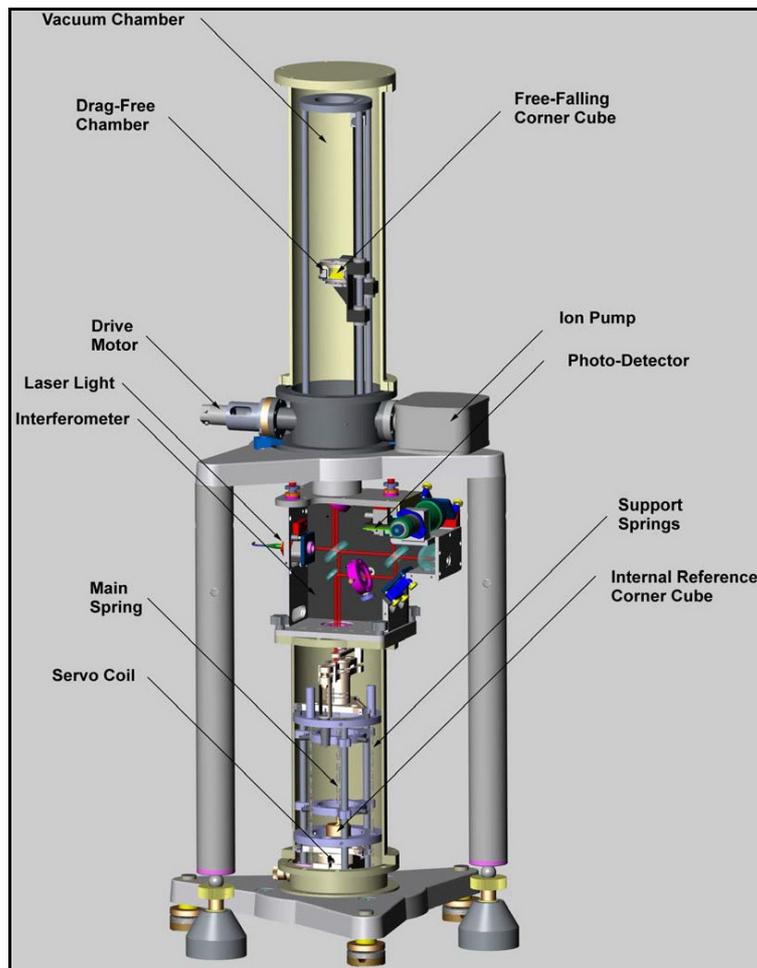


**Figura 2-2.** Gravímetro absoluto JILAg-3 do Institut für Erdmessung (IfE) utilizado em campanhas de gravimetria absoluta em vários países (Timmen *et al.*, 2008).

## 2.1 Gravímetros absolutos

Estes equipamentos geralmente são constituídos pelas seguintes unidades:

- Câmara de queda livre;
- Bomba de vácuo iônica;
- Interferômetro Mach-Zhender;
- Supermola;
- Laser He(Ne)vermelho@633nm;
- Oscilador de rubídio, 10 MHz;
- Sistema eletrônico de controle;
- Computador dedicado.



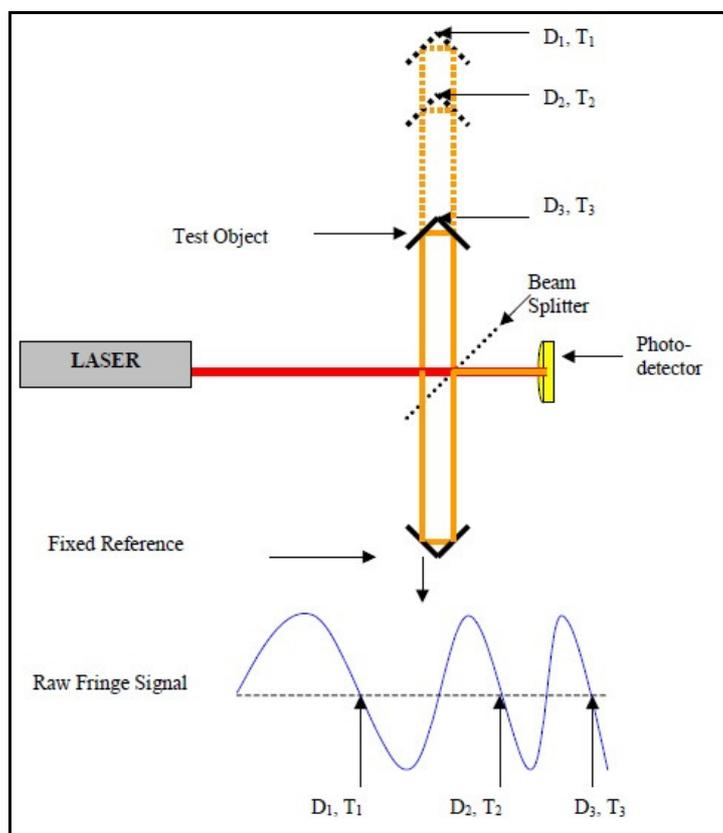
**Figura 2-3.** Desenho esquemático dos componentes do gravímetro absoluto Micro-g LaCoste FG-5 (Micro-g LaCoste, 2006).

Antes da realização de um ensaio é preciso garantir que a câmara de queda livre esteja com elevado nível de vácuo (aproximadamente  $10^{-6}$  mbar). Portanto, esta tarefa é executada com o auxílio de uma turbo bomba de vácuo, deixando-a funcionar por um período aproximado de 24 horas. Concluída esta etapa, a bomba de vácuo iônica é acionada e é verificado se a mesma atinge uma tensão de aproximadamente 4 kV em um intervalo de tempo de cinco minutos após o seu acionamento. Se esta condição é satisfeita, a turbo bomba é desligada e o vácuo será mantido pela bomba de vácuo iônica, deixando a câmara de queda livre pronta para realizar as medições.

Outro componente que requer cuidado especial é a supermola, seja no seu manuseio ou transporte. A supermola está localizada abaixo do interferômetro (Figura 2-3) e é constituída por um conjunto de molas e um prisma diédrico de referência. Sua finalidade é isolar os efeitos de microssismicidade local mantendo uma configuração inercial para o

prisma de referência. A estabilidade da posição do prisma de referência é fundamental para a determinação da *aceleração da gravidade local*.

No interior da câmara de queda livre existe outro prisma diédrico que atua como corpo de prova. Durante o ensaio este prisma é liberado do topo da câmara de queda livre por um dispositivo eletromecânico. Uma fibra óptica se encarrega de conduzir a luz laser para o interior do interferômetro e este tem a função de dividi-la em dois feixes, enviando um feixe para o prisma de referência e o outro para o prisma de prova. Quando os feixes são recombinados isto produzirá um padrão de interferência em virtude da diferença de fase entre eles. Portanto, como o comprimento de onda do laser é bem definido, a interferometria é utilizada para determinar as posições do prisma de prova durante a queda (Figura 2-4). Para cada posição do corpo de prova o padrão de rubídio registra o respectivo tempo, então, por um ajustamento da equação da trajetória, a aceleração da gravidade local pode ser obtida (Micro-g LaCoste, 2006 & 2008).



**Figura 2-4.** Princípio básico de determinação da aceleração da gravidade pelo método de queda-livre utilizado pelos gravímetros Micro-g LaCoste A-10 & FG5 (Micro-g LaCoste, 2006 & 2008).

O dispositivo eletromecânico mencionado no parágrafo anterior permite descrever algumas vantagens quanto à vida útil do prisma de prova e quanto à otimização do aparato experimental. Este dispositivo é constituído por uma espécie de carrinho que abriga o corpo de prova. Durante o ensaio, este carrinho acelera com valor maior do que  $g_{local}$  e por meio de um servomecanismo mantém uma distância mínima de separação em relação ao corpo de prova. O impacto sofrido pelo prisma ao término da queda será somente em função desta mínima distância, e não desde o topo à base da câmara de queda livre. Esta metodologia experimental é bastante eficaz quanto à vida útil do corpo de prova, proporcionando um desgaste menor sobre o mesmo.

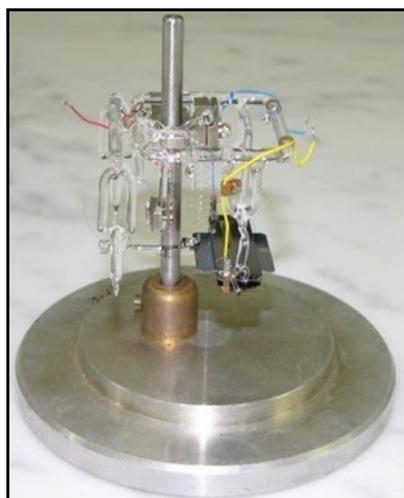
Outra vantagem oferecida por esta metodologia experimental é o fato de que embora a câmara de queda livre esteja em elevado nível de vácuo, ainda existirão algumas moléculas residuais de ar, e esta combinação carrinho-prisma durante a queda, permite reduzir as forças de arrasto sobre o prisma de prova.

## 2.2 Gravímetros relativos

Os gravímetros relativos são capazes de realizar medições diferenciais, portanto, para obter-se o valor de  $g$  no local pretendido, as leituras são realizadas primeiramente em um local onde  $g$  é conhecido, e, por conseguinte, aonde se deseja determiná-lo. O princípio de funcionamento destes instrumentos consiste em um sistema massa-mola, cuja massa de prova é deslocada de sua posição de equilíbrio em virtude da variação de gravidade entre as estações medidas, deste modo, a variação das leituras é proporcional à variação de gravidade.

No caso de instrumentos analógicos, como os LC & R, cabe ao operador colocar a massa de prova em sua posição de equilíbrio, portanto, a interação do operador com o instrumento é fundamental na qualidade da aquisição dos dados. Contudo, nos equipamentos digitais, como os Scintrex, pouca intervenção tem o operador sobre o equipamento durante a aquisição.

O material que constitui a mola possui um papel chave na qualidade das medições. Os gravímetros Scintrex utilizam quartzo, enquanto os LC & R utilizam uma liga metálica. As figuras 2-5 e 2-6 ilustram o interior destes instrumentos e informações detalhadas podem ser encontradas em LaCoste & Romberg (2004) e Scintrex (2010).



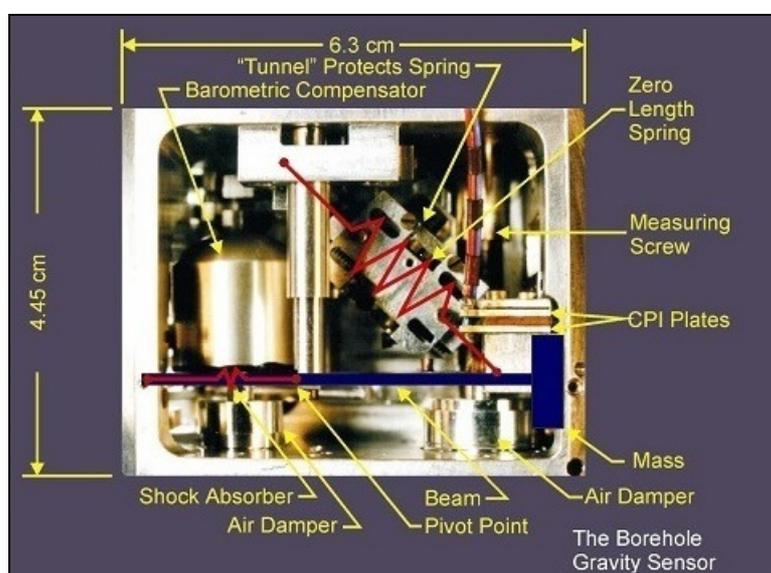
**Figura 2-5.** Visão interna de um gravímetro relativo Scintrex CG-5<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Disponível em: <[http://www.upf.pf/ICET/cd\\_rom\\_bgi/Cours/Niebauer/day1.pdf](http://www.upf.pf/ICET/cd_rom_bgi/Cours/Niebauer/day1.pdf)>. Acesso em: 17 de junho de 2014>.

Para efeitos de comparação a Tabela 2-1 ilustra algumas informações comparativas dos padrões relativos e absolutos de gravidade disponíveis na COGE/ON.

**Tabela 2-1.** Padrões relativos e absolutos disponíveis no LabGrav/ON (Sousa & Melhorato, 2014).

	Relativos		Absolutos	
	LaCoste & Romberg G	Scintrex AutoGrav CG-5	Micro-g LaCoste A-10	Micro-g LaCoste FG-5
				
Tecnologia	Mola metálica. Analogico	Mola de quartzo. Digital	Queda livre. Digital	Queda livre. Digital
Quantidade	03	02	01	01
Resolução	0,01 mGal	0,001 mGal	0,005 mGal	0,001 mGal
Repetibilidade	0,02 mGal	0,005 mGal	0,01 mGal	0,002 mGal
Exatidão	0,04 mGal	0,01 mGal	0,01 mGal	0,002 mGal
Portabilidade	Manual	Manual	Veículo	Veículo



**Figura 2-6.** Visão interna de um gravímetro relativo do tipo LaCoste & Romberg modelo G<sup>5</sup>.

<sup>5</sup> Disponível em: <[http://www.upf.pf/ICET/cd\\_rom\\_bgi/Cours/Niebauer/day1.pdf](http://www.upf.pf/ICET/cd_rom_bgi/Cours/Niebauer/day1.pdf)>. Acesso em: 17 de junho de 2014>.

### 2.3 Infraestrutura

O termo infraestrutura no âmbito da grandeza gravidade, não se limita apenas à utilização de espaço físico laboratorial. Além da infraestrutura disponível em Vassouras – RJ (Figura 2-7) e no Rio de Janeiro – RJ, o ON conta com a Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira, e a Linha de Calibração Gravimétrica de Agulhas Negras.

A RGFB (Figura 2-8) foi iniciada em 1976 e o seu arcabouço foi finalizado em 1994, atuando como *datum* gravimétrico do Sistema Geodésico Brasileiro. A rede está conectada à IGSN71 e disponibiliza cerca de 620 estações gravimétricas por todo o país, ajustadas mediante o padrão JILAg-3 (Subiza Pina & Sousa, 2001).

Já a LCGAN (Figura 2-9), foi criada em meados da década de 80 utilizando gravímetros relativos LaCoste & Romberg modelo G. Composta por 5 estações irregularmente espaçadas em um trecho de 230 km de extensão, no extremo sudoeste do estado do Rio de Janeiro, a linha de calibração é capaz de reproduzir aproximadamente 628 mGal de amplitude, perfazendo o procedimento de calibração de padrões relativos de gravidade. Em 2006 as estações da LCGAN foram reocupadas com o padrão absoluto Micro-g LaCoste A-10 #011 (Sousa & Santos, 2010) e, em conjunto com os gravímetros LC & R, foram determinados os gradientes verticais de gravidade em cada estação, melhorando assim a precisão e exatidão da linha.



**Figura 2-7.** Sala dos padrões do LabGrav/ON em Vassouras – RJ.



Figura 2-8. Disposição das estações da Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira<sup>6</sup>.

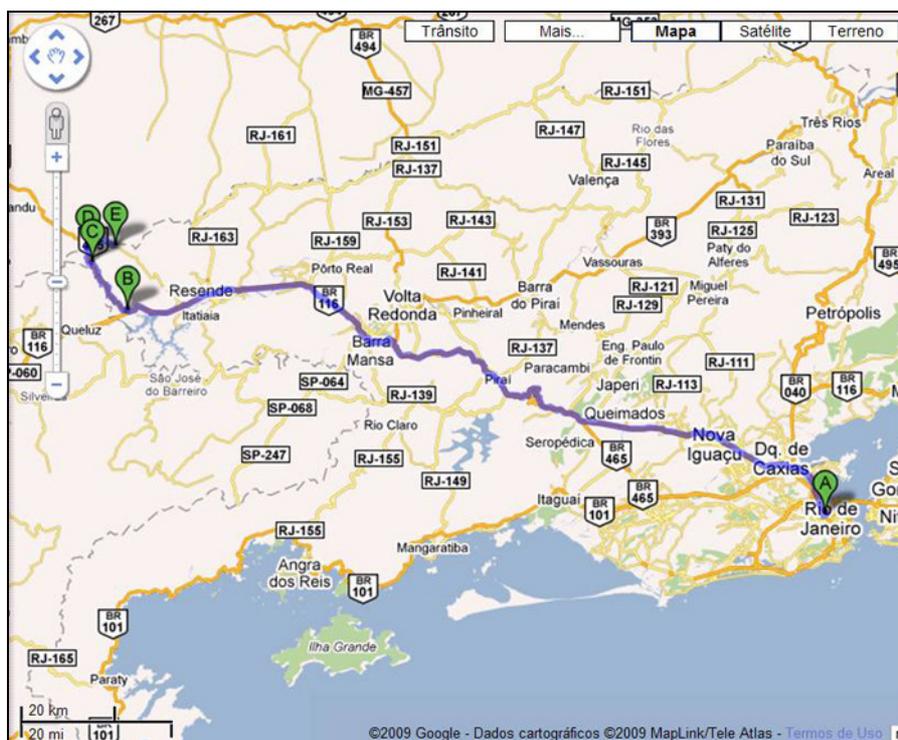


Figura 2-9. Disposição das estações pertencentes à Linha de Calibração Gravimétrica de Agulhas Negras<sup>6</sup>.

<sup>6</sup> Disponível em: <<http://www.on.br/conteudo/gravimetria>>. Acesso em: 17 de junho de 2014.

# Capítulo 3

## Calibrações e Ensaio

A norma 17025 menciona em seus requisitos técnicos que o laboratório deve ser capaz de selecionar métodos que satisfaçam as necessidades de seus clientes e que sejam adequados para as calibrações e ensaios que realiza. Assim devem ser priorizados aqueles publicados em normas internacionais, regionais ou nacionais, o que não impede a existência de métodos desenvolvidos pelo próprio laboratório, sendo este capaz de validá-los.

Dos dez subitens contidos nos requisitos técnicos da norma, serão enfatizados os listados a seguir, pois estes constituem os objetivos deste trabalho. A norma menciona que os laboratórios que desejam tê-la implantada devem atender aos critérios de:

- Verificação do funcionamento apropriado do equipamento;
- Calibração e ajuste antes de cada utilização;
- Método de registro das observações e dos resultados;
- Critérios e/ou requisitos para aprovação ou rejeição;
- Procedimento para estimativa de incerteza;

E ainda, para a validação de métodos:

- Calibração com o uso de padrões de referência ou materiais de referência;
- Comparações obtidas por outros métodos;
- Comparações laboratoriais.

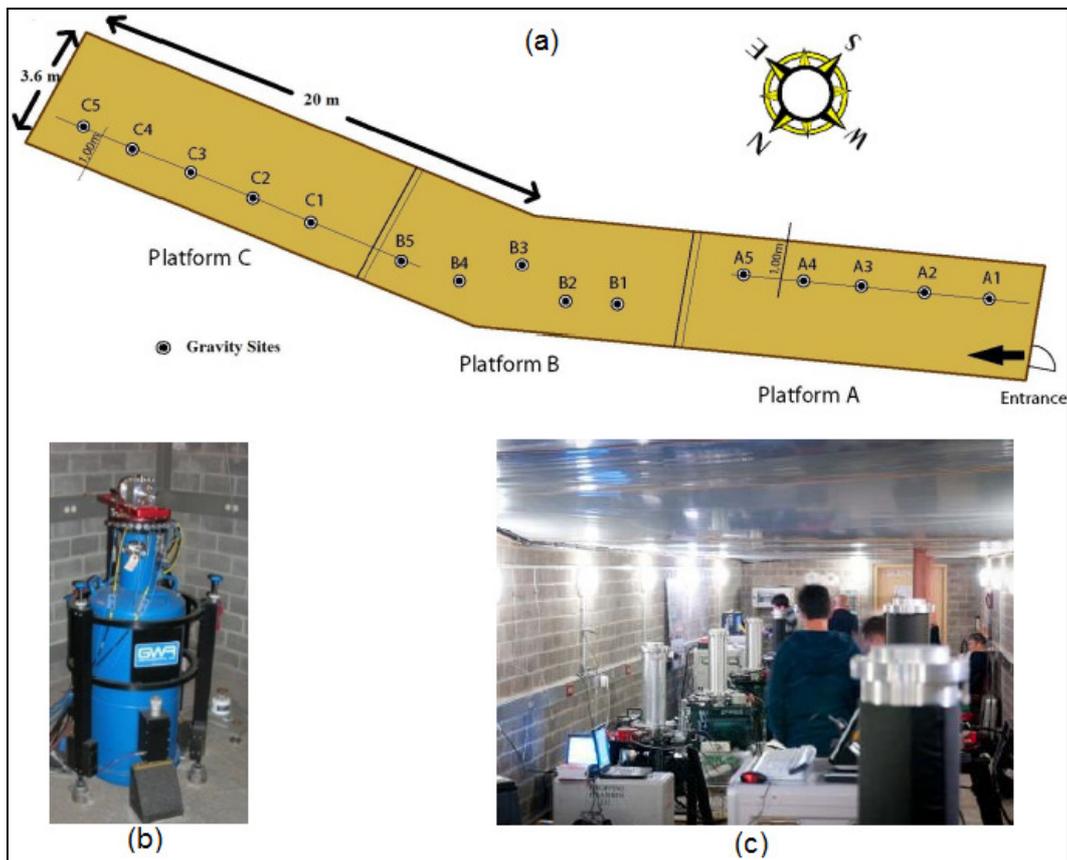
### 3.1 Procedimentos de calibração de padrões absolutos: uma proposta

Muito ainda se discute quanto às metodologias a serem utilizadas e padronizadas para a calibração de gravímetros absolutos. Órgãos internacionais como o CCM, a IAG e o BIPM, estão criando estratégias para definir os objetivos de cada instituição, os quais têm a finalidade de assegurar a rastreabilidade das medidas de gravidade ao SI no mais alto nível para:

- Fins metrológicos – principalmente para a redefinição do padrão do quilograma;
- Geodésicos – em particular para verificar a variação temporal do campo de gravidade, bem como na criação e manutenção de redes gravimétricas ultra-precisas.

Embora o laser He-Ne @vermelho633nm e o oscilador de rubídio de 10 MHz dos gravímetros absolutos sejam rastreados ao BIPM, isto não garante a rastreabilidade da medição final pelo instrumento, deste modo, outros mecanismos que o constitui podem afetar a confiabilidade dos resultados. Uma forma de garantir a confiabilidade instrumental seria a comparação com outros padrões. Portanto, o que tem guiado a confiabilidade metrológica destes instrumentos são as comparações interlaboratoriais de gravímetros absolutos conhecida como *International Comparison of Absolute Gravimeters – ICAG*, realizadas no *Walferdange Underground Laboratory for Geodynamics – WULG*, em Luxemburgo. Estas comparações têm o objetivo de avaliar o grau de concordância entre os instrumentos participantes e servem como projeto piloto para a adoção de um protocolo definitivo, lembrando que tal evento é cadastrado nas comparações chaves do BIPM.

O WULG está localizado no interior de uma mina de caulim desativada. Sua infraestrutura (Figura 3-1) permite que até quinze instrumentos trabalhem simultaneamente, enquanto um gravímetro supercondutor instalado em uma galeria anexa funciona de forma ininterrupta, avaliando as variações de gravidade não detectável pelos gravímetros absolutos durante a comparação.



**Figura 3-1.** Estrutura do WULG. (a) Disposição dos pilares (b) Gravímetro supercondutor OSG-CT040 instalado na galeria anexa (c) Gravímetros sobre os pilares durante uma comparação<sup>7</sup>.

Participar de eventos desta magnitude demanda custos consideráveis com exportação temporária do equipamento, além de não estar descartada a hipótese de ocorrer algum dano com o mesmo durante este processo. Por esta razão, somente um padrão absoluto do Observatório Nacional é enviado a estes eventos, priorizando aquele de maior exatidão e precisão, neste caso o FG-5 #223.

Então, como garantir que os valores de gravidade medidos pelo A-10 #011 são confiáveis, uma vez que este é usado na LCGAN e na manutenção e implantação de estações da RGFB?

Se o FG-5 #223 é capaz de reproduzir valores confiáveis nestas comparações, então está em conformidade para retornar ao Brasil e operar como padrão primário na calibração dos demais instrumentos. No retorno ao LabGrav/ON, em Vassouras – RJ, o FG-5 #223 passa por uma inspeção com a finalidade de verificar se o instrumento não sofreu alguma avaria durante o transporte.

<sup>7</sup>[http://kcdb.bipm.org/appendixB/appbresults/CCM.G-K2/CCM.G-K2\\_Technical\\_Protocol.pdf](http://kcdb.bipm.org/appendixB/appbresults/CCM.G-K2/CCM.G-K2_Technical_Protocol.pdf)

A próxima etapa consiste em verificar se o instrumento está operando normalmente e se é capaz de reproduzir valores de gravidade confiáveis, assim como ocorrido na comparação. Deste modo, o Pilar B do LabGrav/ON é utilizado para realizar esta verificação de operacionalidade do FG-5 #223, devido a série histórica de medidas realizadas *a priori* com este instrumento.

Validados os resultados e seguindo o exemplo de Schmerge & Francis (2006) e Wang *et al.* (2014), uma comparação entre FG-5 #223 e A-10 #011 é realizada sobre o Pilar B seguindo o protocolo da ICAG.

Concluída a comparação de ambos, são realizadas as medições nas estações da LCGAN com o gravímetro absoluto A-10 #011. Os resultados obtidos nestas medições passam a ser utilizados como valores de referência na calibração de gravímetros relativos, garantindo a cadeia de rastreabilidade metrológica da grandeza *gravidade* no país.



**Figura 3-2.** Sugestão de comparação dos padrões absolutos de gravidade A-10 #011 e FG-5 #223 sobre os pilares do LabGrav/ON em Vassouras – RJ.

### 3.2 Procedimentos de calibração de padrões relativos Scintrex CG-5

A calibração deste tipo de gravímetro difere do procedimento utilizado para a calibração de gravímetros absolutos. Inicialmente estes instrumentos passam por uma avaliação rotineira em laboratório, guiada pelo manual do fabricante. Se o equipamento responde às especificações do manual, é conduzido até a linha de calibração gravimétrica para posterior determinação de um coeficiente linear residual de escala.

O procedimento técnico-científico para avaliação rotineira descrito nesta dissertação restringe-se apenas aos ajustes dos seguintes parâmetros instrumentais:

- Verificação dos níveis transversal e longitudinal;
- Verificação de sensibilidade;
- Verificação de deriva de longo período;
- Desacoplamento de níveis.

Assim, não incluem reparo ou substituição de componentes eletrônicos e, caso o equipamento não responda às especificações guiadas pelo manual durante o processo de avaliação, sugere-se o encaminhamento ao fabricante. Neste trabalho será apresentada somente a metodologia de calibração em forma de procedimento técnico-científico dos gravímetros Scintrex CG-5, uma vez que a metodologia de calibração para os gravímetros LaCoste & Romberg modelo G são bem definidos por Souza (2006).

Até aqui se pressupõe que todas as exigências iniciais recomendadas pelo manual são satisfeitas, tais como: baterias instaladas e equipamento ligado à alimentação elétrica por mais de 24 horas para garantir a estabilidade térmica do sistema.

A metodologia adotada pelo LabGrav/ON no processo de calibração destes padrões divide-se em duas etapas:

- Avaliação rotineira;
- Ocupação da LCGAN.

A periodicidade da avaliação rotineira varia de acordo com a estabilidade do instrumento. Por tratar-se de um sistema massa-mola, inicialmente são observadas altas taxas de deriva residual e de longo período, e por isso, o fabricante recomenda uma periodicidade de avaliação semanal, e quando observada a sua estabilidade, altera-se para uma periodicidade mensal. A escolha do local onde será realizada a avaliação constitui um dos procedimentos preliminares para obter-se eficiência no processo. Portanto, priorizam-se aqueles onde as condições ambientais são controláveis e de menor vibração possível. Inicialmente a avaliação dos parâmetros instrumentais era realizada sobre o piso do LabGrav/ON no Rio de Janeiro, contudo, em virtude da existência de uma central de ar instalada em anexo a este, por diversas vezes os instrumentos não conseguiram reproduzir resultados confiáveis durante o processo. Diante desta situação, optou-se por adotar a estação gravimétrica IGSN71 40123A, localizada no MAST, em substituição ao LabGrav/ON. Esta estação está materializada sobre um pilar de concreto e por isso oferece grande estabilidade em relação aos ruídos provenientes de microvibrações locais.

As avaliações dos padrões relativos CG-5 #600 e #839 vêm sendo realizadas desde suas chegadas ao laboratório e os registros são armazenados em disco rígido desde os anos de 2011 e 2012 para o #600 e #839, respectivamente.

A ocupação da LCGAN é um procedimento complementar ao processo de calibração e tem a finalidade de verificar como o instrumento responderá aos intervalos de gravidade de maior amplitude e em condições reais de operação. A periodicidade de reocupação da linha é de três anos e em todo o processo de calibração são utilizados os procedimentos técnico-científicos listados nos apêndices A e B.

### **3.3 Procedimentos de ensaios utilizando padrões relativos Scintrex CG-5**

#### **3.3.1 Procedimento de ensaio de intervalo gravimétrico**

Os ensaios podem ser realizados com padrões absolutos e/ou relativos e a escolha de qual padrão utilizar varia de acordo com as necessidades do cliente. Das solicitações de

medição da *aceleração da gravidade local*, 98% são realizadas com padrões relativos.

Existem diversas justificativas para isso:

- Gravímetros relativos são facilmente transportáveis; o transporte aéreo permite rapidez no deslocamento em um país de considerável extensão territorial como o Brasil;
- Utilizar padrões absolutos para atender as demandas laboratoriais requer uma logística mais elaborada quando comparada aos padrões relativos, aumentando o custo de realização destes trabalhos. Deste modo, os padrões absolutos devem ser utilizados apenas para a manutenção e extensão da RGFB;
- Com os padrões relativos atuais, as determinações de gravidade são reportadas com exatidão de 1 parte em  $10^8$ . Isto atende às exigências metrológicas atuais e em futuro próximo dos laboratórios solicitantes, cuja necessidade de exatidão é de algumas partes em  $10^6$ .

Assim como nas calibrações, a norma 17025 exige que os ensaios também sejam realizados com base em procedimentos técnico-científicos. O procedimento de ensaio de intervalo gravimétrico apresentado no apêndice B cobre apenas as situações de âmbito metrológico, ou seja, ensaios realizados em laboratórios ou na implantação de estações de controle para prospecção mineral ou de hidrocarbonetos.

### **3.3.2 Procedimento de ensaio do gradiente vertical de gravidade (GVG)**

O componente z do gradiente da aceleração da gravidade (GVG) permite avaliar a variação da *aceleração da gravidade local* na vertical. O seu valor teórico pode ser obtido considerando a Terra como um elipsóide de revolução e com distribuição homogênea de massa, cujo valor é de aproximadamente:

$$\text{GVG} = - 3,086 \mu\text{Gal}\cdot\text{cm}^{-1} \quad (3-1)$$

Geralmente os laboratórios metrológicos necessitam conhecer o valor de  $g$  em diferentes níveis de altura, como por exemplo, no piso, na bancada e possivelmente em

alturas intermediárias. Portanto, o valor do GVG é utilizado para obter o valor de  $g$  nestes diferentes níveis de altura.

A metodologia aqui apresentada para a determinação do GVG experimental (Apêndice C) consiste em realizar leituras com o gravímetro relativo Scintrex CG-5 no piso e na bancada. Assim, repetidas leituras são realizadas entre estes dois níveis com a finalidade de melhor estimar o intervalo gravimétrico e eliminar possíveis correlações. A razão entre o intervalo gravimétrico médio e o desnível da bancada informará o GVG experimental.

Em algumas situações o laboratório solicitante ainda não dispõe de bancada. Deste modo, a solução adotada em substituição à mesma é a utilização de um tripé (Figura 3-3) para simular uma espécie de “bancada virtual” de aproximadamente um metro de desnível.



**Figura 3-3.** Metodologia adotada na determinação do GVG utilizando ambas as técnicas: piso-bancada e piso-tripé.

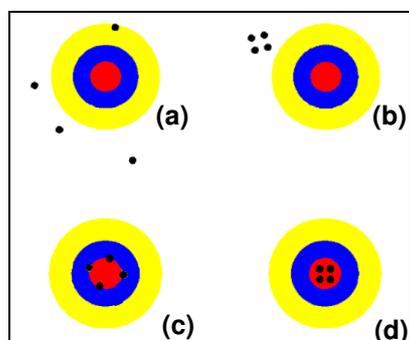
# Capítulo 4

## Tratamento da Incerteza

Ao realizar a medição de uma determinada grandeza física o experimentador está buscando constantemente o melhor conjunto de dados que descreva a natureza física do problema. Por melhores que sejam a exatidão e a precisão em um aparato experimental, nunca se conseguirá obter o valor verdadeiro, pois a medição será sempre afetada por erros que podem ser de natureza aleatória ou sistemática.

*Exatidão* e a *precisão* são termos distintos, e em um instrumento ou sistema de medição, nem sempre é possível obter ambos. A precisão define o quanto um instrumento é capaz de reproduzir um valor obtido numa medição mesmo que ele não esteja correto, ou seja, está associada à dispersão dos valores resultante de uma série de medidas. Já a exatidão está associada à proximidade do valor verdadeiro, podendo ser avaliada através da calibração do instrumento.

Com a finalidade de ilustrar a diferença entre estes termos, suponha que quatro atiradores fossem selecionados para disparar contra um alvo e os seguintes padrões fossem observados:



**Figura 4-1.** Exemplo clássico na metrologia para ilustrar os conceitos de exatidão e precisão<sup>8</sup>.

<sup>8</sup> Disponível em: <<http://www.peb.ufrj.br/cursos/ErrosIncertezas.pdf>>. Acesso em: 18 de novembro de 2014.

Em **(d)** é o que se deseja em todos os sistemas de medição, ou seja, elevadas exatidão e precisão. Podemos observar o quão próximo os tiros estão do centro do alvo, bem como a sua regularidade. Em **(b)**, embora os tiros estejam afastados do centro do alvo, ou seja, do valor verdadeiro, existe uma regularidade no espaçamento dos tiros, portanto, representa um sistema com reduzida exatidão, porém elevada precisão. Já em **(c)**, existe um espaçamento maior entre os tiros, no entanto, estão próximos do centro do alvo, deste modo, representa alguma exatidão e precisão. E por fim, em **(a)** é o que se evita e não se deseja em um sistema de medição, ou seja, não se observa um padrão de regularidade entre os tiros e se quer próximos do centro do alvo, portanto, reduzidas exatidão e precisão.

#### 4.1 Avaliação da incerteza

A incerteza traduz a dúvida em torno do valor do mensurando e informá-la significa apresentar uma distribuição dos valores que caracterizam o conhecimento sobre o instrumento e as grandezas de influência sobre o mesmo.

A metodologia para quantificar as incertezas adotada pelo CIPM é o *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement* (ISO GUM). Este guia serve como um documento norteador na apuração e cálculo da incerteza de um dado sistema de medição, portanto, não deve ser considerado como única fonte de referência para tal tarefa, e como o próprio guia cita:

Embora este guia forneça um esquema de trabalho para atribuir incerteza, ele não pode substituir pensamento crítico, honestidade intelectual e habilidade profissional. A avaliação de incerteza não é uma tarefa de rotina, nem um trabalho puramente matemático; depende de conhecimento detalhado da natureza do mensurando e da medição. Assim a qualidade e utilidade da incerteza apresentada para o resultado de uma medição dependem, em última instância, da compreensão, da análise crítica e da integridade daqueles que contribuíram para atribuir o valor da mesma.

(ISO GUM, 2012)

O ISO GUM (2012) recomenda que a avaliação dos componentes de incerteza seja classificada em duas categorias, tipos A e B, e estas categorias não tem relação com as palavras aleatório ou sistemático.

O propósito da classificação tipo A e tipo B é o de indicar as duas maneiras diferentes de avaliar os componentes da incerteza e serve apenas para discussão. A classificação não se propõe indicar que haja qualquer diferença na natureza dos componentes. Ambos os tipos de avaliação são baseados em distribuições de probabilidade e os componentes de incerteza resultantes de cada tipo são quantificados por variâncias ou desvios padrão.

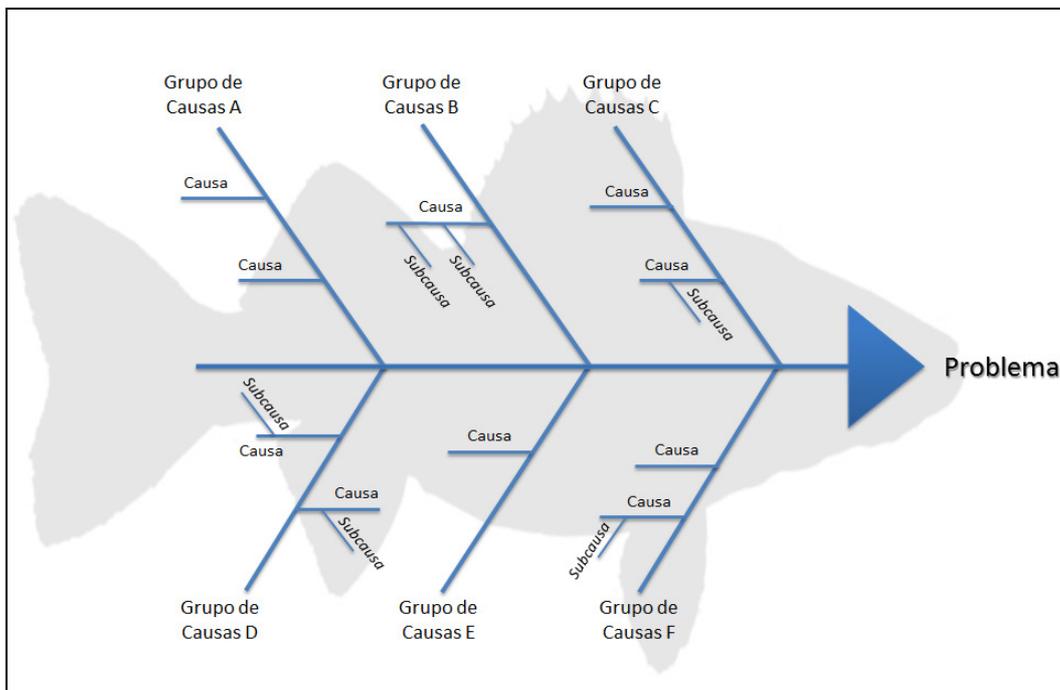
(ISO GUM, 2012)

As incertezas tipo A são aquelas avaliadas por métodos estatísticos geralmente de natureza aleatória, ou seja, estimada a partir de  $n$  observações. A média pode ser utilizada para estimar o valor da grandeza medida e, as variâncias experimental e da média, podem ser usadas para estimar a dispersão dos resultados, bem como a incerteza da medição. Em geral, assume-se uma distribuição normal ou gaussiana.

Já as incertezas tipo B geralmente são aquelas avaliadas por métodos nos quais não é possível obter repetidas observações, podendo assumir diversas funções de densidade de probabilidade (triangular, retangular, trapezoidal, normal), em virtude da falta de conhecimento sobre o valor de uma grandeza. Eis alguns exemplos de incertezas tipo B:

- Resolução do instrumento;
- Informações provenientes de certificados de calibração;
- Incertezas atribuídas a dados de referência em manuais;
- Especificações de fabricantes.

Uma forma gráfica de ilustração das incertezas em um sistema de medição seria por meio do diagrama de Ishikawa, também conhecido como diagrama de causa e efeito ou espinha de peixe (Figura 4-2). A metodologia de construção é bastante simples: a espinha dorsal constitui a incerteza combinada do mensurando a ser obtida e desta, partem espinhas secundárias que representam as incertezas das grandezas de influência sobre o mensurando. Por fim, as secundárias ramificam-se em espinhas menores, representando as avaliações tipos A e B de cada grandeza de influência. Mesmo após a montagem, o diagrama pode sofrer simplificações em virtude de contribuições insignificantes de determinadas incertezas.

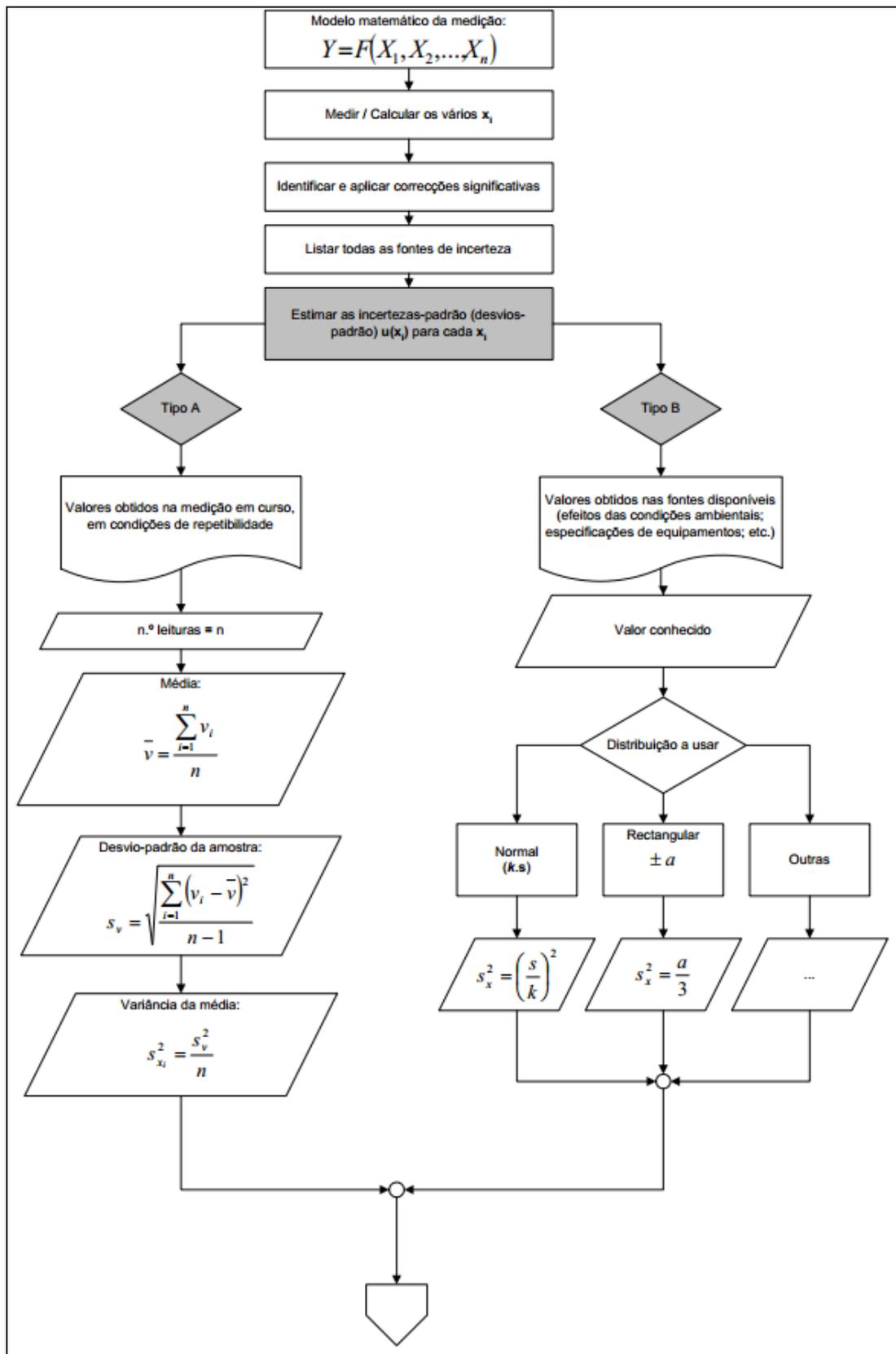


**Figura 4-2.** Exemplo de diagrama de Ishikawa<sup>9</sup>.

O método de propagação das incertezas proposto pelo ISO GUM é obtido a partir do modelo matemático da equação de medição. Embora a utilização do ISO GUM seja um consenso internacional, existem algumas limitações quanto à utilização dele quando o modelo matemático da equação de medição é extremamente complicado. Diante desta situação, métodos numéricos são recomendados, como por exemplo, o método de simulação de Monte Carlo.

O roteiro para cálculo de incertezas é descrito no item 8 do ISO GUM (2012), portanto, seria redundante descrevê-lo aqui. Então, preferiu-se ilustrar este roteiro, bem como a combinação das incertezas, através do fluxograma descrito nas Figuras 4-3 e 4-4. O que se apresenta nas seções a seguir é a aplicação do item 8 do ISO GUM (2012) especificamente para as calibrações e ensaios realizados com os gravímetros relativos Scintrex CG-5.

<sup>9</sup>Disponível em: <http://universoprojeto.wordpress.com/2014/01/28/diagrama-de-ishikawa-causa-e-efeito-espinha-de-peixe/>. Acesso em 17 de outubro de 2014.



**Figura 4-3.** Fluxograma simplificado para ilustrar o roteiro de cálculo de incertezas segundo o ISO GUM (2012)<sup>10</sup>.

<sup>10</sup> Disponível em: < <http://www.peb.ufrj.br/cursos/ErrosIncertezas.pdf>>. Acesso em: 18 de novembro de 2014.

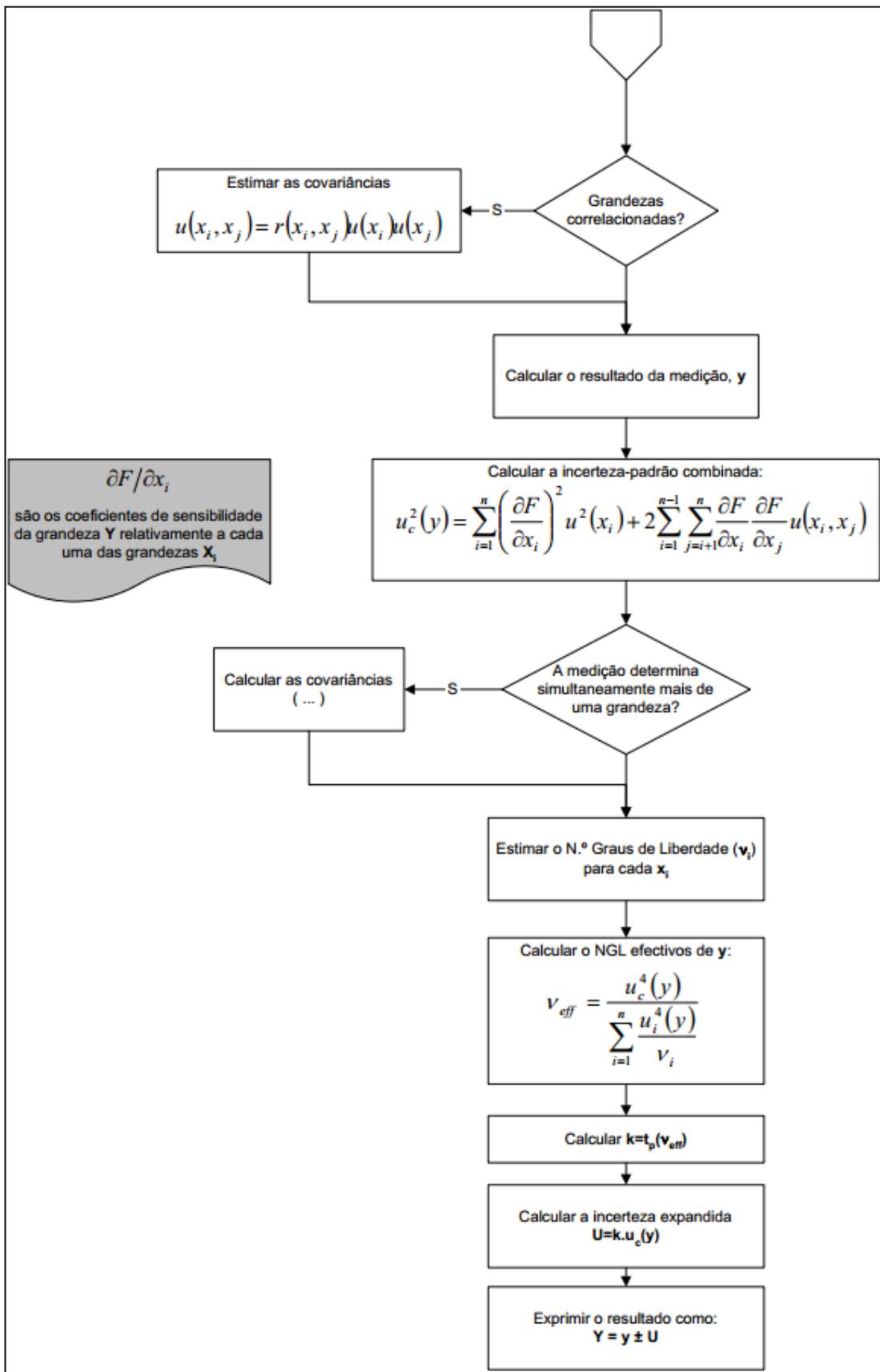


Figura 4-4. Continuação do fluxograma.

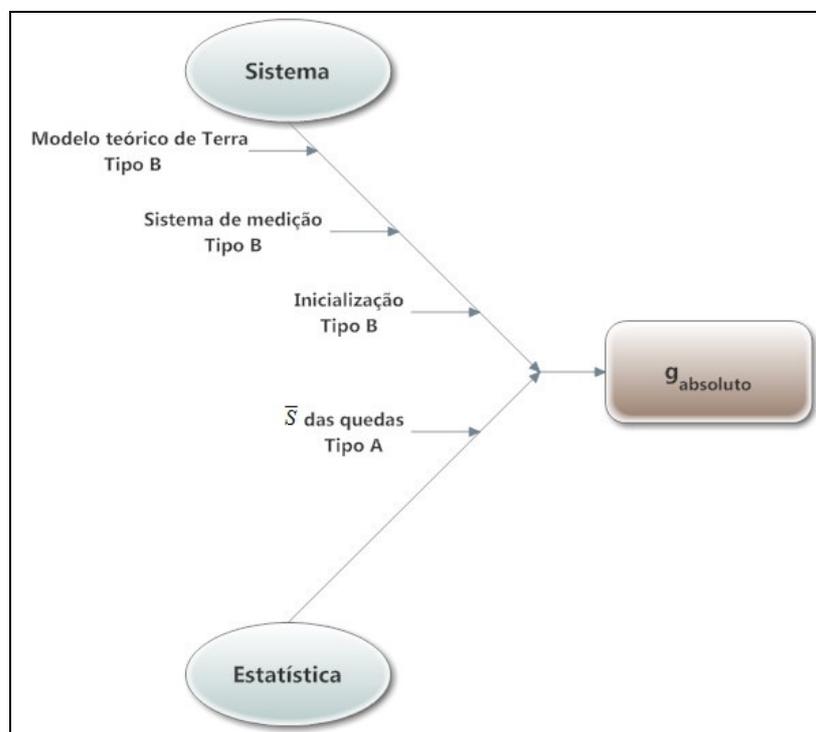
## 4.2 Correções e incerteza associada às determinações absolutas de gravidade

As correções realizadas nas determinações absolutas de gravidade, segundo Micro-g LaCoste (2012), são agrupadas em:

- Modelo teórico de Terra;
- Sistema de medição.

O primeiro item refere-se aos efeitos de marés terrestres, carregamento oceânico, pressão barométrica e efeitos de movimentação do polo. Já no segundo item, são tratadas as influências instrumentais devido aos efeitos de curvatura das frentes de onda do laser, da posição e velocidade inicial do corpo de prova e da transferência do valor de gravidade para uma altura específica.

O tratamento da incerteza destas correções é realizado pelo **software g** (Micro-g LaCoste, 2012) e sua estimativa baseia-se nas experiências vivenciadas em laboratório pela equipe da Micro-g LaCoste. Maiores detalhes podem ser visualizados na Figura 4-5 e na Tabela 4-1.



**Figura 4-5.** Componentes de incerteza associadas às medidas absolutas utilizando gravímetros Micro-g LaCoste.

**Tabela 4-1.** Incertezas padrão típicas de um gravímetro absoluto FG-5. Em Marés terrestres e Carregamento oceânico os valores deverão ser multiplicados pelas suas respectivas correções.

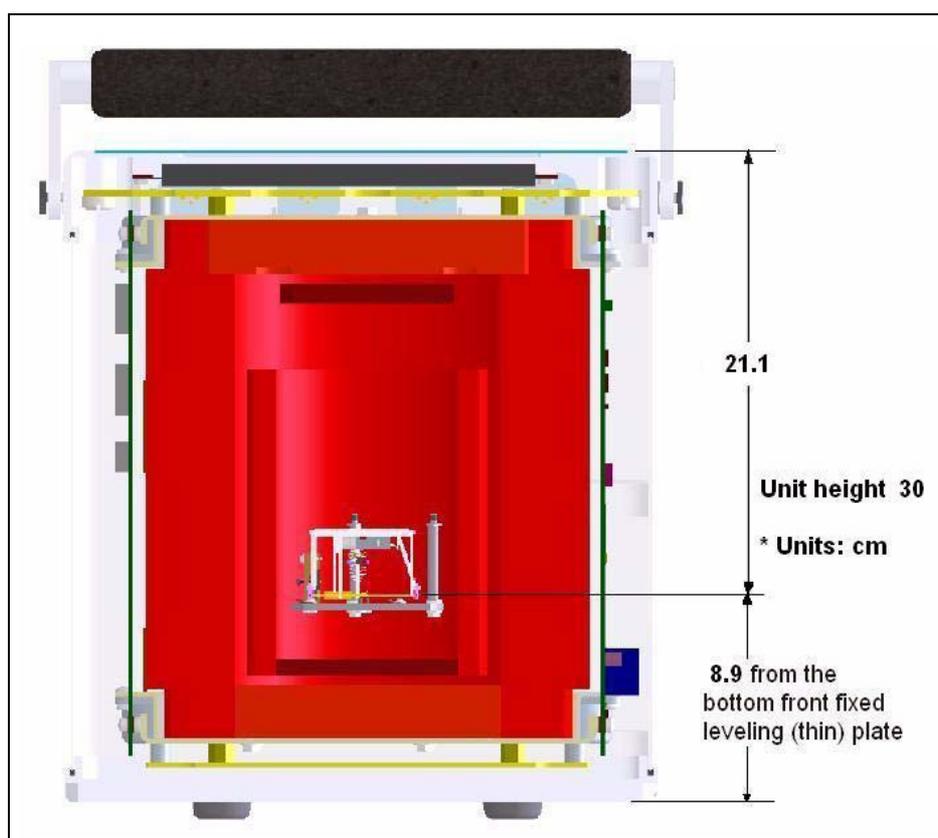
<b>Modelagem</b>			
Marés terrestres ( $\mu\text{Gal}$ )		$0,001 \times \text{Correção}$	
Carregamento oceânico ( $\mu\text{Gal}$ )		$0,1 \times \text{Correção}$	
Pressão barométrica ( $\mu\text{Gal}$ )		1	
Movimento polar ( $\mu\text{Gal}$ )		0,05	
<b>Sistema de Medição</b>		<b>Inicialização</b>	
Laser ( $\mu\text{Gal}$ )	0,05	Sistema ( $\mu\text{Gal}$ )	1
Oscilador de rubídio ( $\mu\text{Gal}$ )	0,5	GVG ( $\mu\text{Gal}/\text{cm}$ )	0,03
Tipo de gravímetro ( $\mu\text{Gal}$ )	1,1		

### 4.3 Correções e incerteza associada às determinações relativas de gravidade

Antes de determinar os intervalos de gravidade, seja em calibrações ou ensaios, as leituras precisam ser corrigidas de alguns efeitos inerentes ao instrumento e ao modelo teórico de Terra. Os gravímetros Scintrex CG-5 permitem ao operador habilitar ou não correções importantes como:

- Correção de inclinação – Correção do desnivelamento do instrumento dentro de uma faixa de tolerância ( $\pm 200$  segundos de arco);
- Correção de deriva – Correção de deriva instrumental em virtude da relaxação do sistema elástico. Diferentemente dos gravímetros LC & R, os gravímetros Scintrex necessitam determinar a taxa de deriva *a priori*, isto é, antes da aquisição. Portanto, o gravímetro é posicionado sobre um local estável e repetidas leituras são realizadas por um período mínimo de 24 h com a finalidade de determinar a taxa de deriva. Esta taxa é utilizada para corrigir as leituras durante o tempo de aquisição dos dados.
- Correção de maré – Correção devido ao efeito de marés terrestres proveniente da interação Sol-Lua com a Terra, que afeta o valor da aceleração resultante. O modelo utilizado pelo instrumento nesta correção é o de Longman (1959).

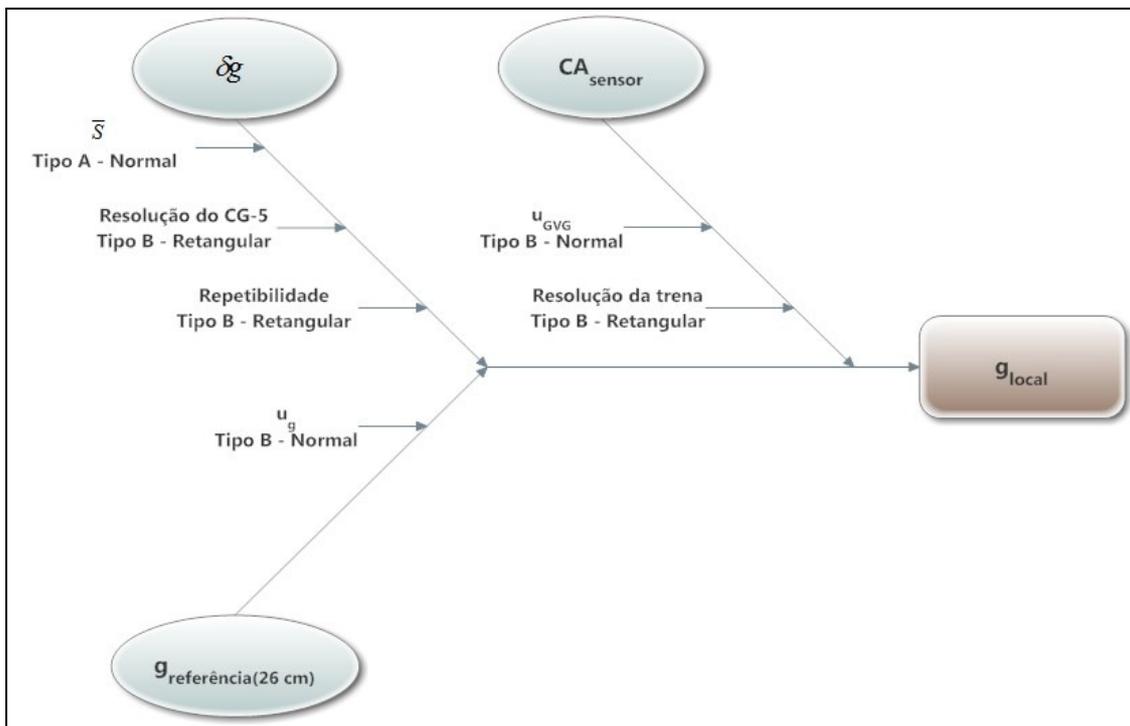
Outra correção importante a ser aplicada na determinação da *gravidade* é a de altura do sensor. Necessariamente o gravímetro utiliza um tripé para nivelá-lo. A distância do sensor à base do instrumento é 8,9 cm (Figura 4-6) e como o instrumento permanece sobre o tripé, a distância da base do instrumento ao solo é aproximadamente 17,1 cm, totalizando 26 cm de altura do sensor ao solo. Portanto, esta correção deve ser aplicada quando se deseja informar o valor de gravidade no nível de referência do piso e negligenciá-la introduz um erro sistemático.



**Figura 4-6.** Localização do sensor do gravímetro Scintrex CG-5 (Scintrex, 2010).

#### **4.3.1 Fontes de incerteza no processo de calibração dos gravímetros Scintrex CG-5**

As fontes de incerteza nos processos de calibrações e ensaios são similares, incluindo apenas mais um componente tipo B nos ensaios devido à determinação do coeficiente residual linear de escala para cada instrumento após a sua calibração. A Figura 4-7 e a Tabela 4-2 ilustram estes componentes de incerteza tipos A e B considerados aqui no processo de calibração de gravímetro do tipo Scintrex CG-5.



**Figura 4-7.** Componentes de incerteza considerados na calibração de gravímetros do tipo Scintrex CG-5.

Explicitando o diagrama, em  $g_{\text{referência}(26\text{cm})}$  é representada a incerteza padrão combinada do valor de gravidade da estação de referência. Se este componente de incerteza estiver representado na forma de incerteza expandida, será preciso recuperar a incerteza padrão combinada a partir do fator de abrangência  $k$ . Este fator representa o nível de confiabilidade metrológica obtida a partir de uma distribuição *t-Student*. Na maioria dos casos são utilizados  $k = 2$  ou  $k = 3$ .

Em  $\delta g$  estão representados os componentes de incerteza tipos A e B referente aos intervalos medidos. No diagrama da Figura 4-7 é possível identificar um componente tipo A, representado pelo desvio padrão da média dos  $n$  intervalos obtidos e dois componentes tipo B referentes à resolução e repetibilidade do instrumento.

Em  $CA_{\text{sensor}}$  estão representados os componentes de incerteza devido à correção de altura do sensor. Assim, propõem-se dois componentes de incerteza tipo B: um em virtude do GVG e outro devido à resolução da trena.

**Tabela 4-2.** Descrição das fontes de incerteza consideradas no processo de calibração de gravímetros Scintrex CG-5.

Fontes de incerteza	Incertezas padrão	Tipo	Cálculo	Distribuição de probabilidade	Graus de liberdade
$\delta g$	Desvio padrão da média	A	$\bar{s} = \frac{s}{\sqrt{n}}$	Normal	$n - 1$
	Resolução do gravímetro	B	$u_{res(CG-5)} = \frac{0,001}{\sqrt{12}}$	Retangular	$\infty$
	Repetibilidade	B	$u_{rep(CG-5)} = \frac{0,005}{\sqrt{3}}$	Retangular	$\infty$
$g_{referência(26cm)}$	Incerteza padrão combinada do valor de $g$ na estação de referência	B	$u_g = \frac{U}{k}$	Normal	$\infty$
$CA_{sensor}$	Incerteza padrão combinada do GVG	B	$u_{GVG} = \frac{U}{k}$	Normal	$\infty$
	Resolução da trena	B	$u_{res(trena)} = \frac{0,001}{\sqrt{12}}$	Retangular	$\infty$

Uma vez estabelecido os componentes de incerteza das grandezas de entrada, aplica-se a metodologia estabelecida pelo ISO GUM para propagação das mesmas, conforme mencionado na seção 4.1.

Primeiro utiliza-se o GVG local para transferir o valor de gravidade da estação de referência no nível do piso para a altura do sensor. Deste modo:

$$g_{referência(26cm)} = g_{referência(piso)} + CA_{sensor} \quad (4-1)$$

Em (4-1) a  $CA_{sensor}$  será uma correção subtrativa. Pela Lei da Gravitação Universal, o sensor está afastado do centro de massa da Terra, portanto, o valor de  $g$  na altura do sensor será menor do que o valor de  $g$  no piso.

Determinam-se os coeficientes de sensibilidade:

$$\frac{\partial g_{\text{referência}(26\text{cm})}}{\partial g_{\text{referência}(\text{piso})}} = 1; \quad \frac{\partial g_{\text{referência}(26\text{cm})}}{\partial CA_{\text{sensor}}} = 1 \quad (4-2)$$

Substitui-se a equação (4-2) na equação da lei de propagação de incertezas, conforme o ISO GUM (2012) e se obtêm a incerteza padrão combinada da aceleração da gravidade da estação de referência na altura do sensor do CG-5:

$$u_{g(\text{referência}(26\text{cm}))} = \sqrt{u_{g(\text{referência-piso})}^2 + u_{CA_{\text{sensor}}}^2} \quad (4-3)$$

Com o valor de  $g$  e sua respectiva incerteza ajustada para a altura do sensor, estabelecemos a equação de medição:

$$g_{\text{local}(\text{piso})} = g_{\text{referência}(26\text{cm})} + \delta g + CA_{\text{sensor}} \quad (4-4)$$

Combinam-se as incertezas tipos A e B de cada grandeza de entrada e determinam-se os coeficientes de sensibilidade:

$$\frac{\partial g_{\text{local}(\text{piso})}}{\partial g_{\text{referência}(26\text{cm})}} = 1; \quad \frac{\partial g_{\text{local}(\text{piso})}}{\partial \delta g} = 1; \quad \frac{\partial g_{\text{local}(\text{piso})}}{\partial CA_{\text{sensor}}} = 1 \quad (4-5)$$

Utilizando novamente a lei de propagação de incertezas, obtemos a incerteza padrão combinada da aceleração da gravidade na nova estação no nível de referência do piso:

$$u_{g(\text{local-piso})} = \sqrt{u_{g(\text{referência}(26\text{cm}))}^2 + u_{\delta g}^2 + u_{CA_{\text{sensor}}}^2} \quad (4-6)$$

Cabe a quem realiza o processamento decidir se o valor de gravidade determinado se referirá ao piso ou à altura do sensor. Se for decidido informar ao nível de referência do piso, a correção de altura do sensor na equação (4-4) será aditiva.

Definida e calculada a incerteza padrão combinada através da equação (4-6), precisamos calcular o número efetivo de graus de liberdade pela equação de Welch-Satterthwaite, conforme o ISO GUM (2012), para determinar o fator de abrangência e representar a incerteza padrão combinada na forma de incerteza expandida:

$$v_{eff} = \frac{u_c^4 (g_{local})}{\sum_i^N \frac{u_i^4}{v_i}} \quad (4-7)$$

A representação do resultado final será na forma:

$$Y = y \pm U \quad (4-8)$$

onde:

$$U = k \cdot u_c$$

y – Valor de gravidade determinado;

U – Incerteza expandida.

#### 4.3.2 O coeficiente linear residual de escala dos gravímetros Scintrex CG-5

Quando gravímetros relativos são produzidos, os fabricantes necessitam construir uma escala de medição para estes instrumentos. Seja com os gravímetros analógicos LC & R ou com os gravímetros digitais Scintrex CG-5, os fabricantes procuram adotar um coeficiente de escala linear para que as leituras instrumentais sejam convertidas em leituras usuais, ou seja, em mGal. Então, uma forma de verificar o quão a escala do instrumento concorda com a realidade é realizar medidas em locais cujos valores de gravidade são conhecidos e bem determinados por um gravímetro absoluto. Geralmente esta verificação é realizada em uma linha de calibração gravimétrica.

Nem sempre a escala projetada para os gravímetros relativos é coincidente com a escala de um instrumento absoluto, então quando os valores medidos pelos instrumentos relativos são comparados aos valores medidos por um instrumento absoluto, é verificada uma pequena discrepância entre as medidas. Deste modo, justifica-se a necessidade de determinar um coeficiente linear residual de escala para cada gravímetro relativo, fazendo com que os intervalos de gravidade medidos por estes instrumentos se aproximem dos valores obtidos pelo gravímetro absoluto.

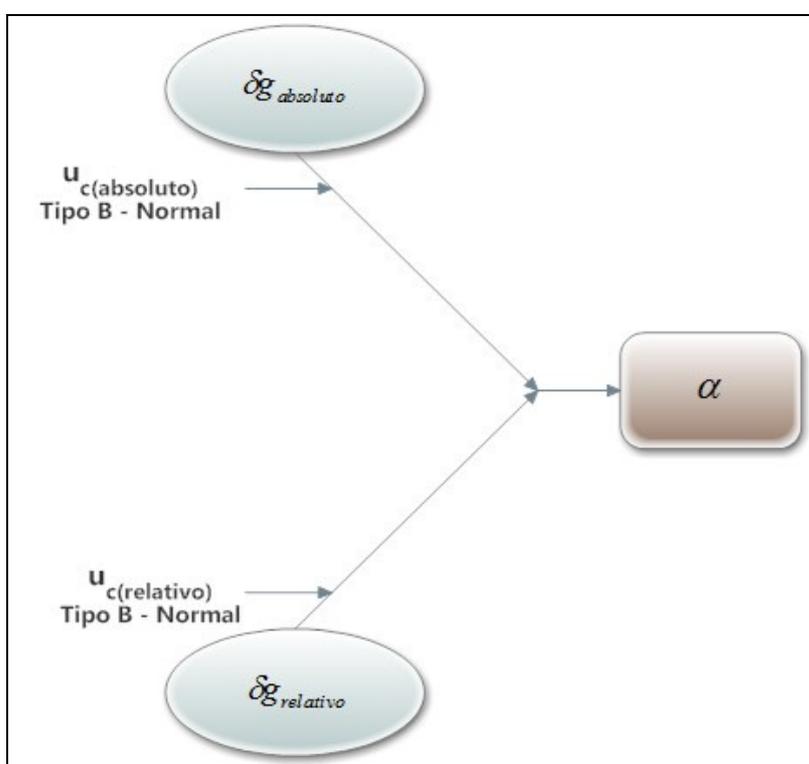
Este coeficiente é representado pela razão entre os intervalos absolutos de gravidade e os intervalos relativos medidos pelo instrumento em questão e o valor de  $\alpha$  é próximo a um:

$$\alpha = \frac{\delta g_{absoluto}}{\delta g_{relativo}} \quad (4-9)$$

Assim, para tornar completo o processo de calibração, os gravímetros relativos Scintrex CG-5 do LabGrav/ON são levados até a LCGAN para medir os intervalos de gravidade. Como os valores absolutos de gravidade na LCGAN são conhecidos, o coeficiente linear residual de escala de cada instrumento é obtido utilizando a equação (4-9). A determinação deste coeficiente linear residual de escala implica em alterar a constante de calibração do instrumento, conhecida nos gravímetros Scintrex CG-5 como GCAL1, que é utilizada para converter as leituras instrumentais em mGal.

Da experiência vivenciada no LabGrav/ON com os gravímetros Scintrex CG-5 #600 e #839, é observado que estes instrumentos medem intervalos de gravidade sempre maiores do que os intervalos obtidos a partir dos valores absolutos medidos pelo A-10 #011, deste modo, os coeficientes lineares residuais de escala dos respectivos instrumentos, terão valor menor que um.

A melhor representação de  $\alpha$  dar-se-á acompanhada de sua respectiva incerteza. O método de propagação é análogo ao realizado na subseção anterior. Deste modo, representam-se as fontes de incerteza através do diagrama da Figura 4-8:



**Figura 4-8.** Diagrama de Ishikawa representando os componentes de incerteza do coeficiente linear residual de escala.

A seguir, calculam-se os coeficientes de sensibilidade:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \delta g_{absoluto}} = \frac{1}{\delta g_{relativo}} ; \frac{\partial \alpha}{\partial \delta g_{relativo}} = -\frac{\delta g_{absoluto}}{\delta g_{relativo}^2} \quad (4-10)$$

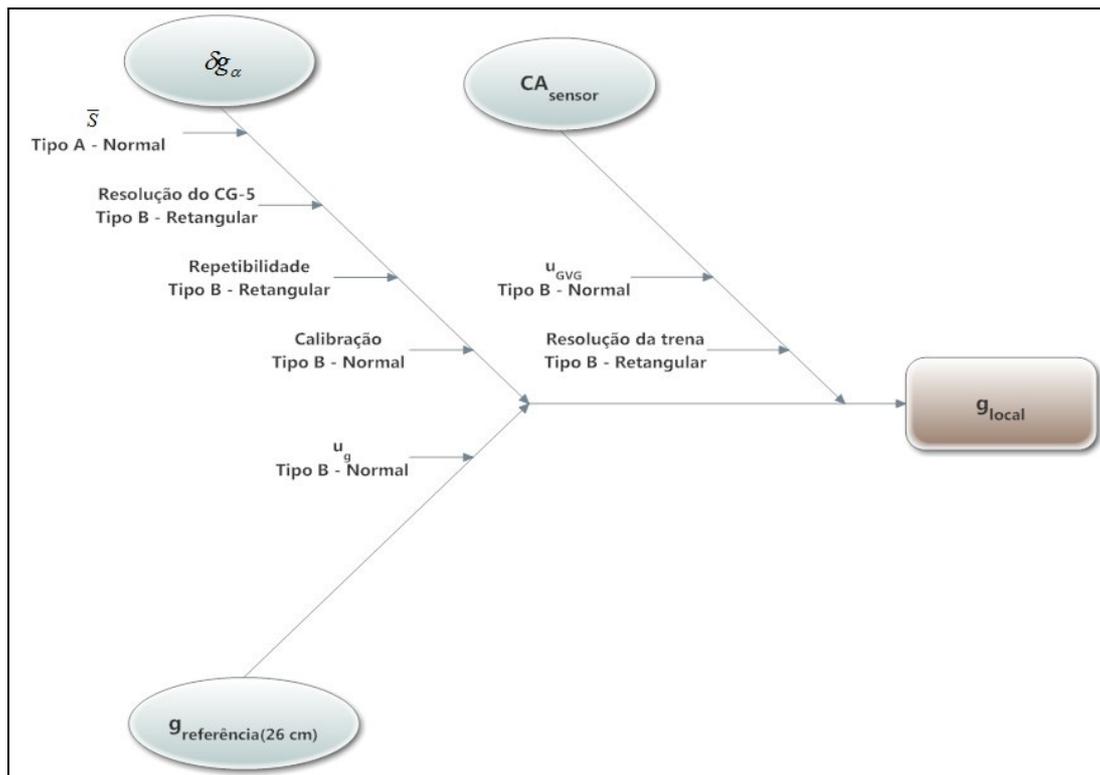
Substituindo (4-10) na lei de propagação de incertezas e fazendo algumas simplificações, a incerteza padrão combinada de  $\alpha$  é dada por:

$$u_{\alpha} = \frac{1}{\delta g_{\text{relativo}}} \sqrt{u_{\delta g_{\text{(absoluto)}}}^2 + \alpha^2 \cdot u_{\delta g_{\text{(relativo)}}}^2} \quad (4-11)$$

Calcula-se o número de graus de liberdade através da equação (4-7) para determinar o fator de abrangência e, finalmente, representa-se  $\alpha$  na forma da equação (4-8).

### 4.3.3 Fontes de incerteza nos ensaios de intervalos gravimétricos

Conforme mencionado anteriormente, as fontes de incerteza consideradas nos ensaios são similares às das calibrações, acrescentando apenas mais um componente de incerteza do coeficiente linear residual de escala, que representa a calibração do instrumento. Portanto, será ilustrado aqui apenas o diagrama de incerteza detalhado pela sua tabela, visto que o procedimento de propagação é análogo ao que foi descrito na seção 4.3.1.



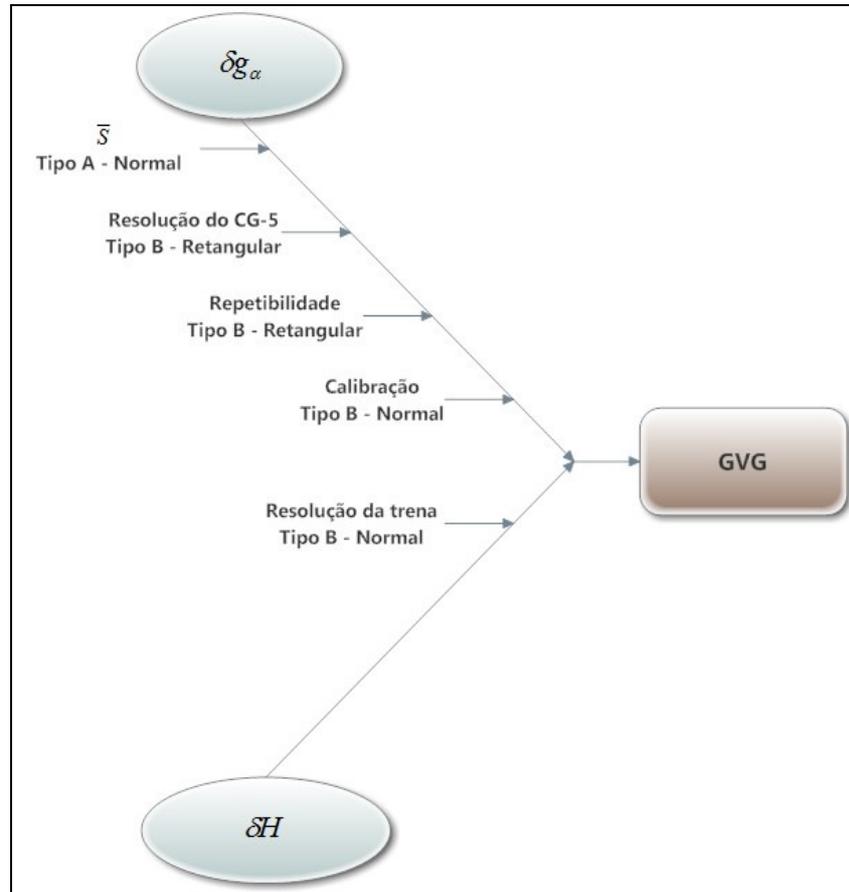
**Figura 4-9.** Diagrama de Ishikawa representando os componentes de incerteza considerados em ensaios utilizando gravímetros Scintrex CG-5.

**Tabela 4-3.** Descrição das fontes de incerteza da Figura 4-9.

Fontes de incerteza	Incertezas padrão	Tipo	Cálculo	Distribuição de probabilidade	Graus de liberdade
$\delta g_\alpha$	Desvio padrão da média	A	$\bar{s} = \frac{s}{\sqrt{n}}$	Normal	$n - 1$
	Resolução do gravímetro	B	$u_{res(CG-5)} = \frac{0,001}{\sqrt{12}}$	Retangular	$\infty$
	Repetibilidade	B	$u_{rep(CG-5)} = \frac{0,005}{\sqrt{3}}$	Retangular	$\infty$
	Calibração	B	$u_{\alpha(CG-5)} = \frac{U}{k}$	Normal	$\infty$
$g_{refer\acute{e}ncia(26cm)}$	Incerteza padrão combinada do valor de g na estação de referência	B	$u_{cg} = \frac{U}{k}$	Normal	$\infty$
$CA_{sensor}$	Incerteza padrão combinada do GVG	B	$u_{GVG} = \frac{U}{k}$	Normal	$\infty$
	Resolução da trena	B	$u_{res(trena)} = \frac{0,001}{\sqrt{12}}$	Retangular	$\infty$

#### 4.3.4 Fontes de incerteza no ensaio do GVG

Para o GVG os seguintes componentes de incerteza são considerados:



**Figura 4-10.** Diagrama de incerteza para a determinação do gradiente vertical de gravidade.

**Tabela 4-4.** Descrição das fontes de incerteza consideradas na determinação do GVG utilizando os gravímetros Scintrex CG-5 e uma trena graduada em mm.

Fontes de incerteza	Incertezas padrão	Tipo	Cálculo	Distribuição de probabilidade	Graus de liberdade
$\delta g_{\alpha}$	Desvio padrão da média	A	$\bar{s} = \frac{s}{\sqrt{n}}$	Normal	$n - 1$
	Resolução do gravímetro	B	$u_{res(CG-5)} = \frac{0,001}{\sqrt{12}}$	Retangular	$\infty$
	Repetibilidade	B	$u_{rep(CG-5)} = \frac{0,005}{\sqrt{3}}$	Retangular	$\infty$
	Calibração	B	$u_{\alpha(CG-5)} = \frac{U}{k}$	Normal	$\infty$
$\delta H$	Resolução da trena	B	$u_{res(trena)} = \frac{0,001}{\sqrt{12}}$	Retangular	$\infty$

$\delta g_{\alpha}$  descreve a mesma característica dos diagramas anteriores e  $\delta H$  representa a contribuição da trena ao medir o desnível do tripé ou bancada. Atualmente só é considerada a incerteza de resolução da trena para  $\delta H$ , pois as determinações realizadas até o momento não tem utilizado trenas calibradas, portanto, informações provenientes de certificado de calibração das mesmas são desconhecidas.

A equação de medição do GVG é dada por:

$$GVG = \frac{\delta g_{\alpha}}{\delta H} \quad (4-12)$$

Calculam-se os coeficientes de sensibilidade:

$$\frac{\partial GVG}{\partial \delta g_{\alpha}} = \frac{1}{\delta H}; \quad \frac{\partial GVG}{\partial \delta H} = -\frac{\delta g_{\alpha}}{\delta H^2} \quad (4-13)$$

Substituindo a equação (4-13) na lei de propagação de incertezas, e fazendo algumas simplificações, a incerteza padrão combinada do GVG é dada por:

$$u_{GVG} = \frac{1}{\delta H} \sqrt{u_{\delta g_a}^2 + GVG^2 \cdot u_{\delta H}^2} \quad (4-14)$$

Calcula-se o número de graus de liberdade através da equação (4-7) para determinar o fator de abrangência e, finalmente, representa-se o GVG na forma da equação (4-8).

# Capítulo 5

## Resultados e Discussão

Os procedimentos de calibração e ensaio dos gravímetros Scintrex CG-5 listados nos apêndices A a C foram testados em campo e em laboratório. Além da calibração, os gradientes verticais de gravidade em cada estação da LCGAN foram determinados para posterior comparação com os valores reportados pelos gravímetros LC & R. Além da LCGAN, o GVG também foi determinado em algumas estações da RGFB.

Todas as determinações do GVG realizadas com os gravímetros Scintrex CG-5 contaram com a participação do gravímetro #600, entretanto, somente algumas com o #839. Isto se justifica pelo fato do #839 chegar ao LabGrav/ON um ano após o #600 e como os fatores orçamento e tempo não permitiram redundância das determinações com o #839, priorizaram-se as estações próximas ao Observatório Nacional para conclusão do projeto.

O processamento dos dados de gravimetria absoluta foi realizado utilizando-se o **software g**, desenvolvido pela própria Micro-g LaCoste, enquanto os dados de gravimetria relativa foram tratados por programas desenvolvidos em FORTRAN90 e MatLab. Estes programas realizam o tratamento estatístico (Vuolo, 1996) com base na metodologia proposta pelo ISO GUM (Mendes, 2005).

Embora os gravímetros CG-5 realizam uma correção de deriva a *priori*, na maioria dos casos fez-se necessário uma correção residual de deriva, admitindo-se um modelo linear.

### 5.1 Resultado da ICAG-2013

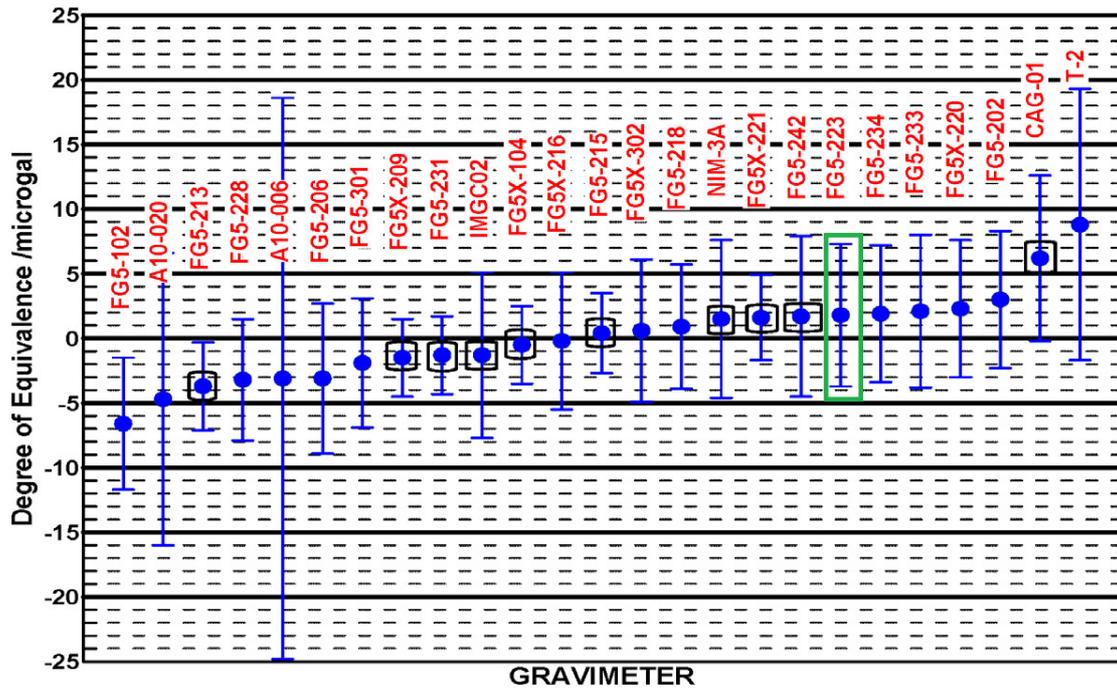
A última ICAG ocorreu nas primeiras semanas de novembro de 2013. No total, 25 instrumentos foram comparados, incluindo o FG-5 #223 do Observatório Nacional. A

comparação contou com sete modelos diferentes de gravímetros absolutos, mas o modelo FG-5 foi dominante.

A participação do FG-5 #223 foi realizada após o período da comparação, em fevereiro de 2014, pois apresentou problemas no laser e o reparo não foi realizado em tempo hábil para a data oficial do evento. Embora houvessem transcorrido três meses da comparação oficial, a participação do FG-5 #223 pôde ser incluída sem maiores problemas, uma vez que as medidas poderiam ser rastreadas pelo gravímetro supercondutor OSG-CT040.

Na ICAG cada grupo é responsável pelo transporte, montagem e desmontagem do instrumento, ajustes e realização das medidas sobre os pilares estabelecidos no protocolo técnico. Os dados da medição sobre cada pilar foram entregues à comissão organizadora da comparação para o processamento final e posterior publicação dos resultados obtidos. Dos 25 instrumentos, 23 apresentaram concordância, inclusive o FG-5 #223 do Observatório Nacional.

A Figura 5-1 exibe o grau de equivalência entre os instrumentos. Os valores circundados em preto representam institutos metrológicos nacionais ou institutos designados, e em verde, o resultado obtido com o FG-5 #223 do Observatório Nacional, cujo valor é de  $+1,8 \pm 5,5 \mu\text{Gal}$ , sendo  $k = 2$ . Este resultado é de grande importância para implantar a proposta apresentada na seção 3.1.



**Figura 5-1.** Grau de equivalência entre os gravímetros absolutos participantes da ICAG-2013 (Francis *et al.*, 2014).



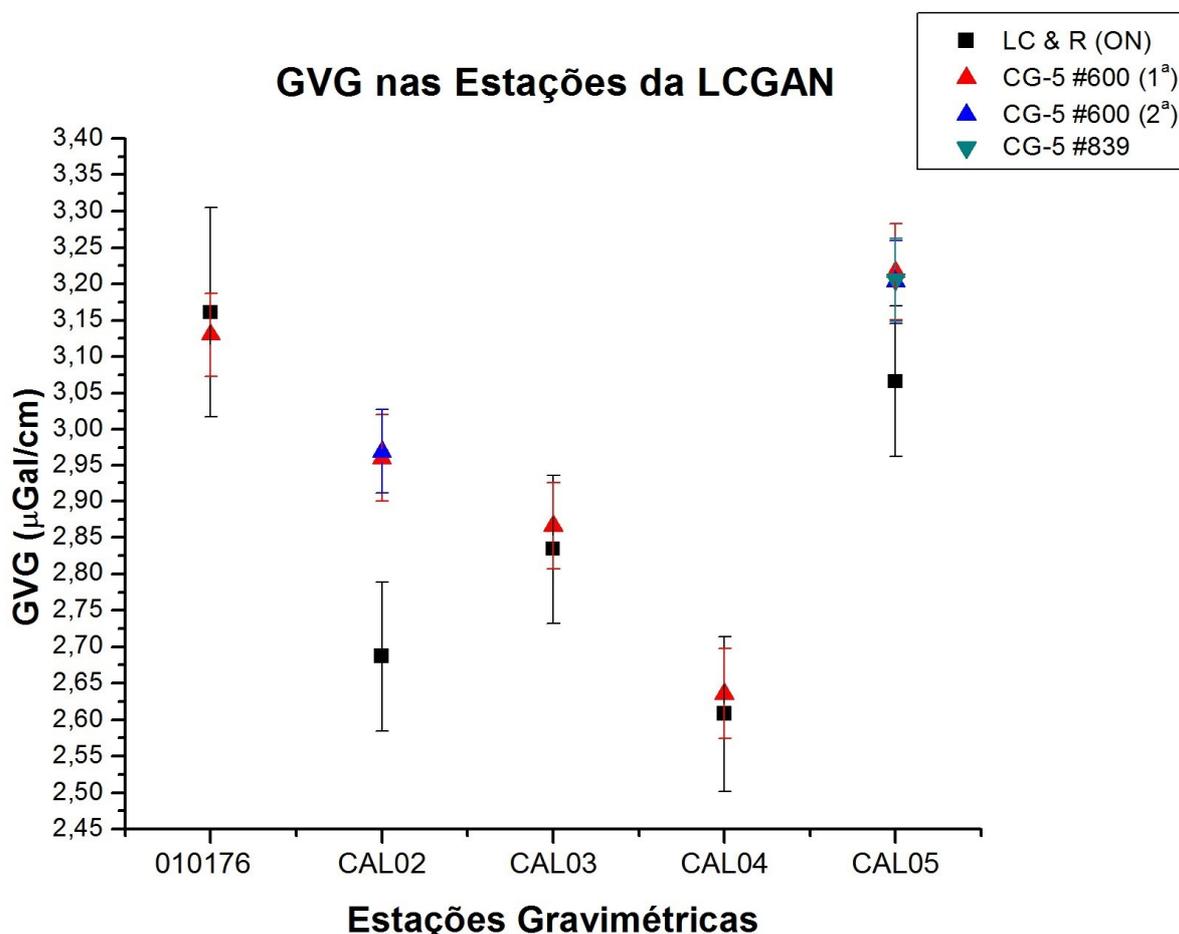
**Figura 5-2.** Gravímetro FG-5 #223 sobre o pilar B4 do *Walferdange Laboratory Underground for Geodynamics* em Luxemburgo durante a ICAG-2013.

## 5.2 GVG na LCGAN e em outras estações da RGFB

A Tabela 5-1 e a Figura 5-3 exibem o resultado das determinações dos gradientes verticais de gravidade nas estações da LCGAN utilizando os gravímetros relativos Scintrex CG-5. Os resultados são comparados aos valores determinados pela equipe do LabGrav/ON em 2009 utilizando gravímetros LC & R. A incerteza é expressa na forma de incerteza expandida cujo fator de abrangência utilizado é igual a 2, ou seja, 95,45% de confiabilidade metrológica.

**Tabela 5-1.** Determinação do gradiente vertical de gravidade nas estações da LCGAN.

Estação	GVG ( $\mu\text{Gal}/\text{cm}$ )			
	LC & R (ON)	CG-5 #600 (1ª)	CG-5 #600 (2ª)	CG-5 #839
010176	$-3,161 \pm 0,144$	$-3,130 \pm 0,057$	-	-
CAL02	$-2,687 \pm 0,102$	$-2,960 \pm 0,060$	$-2,969 \pm 0,058$	-
CAL03	$-2,834 \pm 0,102$	$-2,866 \pm 0,059$	-	-
CAL04	$-2,608 \pm 0,106$	$-2,636 \pm 0,062$	-	-
CAL05	$-3,066 \pm 0,104$	$-3,217 \pm 0,066$	$-3,203 \pm 0,057$	$-3,206 \pm 0,057$



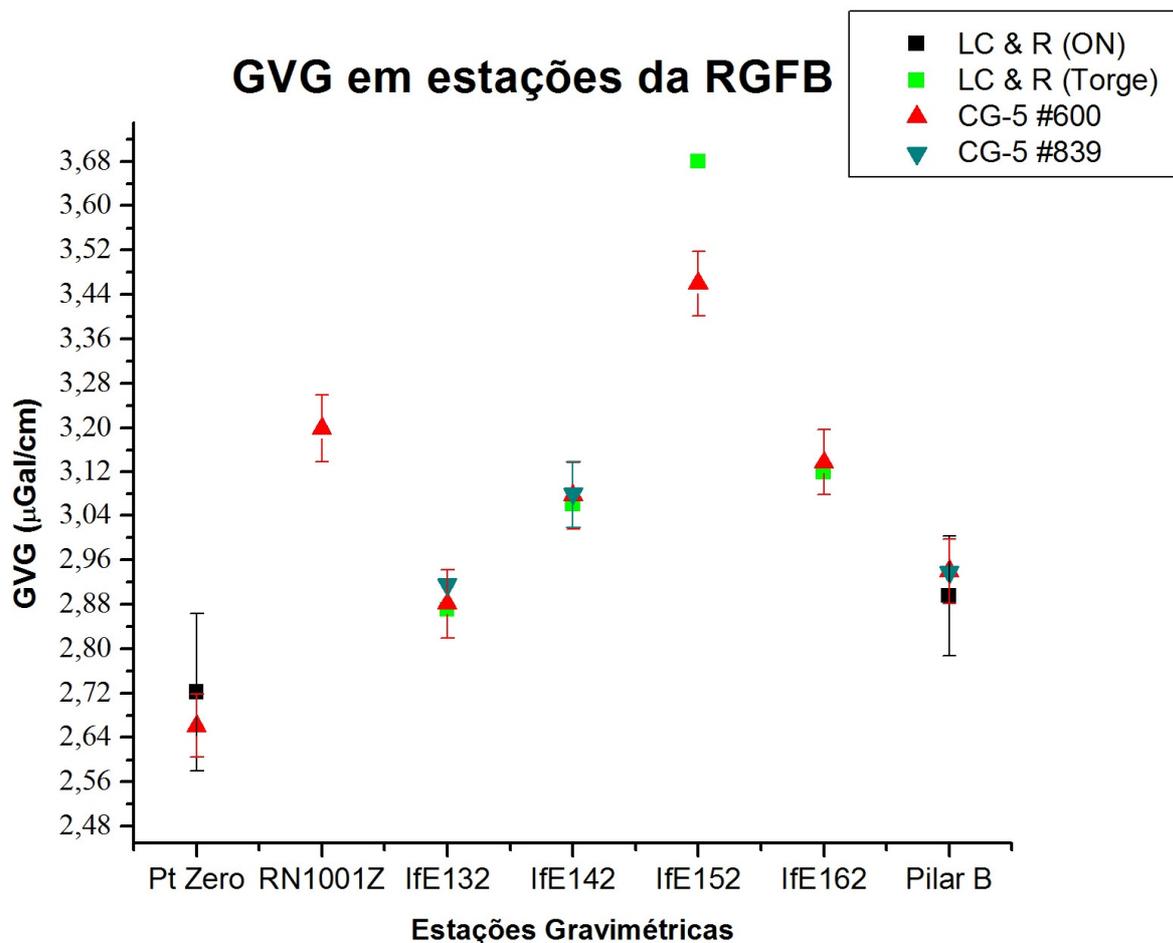
**Figura 5-3.** Módulo do gradiente vertical de gravidade nas estações da LCGAN.

É possível observar a concordância entre os LC & R e os CG-5 nas estações 010176, CAL03 e CAL04, contudo, isso não ocorre nas estações CAL02 e CAL05. Em virtude dessas discrepâncias, uma segunda determinação foi realizada na CAL02 apenas com o gravímetro #600 e na CAL05 com ambos, #600 e #839, simultaneamente. A segunda determinação em cada uma destas estações é coincidente com a primeira, inferindo, portanto, que os valores do GVG em CAL02 e CAL05 com os LC & R podem estar incorretos.

Para os gradientes verticais de gravidade nas demais estações da RGFB (Tabela 5-2 e Figura 5-4) novamente é possível observar a concordância entre os LC & R e os CG-5 para a maioria das estações, com exceção para a estação IfE 152. As estações denominadas por “IfE” são as estações do programa de gravimetria absoluta realizado na América do Sul, mencionado no Capítulo 2. Das sete estações deste programa, quatro foram utilizadas neste trabalho para determinação do GVG. Não é descartada a hipótese de existir algum efeito sazonal nesse sítio como carga e descarga periódica de aquíferos, uma vez que as determinações de Torge *et al.* (1994) foram realizadas no final de fevereiro a início de março, enquanto a realizada neste trabalho corresponde ao mês de setembro de 2012.

**Tabela 5-2.** Determinação do gradiente vertical de gravidade em algumas das estações da RGFB com  $k = 2$ .

Estação	GVG ( $\mu\text{Gal/cm}$ )				
	LC & R		Scintrex CG-5		
	(Torge)	(ON)	#600	#839 (1 <sup>a</sup> )	#839 (2 <sup>a</sup> )
PtZero	-	$-2,722 \pm 0,142$	$-2,661 \pm 0,057$	-	-
RN1001Z	-	-	$-3,199 \pm 0,060$	-	-
IfE132	-2,87	-	$-2,881 \pm 0,062$	$-2,915 \pm 0,060$	-
IfE142	-3,06	-	$-3,076 \pm 0,061$	$-3,079 \pm 0,059$	$-3,084 \pm 0,060$
IfE152	-3,68	-	$-3,460 \pm 0,058$	$-3,206 \pm 0,057$	-
IfE162	-3,12	-	$-3,137 \pm 0,059$	-	-
Pilar B	-	$-2,895 \pm 0,108$	$-2,940 \pm 0,058$	$-2,938 \pm 0,058$	-



**Figura 5-4.** Módulo do gradiente vertical de gravidade em algumas das estações da RGFB.

### 5.3 Resultado dos intervalos de gravidade na LCGAN

A reocupação da LCGAN foi organizada em três campanhas. A primeira foi realizada em novembro de 2011 somente com o gravímetro Scintrex CG-5 #600, totalizando 6 intervalos de gravidade entre cada estação. A segunda foi realizada em abril de 2012 novamente com o gravímetro Scintrex CG-5 #600, totalizando 2 intervalos por estação. E finalmente a terceira, foi realizada em agosto de 2012 com o gravímetro Scintrex CG-5 #839, totalizando 6 intervalos por estação. Os procedimentos técnico-científicos de ensaio e calibração foram empregados em todas as campanhas.

Para avaliar o comportamento do gravímetro, primeiramente são determinados os intervalos e os valores de gravidade reproduzidos por cada instrumento. Por conseguinte, seus coeficientes residuais de escala são determinados e estes são aplicados aos intervalos medidos. Após a correção, os valores de gravidade reproduzidos pelos gravímetros relativos devem se aproximar dos valores absolutos. O fabricante assume que este coeficiente de

escala tem comportamento linear durante sua calibração. A linha de calibração que o fabricante utiliza possui cerca 70 km de extensão, reproduzindo aproximadamente 119 mGal de amplitude (Scintrex, 2010).

Os valores absolutos de gravidade informados por Sousa *et al.* (2010) foram reprocessados considerando os novos gradientes reportados neste trabalho. Para efeito de comparação, estes valores referem-se à altura do sensor do CG-5 (Tabela 5-3). Note que a estação de partida escolhida foi a estação “PtZero” em virtude do fácil acesso no retorno para fechamento da campanha, pois está localizada na entrada do LabGrav/ON, enquanto a estação 010176 encontra-se em uma sala do Museu de Astronomia e Ciências Afins.

**Tabela 5-3.** Valores absolutos de gravidade reprocessados para a altura do sensor (26 cm) dos gravímetros CG-5 com  $k = 2$ .

Estação	Valores absolutos de gravidade (mGal)
PtZero	978 790,777 ± 0,022
CAL02	978 601,007 ± 0,022
CAL03	978 419,411 ± 0,022
CAL04	978 325,442 ± 0,022
CAL05	978 162,920 ± 0,022

A Tabela 5-4 exhibe os intervalos de gravidade obtidos com os gravímetros Scintrex CG-5 #600 e #839 não corrigidos de seus respectivos coeficientes residuais de escala.

**Tabela 5-4.** Intervalos de gravidade ao longo da LCGAN. T e R representam o total e a quantidade de intervalos rejeitados, respectivamente, durante o processamento com  $k = 2$ .

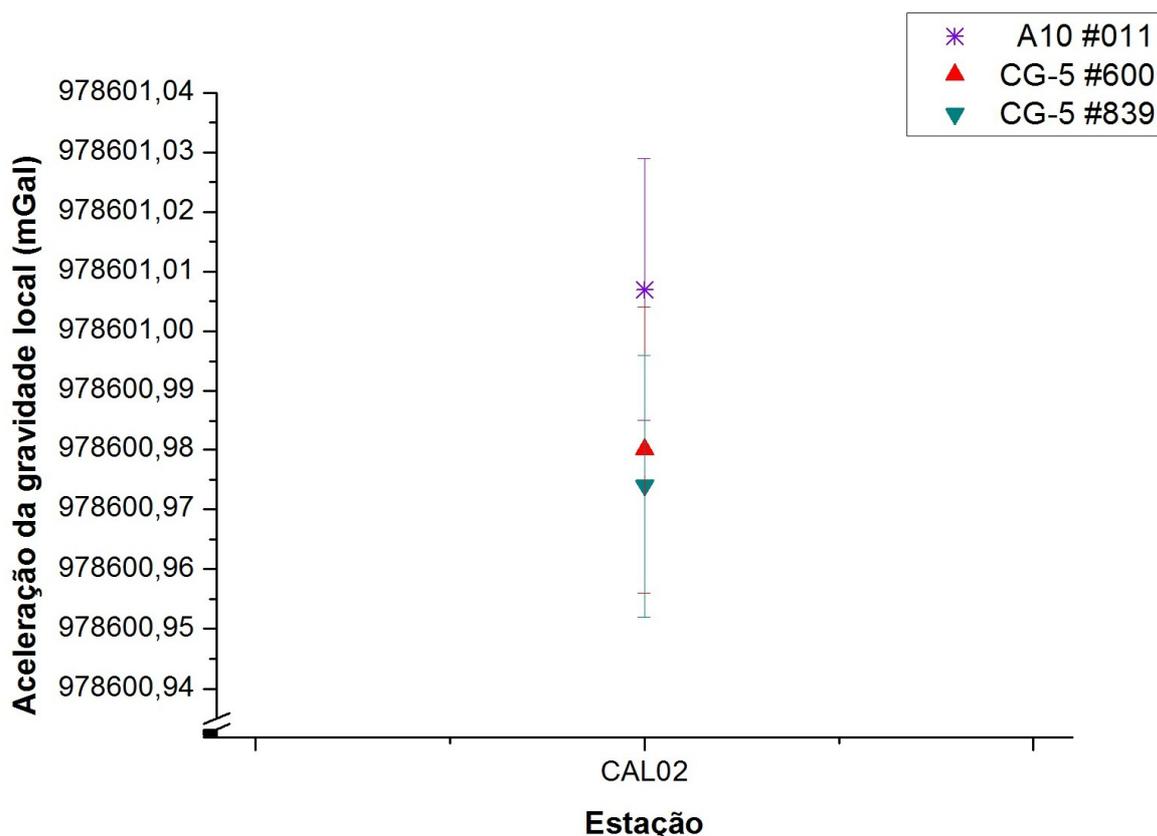
Intervalo	Valor do intervalo (mGal)						
	A10 #011	CG-5 #600	T	R	CG-5 #839	T	R
PtZero-CAL02	189,770 ± 0,030	189,797 ± 0,008	8	0	189,803 ± 0,006	6	1
CAL02-CAL03	181,596 ± 0,030	181,566 ± 0,008	8	1	181,586 ± 0,006	6	0
CAL03-CAL04	93,969 ± 0,030	93,982 ± 0,007	8	1	93,984 ± 0,006	6	1
CAL04-CAL05	162,522 ± 0,030	162,529 ± 0,006	8	1	162,525 ± 0,007	6	0

É possível observar a coerência entre ambos gravímetros relativos. Contudo, seus valores quando comparados aos absolutos, são mais discrepantes, deste modo, faz-se necessário a determinação de um coeficiente residual de escala para cada instrumento. Ainda é possível visualizar que estes dois gravímetros Scintrex possuem a característica de medir intervalos sempre maiores do que os absolutos, com exceção do trecho CAL02-

CAL03, no qual ocorre justamente o inverso em ambos instrumentos. Não se descarta a possibilidade de haver algum problema com o valor absoluto de CAL02, uma vez que esta estação é usada para fazer a determinação dos dois primeiros intervalos, e é justamente aonde ocorrem as maiores discrepâncias quando comparados aos demais. A Tabela 5-5 e as figuras 5-4 a 5-7 ilustram os valores de gravidade propagados ao longo da LCGAN a partir da estação “PtZero”.

**Tabela 5-5.** Valores de gravidade ao longo da LCGAN obtidos com os gravímetros Scintrex CG-5 #600 e #839 com  $k = 2$ .

Estações	Valores de gravidade (mGal)		
	A10 #011	CG-5 #600	CG-5 #839
CAL02	978 601,007 ± 0,022	978 600,980 ± 0,024	978 600,974 ± 0,022
CAL03	978 419,411 ± 0,022	978 419,414 ± 0,026	978 419,388 ± 0,022
CAL04	978 325,442 ± 0,022	978 325,432 ± 0,026	978 325,404 ± 0,022
CAL05	978 162,920 ± 0,022	978 162,903 ± 0,026	978 162,880 ± 0,022



**Figura 5-5.** Aceleração da gravidade na estação CAL02 da LCGAN.

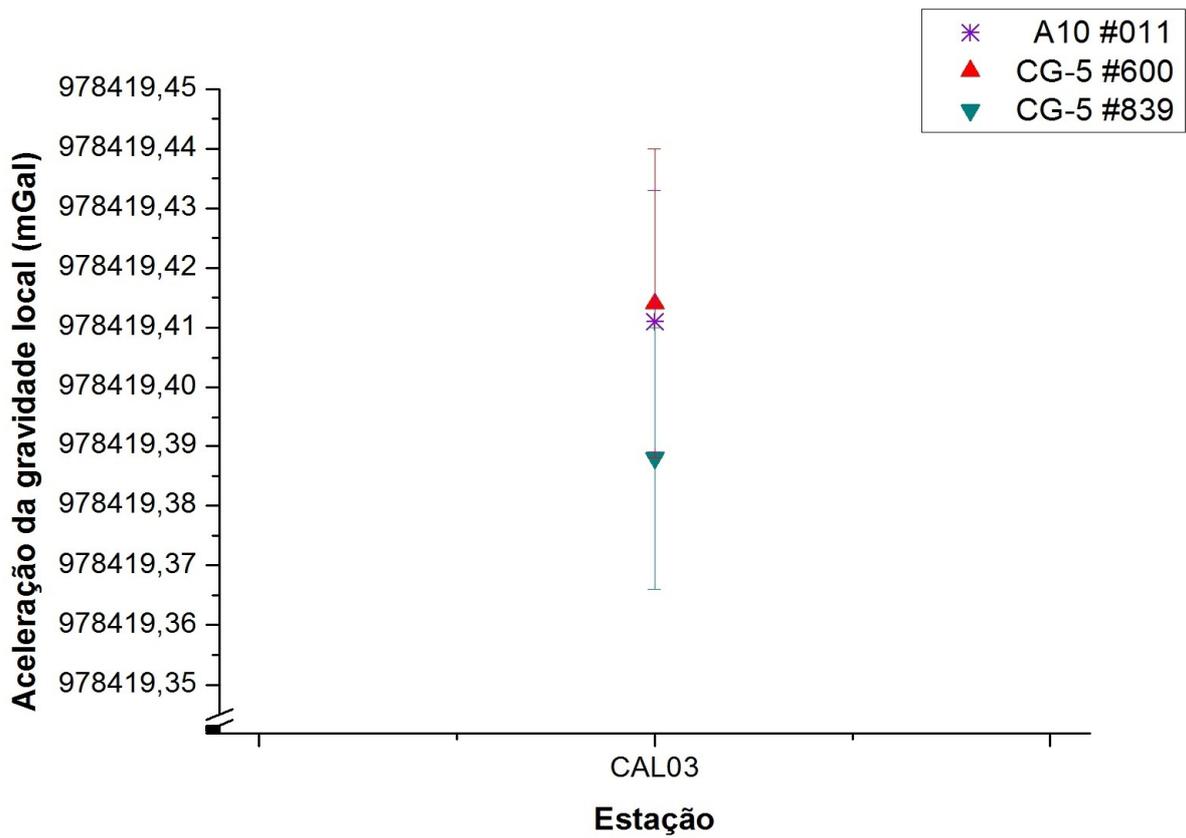


Figura 5-6. Aceleração da gravidade na estação CAL03 da LCGAN.

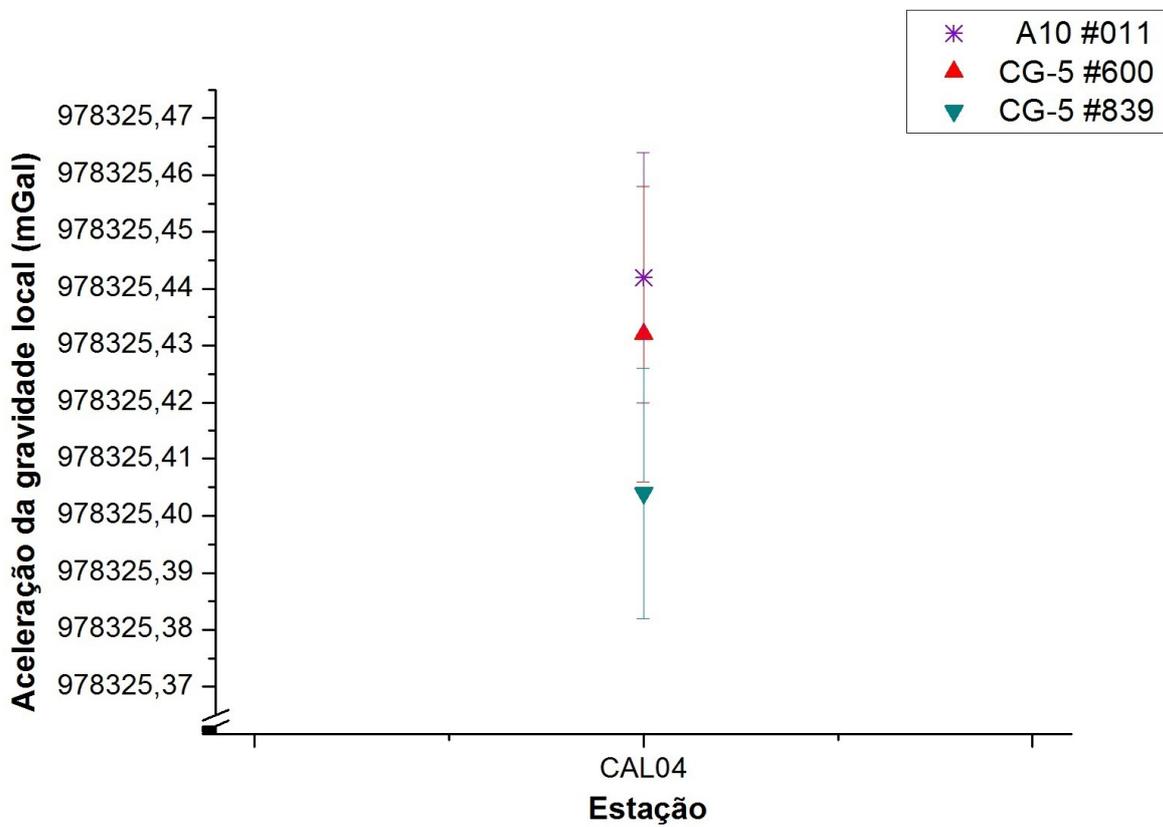
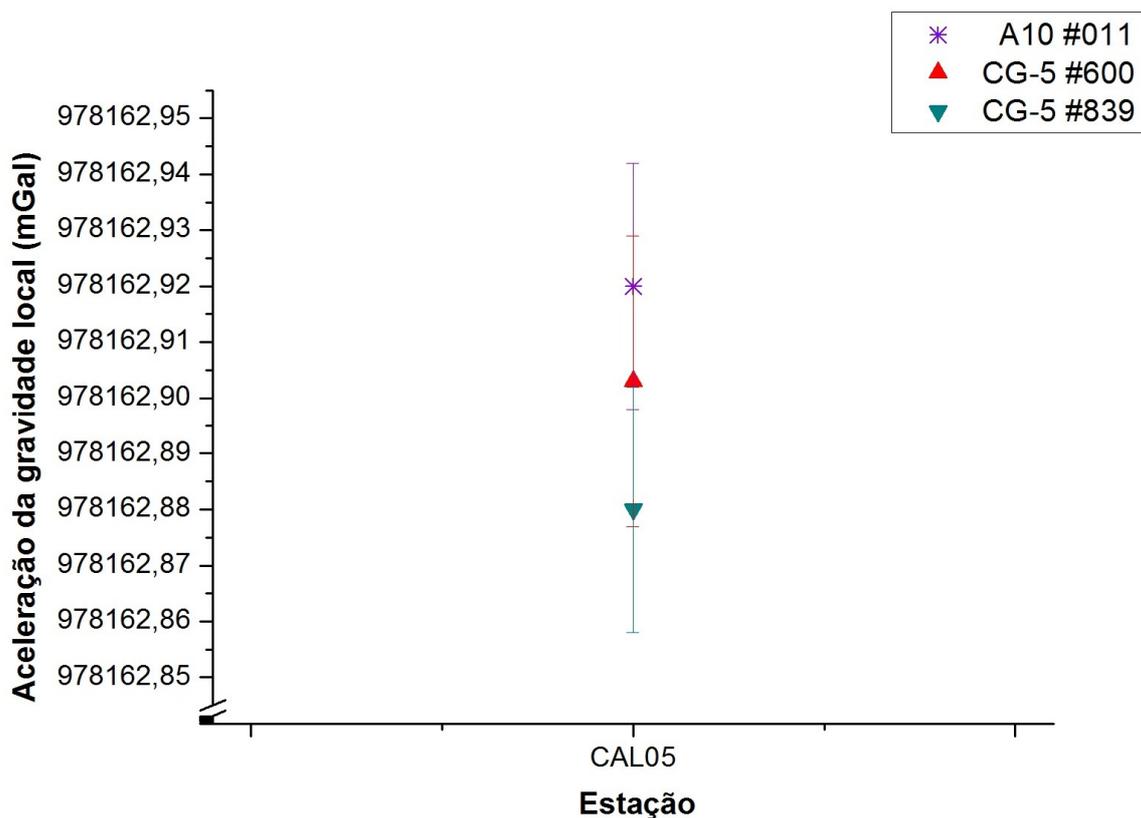


Figura 5-7. Aceleração da gravidade na estação CAL04 da LCGAN.



**Figura 5-8.** Aceleração da gravidade na estação CAL05 da LCGAN.

Os coeficientes residuais de escala de ambos os gravímetros foram determinados conforme descrito na seção 4.3.2 e seus valores podem ser visualizados na Tabela 5-6. Estes foram aplicados aos intervalos descritos na Tabela 5-4, e nas tabelas 5-7 e 5-8 é feito um comparativo entre os intervalos considerando ou não a aplicação deste coeficiente.

**Tabela 5-6.** Coeficientes lineares residuais de escala determinados para ambos os gravímetros Scintrex CG-5 em questão com  $k = 2$ .

Gravímetro	Amplitude medida na LCGAN (mGal)	Coefficiente linear residual de escala
A-10 #011	$627,857 \pm 0,030$	-
CG-5 #600	$627,874 \pm 0,014$	$0,999973 \pm 0,000052$
CG-5 #839	$627,898 \pm 0,012$	$0,999935 \pm 0,000052$

**Tabela 5-7.** Comparativo entre os intervalos relativos de gravidade medidos pelo gravímetro Scintrex CG-5 #600 corrigidos do coeficiente linear residual de escala com  $k = 2$ .

Intervalo	Valores dos Intervalos			
	A-10 #011	CG-5 #600		
		Não-corrigido	Corrigido	Discrepância (após a correção)
PtZero-CAL02	189,770 ± 0,030	189,797 ± 0,008	189,792 ± 0,012	0,022
CAL02-CAL03	181,596 ± 0,030	181,566 ± 0,008	181,561 ± 0,012	-0,035
CAL03-CAL04	93,969 ± 0,030	93,982 ± 0,007	93,978 ± 0,008	0,009
CAL04-CAL05	162,522 ± 0,030	162,529 ± 0,006	162,525 ± 0,010	0,003

**Tabela 5-8.** Comparativo entre os intervalos relativos de gravidade medidos pelo gravímetro Scintrex CG-5 #839 corrigidos do coeficiente linear residual de escala com  $k = 2$ .

Intervalo	Valores dos Intervalos			
	A-10 #011	CG-5 #839		
		Não-corrigido	Corrigido	Discrepância (após a correção)
PtZero-CAL02	189,770 ± 0,030	189,803 ± 0,006	189,791 ± 0,012	0,021
CAL02-CAL03	181,596 ± 0,030	181,586 ± 0,006	181,574 ± 0,012	-0,022
CAL03-CAL04	93,969 ± 0,030	93,984 ± 0,006	93,978 ± 0,008	0,009
CAL04-CAL05	162,522 ± 0,030	162,525 ± 0,007	162,514 ± 0,010	-0,008

Observa-se que aplicando o coeficiente linear residual de escala aos intervalos reproduzidos por ambos os gravímetros relativos há uma aproximação em relação aos intervalos absolutos, exceto para o trecho CAL02-CAL03, o que era de se esperar em virtude do coeficiente linear residual de escala ter valor menor do que um, uma vez que este trecho apresentou intervalo medido menor do que o intervalo absoluto, comportamento diferente dos demais intervalos. Duas hipóteses são sustentadas:

- O valor absoluto de CAL02 pode estar incorreto, uma vez que ele liga os intervalos PtZero-CAL02 e CAL02-CAL03, cujo as discrepâncias são maiores;
- Como os intervalos PtZero-CAL02 e CAL02-CAL03 possuem amplitudes similares é possível que para intervalos desta magnitude o coeficiente de escala do instrumento tenha comportamento diferente do regime linear.

# Capítulo 6

## Conclusões e Perspectivas

Nesta dissertação foram apresentados os procedimentos técnico-científicos para ensaios e calibrações de gravímetros Scintrex modelo CG-5, bem como a análise crítica das fontes de incerteza associadas à medição da aceleração da gravidade local utilizando estes instrumentos. Estas propostas mostram-se satisfatórias e também contribuem para a política de gestão da qualidade do LabGrav/ON. O trabalho aqui apresentado não deve ser encarado como uma proposta única e encerrada para os instrumentos estudados em questão, mas como propulsor, vislumbrando o aprimoramento das práticas existentes.

As práticas experimentais vivenciadas evidenciam que embora os gravímetros Scintrex, modelo CG-5 apresentem melhor exatidão, precisão e facilidade de operação em relação aos LC & R modelo G, em algumas situações os LC & R apresentam melhor desempenho em relação aos Scintrex. Apesar do instrumento possuir um filtro sísmico para descartar valores anômalos que são interpretados como ruído, ainda assim a microssismicidade é um fator crítico em certos locais, não sendo possível a obtenção da precisão e exatidão reportadas pelo fabricante. É possível que alguma tecnologia similar à supermola, utilizada em gravímetros absolutos, venha integrar o instrumento para situações onde a vibração local é algo significativo nos ensaios. Problemas dessa natureza foram detectados tanto na calibração quanto em ensaios, utilizando estes gravímetros. Na grande maioria das vezes a causa da vibração era conhecida, como por exemplo, o funcionamento de alguma máquina nas proximidades do local de ensaio, ou no caso da ocupação da LCGAN, devido ao intenso tráfego de veículos pesados, uma vez que as estações da LCGAN estão localizadas às margens da BR-354. Portanto, reconhecidas as fontes de

vibração, os ensaios eram interrompidos e quando dissipados os efeitos, os ensaios eram retomados.

Para o GVG estuda-se uma maneira de automatizar o ensaio em substituição ao que aqui foi apresentado, isto é, medidas piso-bancada ou piso-tripé. A ideia da automação é fazer com que o operador tenha a menor intervenção possível sobre o instrumento, visto que para cada iteração piso-bancada ou piso-tripé o operador necessita colocar o instrumento sobre o tripé que o acompanha. Como o tripé encaixa-se em uma superfície cônica na base do instrumento, isso pode fazer com que o operador cometa um pequeno choque mecânico entre o instrumento e o tripé, acarretando discrepâncias nas leituras em torno de 20  $\mu$ Gal.

É reconhecida a importância da reestruturação da LCGAN. Três das cinco estações gravimétrica da LCGAN estão localizadas em um trecho de intenso tráfego de veículos pesados, dificultando o processo de calibração dos instrumentos relativos. Sem contar a ausência de segurança para acessar tais estações.

Pretende-se utilizar o protocolo da ICAG-2013 e quando necessário, adaptá-lo às realidades locais do LabGrav/ON, para a comparação dos padrões absolutos A-10 #011 e FG-5 #223 buscando verificar o *offset* do padrão A-10 #011. Uma reocupação da LCGAN está programada para 2015 com o padrão A-10 #011 em conjunto com receptores GNSS geodésicos. A reocupação da LCGAN é importante para garantir a cadeia de rastreabilidade da grandeza gravidade e também para tentar responder a dúvida quanto ao valor absoluto em CAL02.

A amplitude da LCGAN é de aproximadamente 628 mGal e como a aceleração da gravidade varia em latitude, este valor representa metade do intervalo de gravidade produzido entre o norte e o sul do país. Este valor também seria equivalente a diferença de gravidade entre Rio de Janeiro e Brasília. Deste modo, sugere-se a criação de novas linhas de calibração gravimétrica em outras latitudes para cobrir todo o intervalo de gravidade do país.

Planeja-se para o ano de 2015 a redundância das determinações de gradiente vertical de gravidade na estação IfE152 em virtude da discrepância comparada aos valores de Torge *et al.* (1994). Determinações absolutas também são sugeridas nesta e em outras estações da RGFB com ambos os padrões absolutos, seja com o objetivo de reocupar as estações absolutas existentes, seja na substituição de estações cujas determinações foram realizadas com padrões relativos.

Os métodos aqui propostos para estimativa da incerteza da medição utilizando gravímetros Scintrex CG-5 constituem métodos determinísticos descritos pelo ISO GUM. Seria interessante verificar a utilização de métodos estocásticos, como o método de simulação de Monte Carlo para posterior comparação.

# Referências Bibliográficas

- FELIPPES, B. A. de, Aguiar, J. G., Diniz, A. C. G. C. (2011), “Sistema da Qualidade em Laboratórios Universitários: Incentivo ao Ensino, Pesquisa e Extensão”, *Revista de Ensino de Engenharia*, **30** (2): 14-23.
- FRANCIS, O. e Baumann, H. (Coord.) (2014), “Internacional Comparison of Absolute Gravimeters”, Draft A, Versão 11, 32 pp.
- GUM (2012), “Guia para a Expressão da Incerteza da Medição”, *International Organisation for Standardisation*, ABNT & INMETRO, 1ª Edição Brasileira, Rio de Janeiro, 126 pp.
- HAWKING, S. (2005), “Sobre o ombro de gigantes”, 1ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier.
- ISO/IEC 17025 (2005), “General requirements for the competence of testing and calibration laboratories”, *International Organization for Standardization*, Genebra, 2ª edição, 28 pp.
- LACOSTE & ROMBERG, Inc. (2004), Instruction manual model G & D gravity meters, Austin (EUA), 127 pp.
- LONGMAN, I. M. (1959), “Formulas for Computing the Tidal Accelerations Due to the Moon and the Sun”, *Journal of Geophysical Research*, 64(12): 2351-2355.
- MENDES, A., Rosário, P. P. N. dos (2005), “Metrologia e Incerteza da Medição”. 1ª ed. São Paulo: EPSE.
- Micro-g LaCoste, Inc. (2006), “FG-5 Absolute Gravimeter User’s Manual”, Lafayette (EUA), 70 pp.
- Micro-g LaCoste, Inc. (2008), “A-10 Portable Gravimeter User’s Manual”, Lafayette (EUA), 59 pp.
- Micro-g LaCoste, Inc. (2012), “g9 User’s Manual”, Lafayette (EUA), 54 pp.
- SUBIZA PINA, W. H. S. e Sousa, M. A., (2001), “O estado da base de dados gravimétricos do Observatório Nacional (BDG-ON) situação em junho”, *Brazilian Journal of Geophysics*, v19: 325-328.
- Scintrex Ltd. (2010), “CG-5 Scintrex Autograv System Operation Manual”, Concord (Canadá), 312 pp.

SCHMERGE, D. e Francis, O., (2006), "Set standard deviation, repeatability and offset of absolute gravimeter A10-008", *Metrologia* n°43: 414-418.

SOUSA, M. A. de e Santos, A. A. dos (2010), "Absolute gravimetry on the Agulhas Negras Calibration Line", *Revista Brasileira de Geofísica*, **28** (2): 165-174.

SOUSA, M. A. de e Melhorato, R. L. (2014), "Absolute and Relative Gravity Measurements at Brazilian Metrology Laboratories", *3° Congresso Internacional de Metrologia Mecânica*, CD ROM, Gramado.

SOUZA, M. F. de (2006), "Procedimentos de Calibração dos Gravímetros Lacoste & Romberg Modelo 'G' ". Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Geofísica. Observatório Nacional. 115 pp.

TIMMEN, L., Gitlein, O., Müller, J., Strykowski, G. e Forsberg, R., (2008), "Absolute Gravimetry with the Hannover Meters JILAg-3 and FG5-220, and their Deployment in a Danish-German Cooperation", *Fachbeitrag*: 1-13.

TORGE, W, Timmen, L., Röder, R. H. e Schmil, M., (1994), "The IFE absolute gravity program 'South American' 1988-1991, GeodätischeKommission, B299, Munique.

VIM (2012), "Vocabulário Internacional de Metrologia – Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados", Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, Rio de Janeiro, 1ª Edição, 92 pp.

VUOLO, José H (1996), "Fundamentos da teoria de erros", 2ª Ed, São Paulo: Edgard Blücher.

WANG, L.S., Chen, C., Kaban, M.K., Du, J.S., Liang, Q. e Thomas, M., (2014), "The use of the A10-022 absolute gravimeter to construct the relative gravimeter calibration baselines in China", *Metrologia*, **51**: 203-211.

ZUMBERGE, M.A., Rinker, R.L., e Faller, J.E. (1982), "A Portable Apparatus for Absolute Measurements of the Earth's Gravity", *Metrologia* n° 18: 145-152.

Disponível em: <[http://www.on.br/conteudo/coge/servicos/linha\\_de\\_calibracao/linha\\_de\\_calibracao.html](http://www.on.br/conteudo/coge/servicos/linha_de_calibracao/linha_de_calibracao.html)>. Acesso em: 11 de setembro de 2014.

Disponível em: <[http://www.on.br/conteudo/coge/servicos/rede\\_fund\\_grav/rede\\_fund\\_grav.html](http://www.on.br/conteudo/coge/servicos/rede_fund_grav/rede_fund_grav.html)>. Acesso em: 11 de setembro de 2014.

Disponível em: <[http://kcdb.bipm.org/appendixB/appbresults/CCM.G-K2/CCM.G-K2\\_Technical\\_Protocol.pdf](http://kcdb.bipm.org/appendixB/appbresults/CCM.G-K2/CCM.G-K2_Technical_Protocol.pdf)>. Acesso em: 11 de setembro de 2014.

Disponível em: <[http://www.upf.pf/ICET/cd\\_rom\\_bgi/Cours/Niebauer/day1.pdf](http://www.upf.pf/ICET/cd_rom_bgi/Cours/Niebauer/day1.pdf)>. Acesso em: 17 de junho de 2014.

Disponível em: < <http://www.nitmantiqueira.org.br/portal/images/pdf/documentacao/cit-orientacoes-sistema-gestao-qualidade.pdf>>. Acesso em: 20 de agosto de 2014.

Disponível em: <http://www.peb.ufrj.br/cursos/ErrosIncertezas.pdf>. Acesso em: 18 de novembro de 2014.

Disponível em: <http://universoprojeto.wordpress.com/2014/01/28/diagrama-de-ishikawa-causa-e-efeito-espinha-de-peixe/>. Acesso em 17 de outubro de 2014.

# **Apêndice A**

## **Procedimento técnico-científico – Avaliação Rotineira**

 <b>Observatório Nacional</b>	<b>Procedimento Técnico do Laboratório de Gravimetria</b>	<b>Código</b> <b>PT. 06</b>
	<b>Avaliação Rotineira de Gravímetro Scintrex, modelo "CG-5", do LabGrav/ON</b>	<b>Versão</b> <b>00</b>
		<b>Página</b>

## 1 Objetivos

Verificar periodicamente o estado geral de gravímetros relativos Scintrex modelo "CG-5" do LabGrav/ON, estritamente quanto ao seu funcionamento e operacionalidade segundo às especificações do fabricante.

## 2 Definições

### 2.1 Siglas

GT - Gerente Técnico

GQ - Gerente da Qualidade

RGFB - Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira

RNC - Registro de Não Conformidade

### 2.2 Termos

Avaliação Rotineira - É a verificação periódica realizada nos gravímetros.

Verificação - Fornecimento de evidencia objetiva de que um dado item satisfaz requisitos especificados.

*Gravímetro*- Instrumento com o qual se mede a aceleração de gravidade (Figura 1).



Figura 1. Gravímetros relativos Scintrex modelo CG-5.

*Aceleração de gravidade* - É a resultante da aceleração gravitacional e da aceleração centrífuga no ponto considerado sobre a superfície terrestre, depurada das perturbações conjuntas da Lua e do Sol, a maré lunissolar, e da deriva instrumental do gravímetro usado na medição.

<b>Elaborado por</b>	<b>Aprovado por</b>	<b>Data</b> /   /
----------------------	---------------------	----------------------

 Observatório Nacional	<b>Procedimento Técnico do Laboratório de Gravimetria</b>	<b>Código PT. 06</b>
	<b>Avaliação Rotineira de Gravímetro Scintrex, modelo "CG-5", do LabGrav/ON</b>	<b>Versão 00</b>
		<b>Página</b>

*Estação gravimétrica* - Ponto na superfície terrestre no qual se determina a aceleração de gravidade, suas coordenadas geodésicas, a altitude ortométrica e outros dados de interesse à representação do campo de gravidade.

*Latitude geodésica* - Ângulo formado pela normal que passa pelo ponto e sua projeção sobre o plano do equador. Por convenção, a latitude geodésica é positiva no hemisfério norte e negativa no hemisfério sul.

*Longitude geodésica* - Ângulo do diedro formado pelo Meridiano Zero (MZ) ou origem e o meridiano que passa pelo ponto. Por convenção, a longitude geodésica é *positiva* contada por *leste* e *negativa* contada por *oeste* do MZ.

*Medição gravimétrica* - Sequência de três leituras gravimétricas, a intervalos aproximados de um minuto entre uma e outra.

*Fuso horário* - É a região de 15° em longitude, compreendida entre dois meridianos, na qual a Hora Legal coincide com a Hora Civil do meridiano central dessa região. Por definição a *Hora Legal* do *fuso zero* é a Hora de *Greenwich*.

*Altitude geométrica* - Altitude de um local na superfície da Terra referente ao modelo elipsoidal do planeta. O modelo empregado atualmente é o *World Geodetic System 1984 - WGS84*.

*Altitude ortométrica* - Altitude de um local na superfície da Terra referente ao nível médio do mar. O IBGE mantém uma rede altimétrica de precisão no Brasil.

*Referência de Nível* - Marco, usualmente em concreto, implantado pelo IBGE, em cujo topo uma placa metálica materializa o ponto no qual se conhece a altitude ortométrica com precisão milimétrica.

*Deriva instrumental* - É a variação das leituras do gravímetro em uso, resultante das modificações que ocorrem em suas características físicas, num intervalo de tempo. Dependendo das condições de movimento em que o gravímetro se encontra no intervalo de tempo considerado, ela é classificada em *deriva estática*, se o gravímetro permaneceu imóvel, e *deriva dinâmica*, se o gravímetro esteve em movimento.

<b>Elaborado por</b>	<b>Aprovado por</b>	<b>Data</b> /     /
----------------------	---------------------	------------------------

 <b>Observatório Nacional</b>	<b>Procedimento Técnico do Laboratório de Gravimetria</b>	<b>Código PT. 06</b>
	<b>Avaliação Rotineira de Gravímetro Scintrex, modelo "CG-5", do LabGrav/ON</b>	<b>Versão 00</b>
		<b>Página</b>

### 3 Matriz de Responsabilidades

Atividade	Avaliação Rotineira de Gravímetros Scintrex modelo CG-5 do Laboratório de Gravimetria do ON	
	Responsabilidade	Autoridade
Registro do estado geral do gravímetro	Técnico	GT
Limpeza do gravímetro	Técnico	GT
Registro de necessidade de reparos	Técnico	GT
Verificação de parâmetros instrumentais	Técnico	GT
Impossibilidade de execução de avaliação	Técnico	GT

### 4 Documentos de Referência e Complementares

ABNT NBR ISO/IEC 17025: 2005 (2005), Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaios e calibração, *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, Rio de Janeiro, 31 pp.

Scintrex Ltd. (2010), "CG-5 Scintrex Autograv System Operation Manual", Concord (Canadá), 312 pp.

PG.05 - Tratamento de não conformidade, ações preventivas, corretivas e de melhoria.

PG.13 - Gerenciamento de Equipamentos.

PG.15 - Manuseio e Transporte dos Itens de Ensaio e de Calibração.

PG.20 - Validação de Planilhas Eletrônicas e Softwares.

PT.07 - Ensaio de intervalo gravimétrico utilizando gravímetros Scintrex, modelo "CG-5".

<b>Elaborado por</b>	<b>Aprovado por</b>	<b>Data</b> / /
----------------------	---------------------	--------------------

 <b>Observatório Nacional</b>	<b>Procedimento Técnico do Laboratório de Gravimetria</b>	<b>Código PT. 06</b>
	<b>Avaliação Rotineira de Gravímetro Scintrex, modelo "CG-5", do LabGrav/ON</b>	<b>Versão 00</b>
		<b>Página</b>

VIM (2012) - Vocabulário Internacional de Metrologia - Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados, *Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia*, Rio de Janeiro, 1a Edição Luso-Brasileira, 94 pp.

## 5 Atividades

5.1 Os gravímetros são verificados uma vez por mês.

5.2 Registrar o estado geral do gravímetro e de seus acessórios (tripé, cabos, maleta de transporte e outros).

5.3 Executar a limpeza com flanela umedecida em detergente neutro da parte externa do gravímetro, da maleta ou bolsa de transporte e fonte de alimentação. Caso haja necessidade de reparo, registrar no FO.44 - Avaliação Rotineira de Gravímetros Scintrex, modelo "CG-5", do LabGrav/ON.

5.4 Ligar o gravímetro e verificar se o mesmo se encontra nivelado, baterias carregadas e ligado à rede elétrica.

5.5 Desligar o gravímetro, remover sua fonte de alimentação e colocá-lo em sua bolsa ou maleta de transporte.

5.6 Transportar o gravímetro juntamente com o seu tripé para a estação 010176 da RGFB.

5.7 Posicionar o tripé sobre a estação e posteriormente o gravímetro sobre o tripé.

5.8 Ligar o gravímetro e nivelá-lo.

5.9 Verificar a capacidade de armazenamento da memória do instrumento. Mesmo que possua espaço disponível, deverá ser executado o procedimento de limpeza da memória.

5.10 Selecionar SURVEY no menu principal e criar um cabeçalho segundo o modelo da Figura 2. Preencher os campos em GRID REFERENCE com informações das coordenadas geodésicas da estação 010176.

<b>Elaborado por</b>	<b>Aprovado por</b>	<b>Data</b> / /
----------------------	---------------------	--------------------

 Observatório Nacional	<b>Procedimento Técnico do Laboratório de Gravimetria</b>	<b>Código PT. 06</b>
	<b>Avaliação Rotineira de Gravímetro Scintrex, modelo "CG-5", do LabGrav/ON</b>	<b>Versão 00</b>
		<b>Página</b>

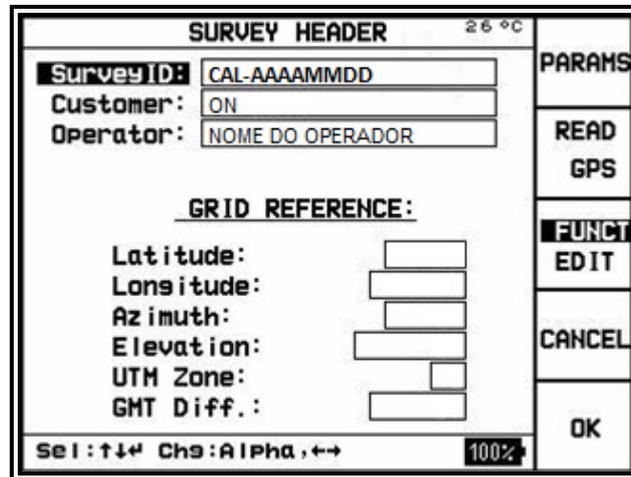


Figura 2. Modelo de cabeçalho utilizado na Avaliação Rotineira.

- 5.11 Selecionar a opção PARAMS, definir a opção LAT/LONG seguido de OK.
- 5.12 Ao retornar para SURVEY HEADER, selecionar OK.
- 5.13 Selecionar a opção AUTOGRAV no menu principal e definir os parâmetros conforme Figura 3, seguido de RECORD.
- 5.14 Verificar as informações de data e hora e quando incorretas, corrigi-las.
- 5.15 Selecionar OPTIONS no menu principal e definir os parâmetros conforme Figura 4.
- 5.16 Aguardar por 15 minutos para garantir a estabilidade do sistema elástico do instrumento devido ao translado com o mesmo.
- 5.17 Proceder a Avaliação Rotineira dos Gravímetros CG5, realizando a verificação dos parâmetros instrumentais (XYOffset, XYsensitivity, DRIFT), estritamente de acordo com o manual do equipamento, registrando as informações pertinentes no FO.44, utilizando caneta preta ou azul.

Elaborado por	Aprovado por	Data / /
---------------	--------------	-------------

 Observatório Nacional	<b>Procedimento Técnico do Laboratório de Gravimetria</b>	Código <b>PT. 06</b>
	<b>Avaliação Rotineira de Gravímetro Scintrex, modelo "CG-5", do LabGrav/ON</b>	Versão <b>00</b>
		Página

AUTOGRAV SETUP		NEXT PAGE
Tide Correct.:	YES	
Cont. Tilt. Corr:	YES	
Auto Reject:	YES	
Terrain Corr.:	NO	FUNCT
Seismic Filter:	YES	EDIT
Save Raw Data:	NO	CANCEL
		RECORD
Sel: ↑↓ Chs: ↔		50%

Figura 3. Opções definidas no menu AUTOGRAV.

DEFINE THE OPTIONS 09:16		FINAL KEY
Read Time:	120	on off
Factory Flas:	140	
#Of Cycles:	2	
Start Delay:	90	
Line separation:	0	FUNCT
Station separation:	0	EDIT
Auto station inc.:	NO	
Chart Scale:	1	
Measurement:	NUMERIC	
LCD Heater:	OFF	
Record Amb.Temp:	NO	OK
Sel: ↑↓ Chs: Enter #		100%

Figura 4. Parâmetros utilizados nas leituras durante a avaliação de XYOffset e XYSensitivity.

### 5.18 XYOffset

- No menu principal, selecionar SERVICE e em seguida ativar a opção XYOffset em Calibration. Pressionar a tecla MEASURE no painel do gravímetro.
- Inserir as coordenadas geodésicas locais. Pressionar a tecla MEASURE.
- Através dos parafusos calantes do tripé, executar a verificação segundo as orientações indicadas no visor do instrumento (Figura 5). Para os valores de 150 e 0 arcsec, deve-se respeitar a tolerância de  $\pm 10$  e  $\pm 5$  arcsec, respectivamente.

Elaborado por	Aprovado por	Data / /
---------------	--------------	-------------

 Observatório Nacional	<b>Procedimento Técnico do Laboratório de Gravimetria</b>	<b>Código PT. 06</b>
	<b>Avaliação Rotineira de Gravímetro Scintrex, modelo "CG-5", do LabGrav/ON</b>	<b>Versão 00</b>
		<b>Página</b>

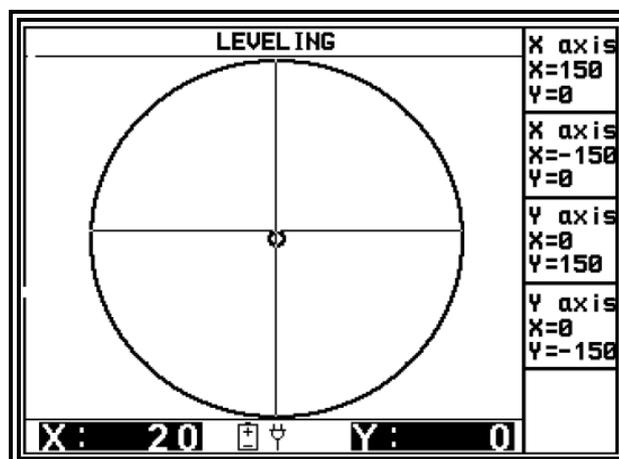


Figura 5. Verificação de XYOffset.

- Ao final da verificação de cada eixo o instrumento reportará um erro. Este erro não deverá ultrapassar de  $\pm 20$  arcsec. Caso ultrapasse, duas tentativas deverão ser realizadas. Se ainda não houver sucesso, deverá ser aberto um RNC e encaminhar o instrumento ao fabricante.

#### 5.19 XYSENSITIVITY

- No menu principal, selecionar SERVICE e em seguida ativar a opção XYSensitivity em Calibration. Pressionar a tecla MEASURE no painel do gravímetro.
- Verificar se as coordenadas geodésicas locais estão corretas. Pressionar a tecla MEASURE.
- Através dos parafusos calantes do tripé, executar a verificação segundo as orientações indicadas no visor do instrumento (Figura 5). Para os valores de 150 e 0 arcsec, deve-se respeitar a tolerância de  $\pm 10$  e  $\pm 5$  arcsec, respectivamente.
- Desligar o gravímetro, colocá-lo na bolsa de transporte e levá-lo de volta ao LabGrav/ON.

<b>Elaborado por</b>	<b>Aprovado por</b>	<b>Data</b> / /
----------------------	---------------------	--------------------

 Observatório Nacional	<b>Procedimento Técnico do Laboratório de Gravimetria</b>	<b>Código PT. 06</b>
	<b>Avaliação Rotineira de Gravímetro Scintrex, modelo "CG-5", do LabGrav/ON</b>	<b>Versão 00</b>
		<b>Página</b>

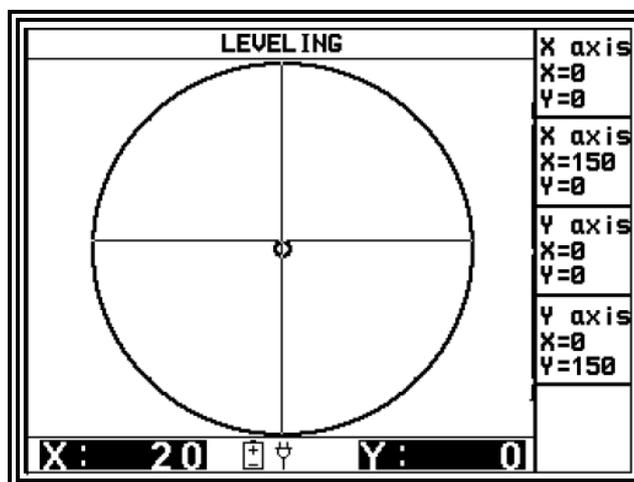


Figura 6. Verificação de XYSensitivity

## 5.20 DRIFT

- Posicionar o tripé sobre o piso do laboratório e posteriormente o gravímetro sobre o tripé.
- Conectar a fonte de alimentação ao gravímetro e ligá-lo. Verificar se a bateria está carregando.
- Selecionar OPTIONS no menu principal e definir os parâmetros conforme a Figura 7.

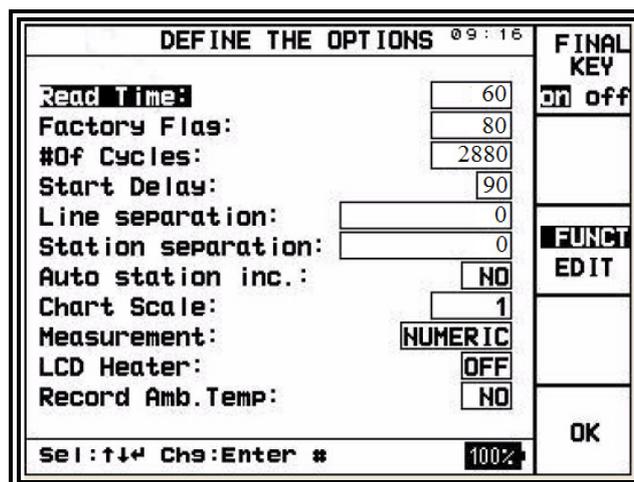


Figura 7. Parâmetros utilizados nas leituras durante a avaliação de DRIFT.

Elaborado por	Aprovado por	Data / /
---------------	--------------	-------------

 <b>Observatório Nacional</b>	<b>Procedimento Técnico do Laboratório de Gravimetria</b>	<b>Código PT. 06</b>
	<b>Avaliação Rotineira de Gravímetro Scintrex, modelo "CG-5", do LabGrav/ON</b>	<b>Versão 00</b>
		<b>Página</b>

- No menu principal, selecionar SERVICE e em seguida ativar a opção DRIFT em **Calibration**. Pressionar a tecla MEASURE no painel do gravímetro.
- Inserir as coordenadas geodésicas do LabGrav/ON. Pressionar a tecla MEASURE.
- Nivelar o instrumento de acordo com as instruções no visor, dentro de uma tolerância de  $\pm 10$  arcsec para ambos os eixos. Pressionar a tecla MEASURE.

**Nota1:** A opção DRIFT deverá ser executada às sextas-feiras a partir das 17:00 h. O dia e horário escolhido permitem que o instrumento sofra menor influência de vibrações locais ocasionadas pela central de ar condicionado instalada próximo ao laboratório. Como a central é desligada a partir das 19:00 h e a execução da deriva têm um período de 48 h, a influência das vibrações locais perturbarão as leituras apenas nas duas primeiras horas de medição.

**Nota2:** Após completado o processo de determinação da taxa de deriva, o instrumento informará a nova taxa de deriva. Em geral a nova taxa possui variação de centésimos a décimos de mGal, por conta da relaxação do sistema elástico. Se estas condições são satisfeitas, o operador deverá aceitar a nova taxa de deriva, pressionando a tecla F2 no painel do gravímetro. Caso estas condições não ocorram, prefere-se não adotar a nova taxa de deriva, mantendo-se a taxa atual e uma nova verificação rotineira deverá ser realizada.

#### 5.21 Medições do Intervalo Gravimétrico Padrão

- Após a verificação dos parâmetros instrumentais, executar PT.07 - Ensaio de intervalo gravimétrico utilizando gravímetros Scintrex, modelo "CG-5", entre as estações Ponto Zero e 010176.
- Realizar três sequências de ida e volta com o objetivo de melhor estimar o intervalo gravimétrico medido.
- Proceder ao processamento de dados conforme descrito no item 5.22, contemplando as medições realizadas nas duas estações.

**Nota:** O formulário FO.44 deve ser assinado por quem executou tanto a etapa de verificação dos parâmetros instrumentais quanto às medições nas duas estações gravimétricas. O formulário contemplando as assinaturas do técnico que executou a referida atividade e o GT constitui em um registro de atividade executada, não podendo ser alterado.

<b>Elaborado por</b>	<b>Aprovado por</b>	<b>Data</b> / /
----------------------	---------------------	--------------------

 <b>Observatório Nacional</b>	<b>Procedimento Técnico do Laboratório de Gravimetria</b>	<b>Código PT. 06</b>
	<b>Avaliação Rotineira de Gravímetro Scintrex, modelo "CG-5", do LabGrav/ON</b>	<b>Versão 00</b>
		<b>Página</b>

## 5.22 Processamento de Dados

Os valores de leituras que os Scintrex CG-5 fornecem, são expressos em mGal. Estas leituras já são corrigidas pelo próprio instrumento de efeitos sistemáticos tais como, deriva instrumental, atração lunissolar, eventuais desnivelamentos em virtude de dilatação térmica sofrida pelos calantes. Os dados desta avaliação são armazenados pela memória interna do instrumento e para descarrega-los, é necessário utilizar o software SCTUTIL disponibilizado pelo fabricante. Os dados da avaliação deverão ser descarregados no computador do LabGrav/ON. Para o processamento de intervalos de gravidade é utilizado um software desenvolvido pela própria equipe do LabGrav/ON e estes softwares são validados conforme o procedimento PG.020 - Validação de Planilhas Eletrônicas e Softwares.

**Nota:** Todas as anotações manuais devem ser anexadas na pasta do respectivo equipamento bem como a listagem de processamento de dados.

<b>Elaborado por</b>	<b>Aprovado por</b>	<b>Data</b> / /
----------------------	---------------------	--------------------

 <b>Observatório Nacional</b>	<b>Procedimento Técnico do Laboratório de Gravimetria</b>	<b>Código PT. 06</b>
	<b>Avaliação Rotineira de Gravímetro Scintrex, modelo "CG-5", do LabGrav/ON</b>	<b>Versão 00</b>
		<b>Página</b>

## 6 Registros

Registro	Quem Registra	Local de Arquivamento	Como Indexar	Tempo de Retenção (anos)	Disposição
FO.44 - Avaliação Rotineira de Gravímetro Scintrex, modelo "CG-5", do LabGrav/ON	GT	Pasta Suspensa	Ordem Cronológica	05	Arquivo inativo permanente
FO.20 - Justificativa de Não Execução de Procedimento	GT	Pasta Suspensa	Ordem Cronológica	05	Arquivo inativo permanente
Listagem de Processamento de Dados	GT	Papel: Pasta Suspensa Digital: Arquivo eletrônico	Ordem Cronológica	05	Papel: Arquivo inativo permanente Digital: Arquivo gravado
Modelos de Arquivos "hhmmmêsDDAAAA.log" "hhmmmêsDDAAAA.raw" "hhmmmêsDDAAAA.sgd" "hhmmmêsDDAAAA.smp" "hhmmmêsDDAAA.txt" "Process600AAAAMMDD.txt" "Process839AAAAMMDD.txt"	GT	Pasta Suspensa	Ordem Cronológica	05	Arquivo gravado

<b>Elaborado por</b>	<b>Aprovado por</b>	<b>Data</b> / /
----------------------	---------------------	--------------------

 <b>Observatório Nacional</b>	<b>Procedimento Técnico do Laboratório de Gravimetria</b>	<b>Código</b> <b>PT. 06</b>
	<b>Avaliação Rotineira de Gravímetro Scintrex, modelo "CG-5", do LabGrav/ON</b>	<b>Versão</b> <b>00</b>
		<b>Página</b>

**7 Anexos**

N. A.

**8 Sumário de Revisões**

Revisão	Data	Descrição dos Itens Atingidos
00	13/11/2014	Emissão Inicial

<b>Elaborado por</b>	<b>Aprovado por</b>	<b>Data</b> / /
----------------------	---------------------	--------------------

# **Apêndice B**

## **Procedimento Técnico-Científico – Ensaio de *g***

	<b>Procedimento Técnico do Laboratório de Gravimetria</b>	<b>Código PT. 07</b>
	<b>Ensaio de intervalo gravimétrico utilizando gravímetros Scintrex, modelo "CG-5"</b>	<b>Versão 00</b>
		<b>Página</b>

## 1 Objetivos

Definir a metodologia de determinação da aceleração da gravidade local utilizando gravímetros relativos Scintrex, modelo CG-5, a partir de uma estação gravimétrica da Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira.

## 2 Definições

### 2.1 Siglas

GT - Gerente Técnico

GQ - Gerente da Qualidade

RGFB - Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira

RNC - Registro de Não Conformidade

### 2.2 Termos

*Gravímetro*- Instrumento com o qual se mede a aceleração de gravidade (Figura 1).



**Figura 1.** Gravímetros relativos Scintrex modelo CG-5.

*Aceleração de gravidade* - É a resultante da aceleração gravitacional e da aceleração centrífuga no ponto considerado sobre a superfície terrestre, depurada das perturbações conjuntas da Lua e do Sol, a maré lunissolar, e da deriva instrumental do gravímetro usado na medição.

*Estação gravimétrica* - Ponto na superfície terrestre no qual se determina a aceleração de gravidade, suas coordenadas geodésicas, a altitude ortométrica e outros dados de interesse à representação do campo de gravidade.

 <b>Observatório Nacional</b>	<b>Procedimento Técnico do Laboratório de Gravimetria</b>	<b>Código PT. 07</b>
	<b>Ensaio de intervalo gravimétrico utilizando gravímetros Scintrex, modelo "CG-5"</b>	<b>Versão 00</b>
		<b>Página</b>

*Latitude geodésica* - Ângulo formado pela normal que passa pelo ponto e sua projeção sobre o plano do equador. Por convenção, a latitude geodésica é positiva no hemisfério norte e negativa no hemisfério sul.

*Longitude geodésica* - Ângulo do diedro formado pelo Meridiano Zero (MZ) ou origem e o meridiano que passa pelo ponto. Por convenção, a longitude geodésica é *positiva* contada por *leste* e *negativa* contada por *oeste* do MZ.

*Medição gravimétrica* - Sequência de três leituras gravimétricas, a intervalos aproximados de um minuto entre uma e outra.

*Fuso horário* - É a região de 15° em longitude, compreendida entre dois meridianos, na qual a Hora Legal coincide com a Hora Civil do meridiano central dessa região. Por definição a *Hora Legal* do *fuso zero* é a Hora de *Greenwich*.

*Altitude geométrica* - Altitude de um local na superfície da Terra referente ao modelo elipsoidal do planeta. O modelo empregado atualmente é o *World Geodetic System 1984 - WGS84*.

*Altitude ortométrica* - Altitude de um local na superfície da Terra referente ao nível médio do mar. O IBGE mantém uma rede altimétrica de precisão no Brasil.

*Referência de Nível* - Marco, usualmente em concreto, implantado pelo IBGE, em cujo topo uma placa metálica materializa o ponto no qual se conhece a altitude ortométrica com precisão milimétrica.

*Deriva instrumental* - É a variação das leituras do gravímetro em uso, resultante das modificações que ocorrem em suas características físicas, num intervalo de tempo. Dependendo das condições de movimento em que o gravímetro se encontra no intervalo de tempo considerado, ela é classificada em *deriva estática*, se o gravímetro permaneceu imóvel, e *deriva dinâmica*, se o gravímetro esteve em movimento.

<b>Elaborado por</b>	<b>Aprovado por</b>	<b>Data</b> / /
----------------------	---------------------	--------------------

 <b>Observatório Nacional</b>	<b>Procedimento Técnico do Laboratório de Gravimetria</b>	<b>Código PT. 07</b>
	<b>Ensaio de intervalo gravimétrico utilizando gravímetros Scintrex, modelo "CG-5"</b>	<b>Versão 00</b>
		<b>Página</b>

### 3 Matriz de Responsabilidades

Atividade	Ensaio utilizando gravímetros Scintrex, modelo "CG-5".	
	Responsabilidade	Autoridade
Identificação do registro	GT ou GQ	GT ou GQ
Registro das informações necessárias à realização do ensaio	Técnico	GT

### 4 Documentos de Referência e Complementares

ABNT NBR ISO/IEC 17025: 2005 (2005), Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaios e calibração, *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, Rio de Janeiro, 31 pp.

Scintrex Ltd. (2010), "CG-5 Scintrex Autograv System Operation Manual", Concord (Canadá), 312 pp.

PG.05 - Tratamento de não conformidade, ações preventivas, corretivas e de melhoria.

PG.13 - Gerenciamento de Equipamentos.

PG.15 - Manuseio e Transporte dos Itens de Ensaio e de Calibração.

PG.20 - Validação de Planilhas Eletrônicas e Softwares.

VIM (2012) - Vocabulário Internacional de Metrologia - Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados, *Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia*, Rio de Janeiro, 1ª Edição Luso-Brasileira, 94 pp.

### 5 Atividades

5.1 A estação de referência deverá ser uma estação da RGFB.

5.2 O manuseio e transporte dos instrumentos deverão seguir o PG.15.

<b>Elaborado por</b>	<b>Aprovado por</b>	<b>Data</b> / /
----------------------	---------------------	--------------------

	<b>Procedimento Técnico do Laboratório de Gravimetria</b>	<b>Código PT. 07</b>
	<b>Ensaio de intervalo gravimétrico utilizando gravímetros Scintrex, modelo "CG-5"</b>	<b>Versão 00</b>
		<b>Página</b>

5.3 Posicionar o gravímetro sobre a estação de referência. Ligá-lo e criar um cabeçalho segundo o modelo da Figura 2.

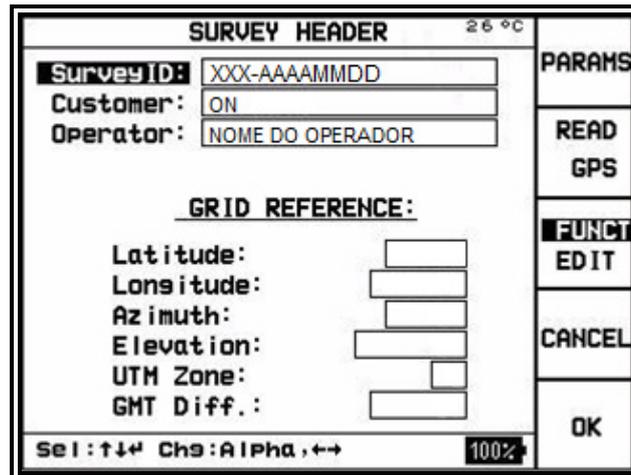


Figura 2. Modelo de cabeçalho utilizado em ensaios. Em XXX deverão ser utilizados códigos alfanuméricos que caracterizem o nome do laboratório ou campanha de gravimetria realizada.

5.4 Preencher os campos em GRID REFERENCE com informações das coordenadas geodésicas da estação de referência.

5.5 Selecionar a opção PARAMS, definir a opção LAT/LONG seguido de OK.

5.6 Ao retornar para SURVEY HEADER, selecionar OK.

5.7 Selecionar a opção AUTOGRAV no menu principal e definir os parâmetros conforme Figura 3, seguido de RECORD.

<b>Elaborado por</b>	<b>Aprovado por</b>	<b>Data</b> / /
----------------------	---------------------	--------------------

	<b>Procedimento Técnico do Laboratório de Gravimetria</b>	<b>Código PT. 07</b>
	<b>Ensaio de intervalo gravimétrico utilizando gravímetros Scintrex, modelo "CG-5"</b>	<b>Versão 00</b>
		<b>Página</b>

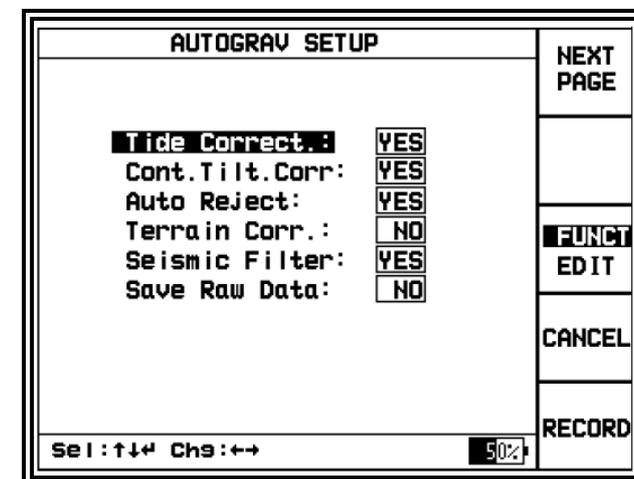


Figura 3. Opções definidas no menu AUTOGRAV.

5.8 Verificar as informações de data e hora, e quando incorretas, corrigi-las.

5.9 Selecionar OPTIONS, no menu principal e definir os parâmetros conforme Figura 3. Após definidas as opções, selecionar OK.

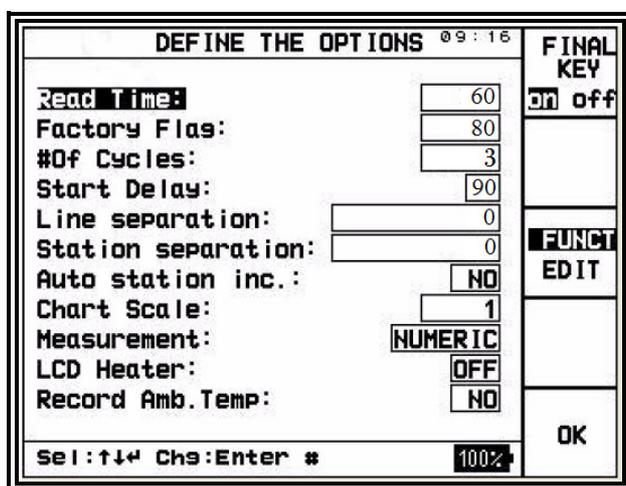


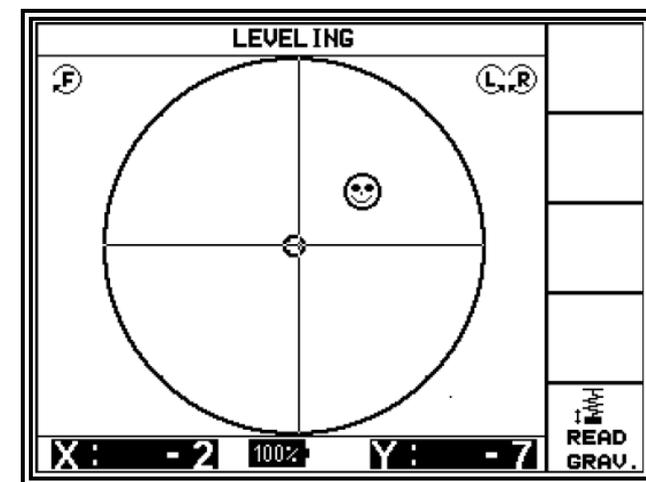
Figura 4. Parâmetros utilizados nas leituras durante a aquisição de dados em um ensaio.

5.10 Pressionar a tecla MEASURE, seguido da tecla F5, no painel principal do gravímetro.

5.11 Nivelar o instrumento através dos parafusos calantes do tripé, seguindo as indicações no visor conforme a Figura 5, respeitando a tolerância de  $\pm 10$  arcsec para ambos os eixos.

<b>Elaborado por</b>	<b>Aprovado por</b>	<b>Data</b> / /
----------------------	---------------------	--------------------

	<b>Procedimento Técnico do Laboratório de Gravimetria</b>	<b>Código PT. 07</b>
	<b>Ensaio de intervalo gravimétrico utilizando gravímetros Scintrex, modelo "CG-5"</b>	<b>Versão 00</b>
		<b>Página</b>



**Figura 5.** Nivelando o instrumento. Os ícones nos cantos superiores indicam o sentido de giro dos calantes.

**5.12** Obter as coordenadas geodésicas locais utilizando um receptor GNSS. As condições mínimas deverão ser satisfeitas:

- O tempo de aquisição deverá ser de 15 minutos.
- O receptor deverá ser capaz de detectar 3 satélites.

**5.13** As informações provenientes do receptor GNSS deverão ser registradas no formulário FO.45 - Ensaio de intervalo gravimétrico utilizando gravímetros Scintrex, modelo "CG-5".

**5.14** Pressionar a tecla SETUP no painel do gravímetro e ao retornar para a tela do menu principal, pressionar a tecla MEASURE.

**5.15** Inserir as coordenadas geodésicas no gravímetro obtidas a partir do receptor GNSS. Após inseridas as coordenadas, pressionar a tecla F5 para retornar a tela de nivelamento do instrumento.

**5.16** Conferir se os níveis atendem ao requisito descrito em 5.11.

**5.17** Pressionar a tecla MEASURE.

**5.18** Ao término da aquisição, pressionar a tecla F5 para ativar a opção FINAL DATA seguido de F5 para ativar a opção RECORD.

<b>Elaborado por</b>	<b>Aprovado por</b>	<b>Data</b> / /
----------------------	---------------------	--------------------

 <b>Observatório Nacional</b>	<b>Procedimento Técnico do Laboratório de Gravimetria</b>	<b>Código PT. 07</b>
	<b>Ensaio de intervalo gravimétrico utilizando gravímetros Scintrex, modelo "CG-5"</b>	<b>Versão 00</b>
		<b>Página</b>

**Observações:**

- Ao pressionar MEASURE no item 5.17, o gravímetro realizará 3 ciclos de leituras, cujo período de cada ciclo será de 60 segundos. Essa primeira sequência de 3 ciclos deverá ser utilizada como parâmetro de análise da microcrossismicidade local. O critério de análise consiste em:

$$|\text{discrepância entre as leituras}| \leq 10 \mu\text{Gal}$$

- Se o critério for atendido uma segunda sequência de leituras deverá ser realizada seguindo as etapas descritas nos itens 5.16 à 5.18. A segunda sequência servirá como validação da primeira, portanto, o critério de discrepância deverá ser aplicado também à segunda sequência.
- Respeitado os critérios nas duas primeiras sequências de leituras, uma terceira sequência deverá ser realizada e adotada como leituras iniciais na estação de referência para reproduzir os intervalos de gravidade nas estações desejadas.
- Caso o critério de discrepância não seja atendido em qualquer etapa o registro deverá ser realizado no FO.45 e deverá ser feita uma nova tentativa. Caso ainda não ocorra a observância do critério de discrepância, o registro deverá ser realizado novamente no FO.45 e uma última tentativa deverá ser realizada, modificando os parâmetros instrumentais de aquisição conforme a Figura 6.

<b>Elaborado por</b>	<b>Aprovado por</b>	<b>Data</b> / /
----------------------	---------------------	--------------------

 <b>Observatório Nacional</b>	<b>Procedimento Técnico do Laboratório de Gravimetria</b>	<b>Código PT. 07</b>
	<b>Ensaio de intervalo gravimétrico utilizando gravímetros Scintrex, modelo "CG-5"</b>	<b>Versão 00</b>
		<b>Página</b>

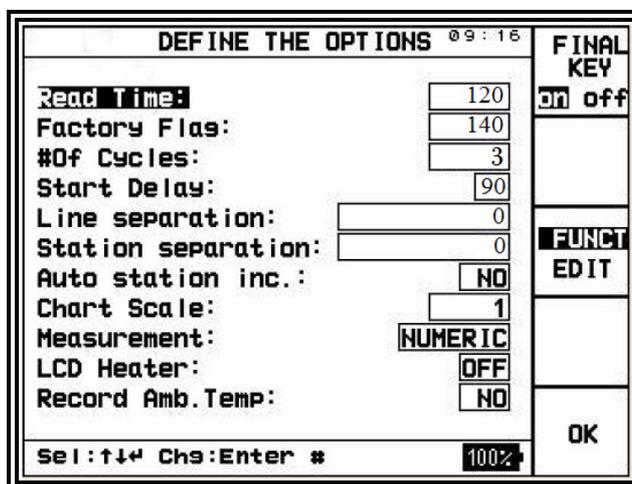


Figura 6. Parâmetros instrumentais recomendados em situações de maior instabilidade local.

- Se mesmo após a modificação dos parâmetros o critério de discrepância ainda não for satisfeito, então haverá um RNC e o ensaio será interrompido. Uma nova tentativa deverá ser realizada em horário ou data posterior. Se ainda assim esta tentativa não for bem-sucedida, um RNC deverá ser efetuado novamente relatando a impossibilidade de ensaio com o respectivo instrumento, devendo o ensaio ser realizado com outro tipo de instrumento.

**5.19** Finalizado o ensaio na estação de referência, o gravímetro deverá ser desligado e armazenado em sua respectiva bolsa ou maleta de transporte.

**5.20** Transportar o gravímetro até o local aonde se deseja conhecer a aceleração da gravidade seguindo o PG.15.

**5.21** Posicionar o gravímetro sobre seu tripé no local aonde se deseja determinar a aceleração da gravidade.

**5.22** Repetir a metodologia descrita de 5.9 à 5.19.

<b>Elaborado por</b>	<b>Aprovado por</b>	<b>Data</b> / /
----------------------	---------------------	--------------------

 <b>Observatório Nacional</b>	<b>Procedimento Técnico do Laboratório de Gravimetria</b>	<b>Código PT. 07</b>
	<b>Ensaio de intervalo gravimétrico utilizando gravímetros Scintrex, modelo "CG-5"</b>	<b>Versão 00</b>
		<b>Página</b>

Observações:

- Se for implantada somente uma estação gravimétrica, repetir a instrução 5.19 e retornar a estação de referência repetindo as instruções de 5.15 à 5.19.
- Caso haja necessidade de implantar estações subsequentes, repetir as instruções de 5.15 à 5.19. Quando determinada a última estação gravimétrica, deverão ser realizados os enlaces gravimétricos de retorno até a estação de referência repetindo as instruções 5.15 à 5.19.
- Para cada intervalo gravimétrico deverá haver um número mínimo de 12 amostras. Tais amostras podem ser coletadas no mesmo dia ou em dias diferentes.

**5.23** Finalizado todos os enlaces gravimétricos, seguir PG.015.

<b>Elaborado por</b>	<b>Aprovado por</b>	<b>Data</b> / /
----------------------	---------------------	--------------------

 <b>Observatório Nacional</b>	<b>Procedimento Técnico do Laboratório de Gravimetria</b>	<b>Código PT. 07</b>
	<b>Ensaio de intervalo gravimétrico utilizando gravímetros Scintrex, modelo "CG-5"</b>	<b>Versão 00</b>
		<b>Página</b>

## 6 Registros

Registro	Quem Registra	Local de Arquivamento	Como Indexar	Tempo de Retenção (anos)	Disposição
FO.45 - Ensaio de intervalo gravimétrico utilizando gravímetros Scintrex, modelo "CG-5"	GT	Pasta Suspensa	Ordem Cronológica	05	Arquivo inativo permanente
FO.20 - Justificativa de Não Execução de Procedimento	GT	Pasta Suspensa	Ordem Cronológica	05	Arquivo inativo permanente
Listagem de Processamento de Dados	GT	Papel: Pasta Suspensa Digital: Arquivo eletrônico	Ordem Cronológica	05	Papel: Arquivo inativo permanente Digital: Arquivo gravado
Modelos de Arquivos "hhmmêsDDAAA.log" "hhmmêsDDAAA.raw" "hhmmêsDDAAA.sgd" "hhmmêsDDAAA.smp" "hhmmêsDDAAA.txt" "Process600AAAAMDD.txt" "Process839AAAAMDD.txt"	GT	Pasta Suspensa	Ordem Cronológica	05	Arquivo gravado

## 7 Anexos

N. A.

<b>Elaborado por</b>	<b>Aprovado por</b>	<b>Data</b> / /
----------------------	---------------------	--------------------

 <b>Observatório Nacional</b>	<b>Procedimento Técnico do Laboratório de Gravimetria</b>	<b>Código PT. 07</b>
	<b>Ensaio de intervalo gravimétrico utilizando gravímetros Scintrex, modelo "CG-5"</b>	<b>Versão 00</b>
		<b>Página</b>

## 8 Sumário de Revisões

Revisão	Data	Descrição dos Itens Atingidos
00	13/11/2014	Emissão Inicial

<b>Elaborado por</b>	<b>Aprovado por</b>	<b>Data</b> / /
----------------------	---------------------	--------------------

# **Apêndice C**

## **Procedimento Técnico-Científico – Ensaaios do GVG**

	<b>Procedimento Técnico do Laboratório de Gravimetria</b>	<b>Código PT. 08</b>
	<b>Ensaio do Gradiente Vertical de Gravidade utilizando gravímetros Scintrex, modelo "CG-5"</b>	<b>Versão 00</b>
		<b>Página</b>

## 1 Objetivos

Definir a metodologia de determinação do gradiente vertical de gravidade utilizando gravímetros relativos Scintrex, modelo CG-5 em conjunto com tripé geodésico ou bancada.

## 2 Definições

### 2.1 Siglas

GT - Gerente Técnico

GQ - Gerente da Qualidade

LCGAN - Linha de Calibração Gravimétrica de Agulhas Negras

RGFB - Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira

RNC - Registro de Não Conformidade

### 2.2 Termos

*Gravímetro*- Instrumento com o qual se mede a aceleração de gravidade (Figura 1).



Figura 1. Gravímetros relativos Scintrex modelo CG-5.

*Aceleração de gravidade* - É a resultante da aceleração gravitacional e da aceleração centrífuga no ponto considerado sobre a superfície terrestre, depurada das perturbações conjuntas da Lua e do Sol, a maré lunissolar, e da deriva instrumental do gravímetro usado na medição.

*Gradiente vertical de gravidade* - É a taxa de variação da aceleração da gravidade em relação à vertical.

<b>Elaborado por</b> 	<b>Aprovado por</b> 	<b>Data</b> / /
--------------------------	-------------------------	--------------------

	<b>Procedimento Técnico do Laboratório de Gravimetria</b>	<b>Código PT. 08</b>
	<b>Ensaio do Gradiente Vertical de Gravidade utilizando gravímetros Scintrex, modelo "CG-5"</b>	<b>Versão 00</b>
		<b>Página</b>

*Estação gravimétrica* - Ponto na superfície terrestre no qual se determina a aceleração de gravidade, suas coordenadas geodésicas, a altitude ortométrica e outros dados de interesse à representação do campo de gravidade.

*Latitude geodésica* - Ângulo formado pela normal que passa pelo ponto e sua projeção sobre o plano do equador. Por convenção, a latitude geodésica é positiva no hemisfério norte e negativa no hemisfério sul.

*Longitude geodésica* - Ângulo do diedro formado pelo Meridiano Zero (MZ) ou origem e o meridiano que passa pelo ponto. Por convenção, a longitude geodésica é *positiva* contada por *leste* e *negativa* contada por *oeste* do MZ.

*Medição gravimétrica* - Sequência de três leituras gravimétricas, a intervalos aproximados de um minuto entre uma e outra.

*Fuso horário* - É a região de 15° em longitude, compreendida entre dois meridianos, na qual a Hora Legal coincide com a Hora Civil do meridiano central dessa região. Por definição a *Hora Legal* do *fuso zero* é a Hora de *Greenwich*.

*Altitude geométrica* - Altitude de um local na superfície da Terra referente ao modelo elipsoidal do planeta. O modelo empregado atualmente é o *World Geodetic System 1984 - WGS84*.

*Altitude ortométrica* - Altitude de um local na superfície da Terra referente ao nível médio do mar. O IBGE mantém uma rede altimétrica de precisão no Brasil.

*Referência de Nível* - Marco, usualmente em concreto, implantado pelo IBGE, em cujo topo uma placa metálica materializa o ponto no qual se conhece a altitude ortométrica com precisão milimétrica.

*Deriva instrumental* - É a variação das leituras do gravímetro em uso, resultante das modificações que ocorrem em suas características físicas, num intervalo de tempo. Dependendo das condições de movimento em que o gravímetro se encontra no intervalo de tempo considerado, ela é classificada em *deriva estática*, se o gravímetro permaneceu imóvel, e *deriva dinâmica*, se o gravímetro esteve em movimento.

<b>Elaborado por</b>	<b>Aprovado por</b>	<b>Data</b> / /
----------------------	---------------------	--------------------

 <b>Observatório Nacional</b>	<b>Procedimento Técnico do Laboratório de Gravimetria</b>	<b>Código PT. 08</b>
	<b>Ensaio do Gradiente Vertical de Gravidade utilizando gravímetros Scintrex, modelo "CG-5"</b>	<b>Versão 00</b>
		<b>Página</b>

### 3 Matriz de Responsabilidades

Atividade	Ensaio do Gradiente Vertical de Gravidade utilizando gravímetros Scintrex, modelo "CG-5".	
	Responsabilidade	Autoridade
Identificação do registro	GT ou GQ	GT ou GQ
Registro das informações necessárias à realização do ensaio	Técnico	GT

### 4 Documentos de Referência e Complementares

ABNT NBR ISO/IEC 17025: 2005 (2005), Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaios e calibração, *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, Rio de Janeiro, 31 pp.

Scintrex Ltd. (2010), "CG-5 Scintrex Autograv System Operation Manual", Concord (Canadá), 312 pp.

PG.05 - Tratamento de não conformidade, ações preventivas, corretivas e de melhoria.

PG.13 - Gerenciamento de Equipamentos.

PG.15 - Manuseio e Transporte dos Itens de Ensaio e de Calibração.

PG.20 - Validação de Planilhas Eletrônicas e Softwares.

PT.07 - Ensaio de intervalo gravimétrico utilizando gravímetros Scintrex, modelo "CG-5".

VIM (2012) - Vocabulário Internacional de Metrologia - Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados, *Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia*, Rio de Janeiro, 1a Edição Luso-Brasileira, 94 pp.

<b>Elaborado por</b>	<b>Aprovado por</b>	<b>Data</b> / /
----------------------	---------------------	--------------------

	<b>Procedimento Técnico do Laboratório de Gravimetria</b>	<b>Código PT. 08</b>
	<b>Ensaio do Gradiente Vertical de Gravidade utilizando gravímetros Scintrex, modelo "CG-5"</b>	<b>Versão 00</b>
		<b>Página</b>

## 5 Atividades

5.1 A determinação do gradiente vertical de gravidade poderá ser realizada utilizando tripé ou bancada.

5.2 Se for utilizada uma bancada, seguir para o item 5.7 omitindo-se o item 5.9. Onde se lê tripé geodésico substitui-se por bancada.

5.3 Se for utilizado um tripé conforme o da Figura 2, posicioná-lo no local em que se deseja conhecer o gradiente vertical de gravidade.



Figura 2. Tripé geodésico (em amarelo) em conjunto com os tripés dos gravímetros Scintrex CG-5 (preto).

5.4 Acoplar o tripé do gravímetro Scintrex CG-5 no topo do tripé geodésico através da rosa centrada.

5.5 Nivelar o conjunto.

5.6 Retirar o tripé do gravímetro Scintrex CG-5.

5.7 Com uma trena graduada em milímetros, medir o desnível entre o piso e o topo do tripé geodésico. Um segundo operador deverá conferir o desnível medido.

5.8 O valor da medida do desnível deverá ser registrado no FO.46 - Ensaio do Gradiente Vertical de Gravidade utilizando gravímetros Scintrex, modelo "CG-5".

<b>Elaborado por</b>	<b>Aprovado por</b>	<b>Data</b> / /
----------------------	---------------------	--------------------

 <b>Observatório Nacional</b>	<b>Procedimento Técnico do Laboratório de Gravimetria</b>	<b>Código</b> <b>PT. 08</b>
	<b>Ensaio do Gradiente Vertical de Gravidade utilizando gravímetros Scintrex, modelo "CG-5"</b>	<b>Versão</b> <b>00</b>
		<b>Página</b>

5.9 Executar o item 5.4.

5.10 Posicionar outro tripé de gravímetro Scintrex CG-5 no piso.

5.11 Iniciar o ensaio a partir do piso seguindo o PT.07.

Observações:

- Para os ensaios realizados em trabalhos metrológicos é necessária a aquisição de no mínimo 12 intervalos gravimétricos entre piso-tripé, ou piso-bancada.
- Para o caso de ensaios realizados nas estações de referência da RGFB e/ou da LCGAN é necessária a aquisição de 20 intervalos entre piso-tripé.

<b>Elaborado por</b>	<b>Aprovado por</b>	<b>Data</b> / /
----------------------	---------------------	--------------------

	<b>Procedimento Técnico do Laboratório de Gravimetria</b>	<b>Código PT. 08</b>
	<b>Ensaio do Gradiente Vertical de Gravidade utilizando gravímetros Scintrex, modelo "CG-5"</b>	<b>Versão 00</b>
		<b>Página</b>

## 6 Registros

Registro	Quem Registra	Local de Arquivamento	Como Indexar	Tempo de Retenção (anos)	Disposição
FO.46 - Ensaio do Gradiente Vertical de Gravidade utilizando gravímetros Scintrex, modelo "CG-5"	GT	Pasta Suspensa	Ordem Cronológica	05	Arquivo inativo permanente
FO.20 - Justificativa de Não Execução de Procedimento	GT	Pasta Suspensa	Ordem Cronológica	05	Arquivo inativo permanente
Listagem de Processamento de Dados	GT	Papel: Pasta Suspensa Digital: Arquivo eletrônico	Ordem Cronológica	05	Papel: Arquivo inativo permanente Digital: Arquivo gravado
Modelos de Arquivos "hhmmêsDDAAAA.log" "hhmmêsDDAAAA.raw" "hhmmêsDDAAAA.sgd" "hhmmêsDDAAAA.smp" "hhmmêsDDAAA.txt" "Process600AAAAMDD.txt" "Process839AAAAMDD.txt"	GT	Pasta Suspensa	Ordem Cronológica	05	Arquivo gravado

## 7 Anexos

N. A.

Elaborado por	Aprovado por	Data / /
---------------	--------------	-------------

 <b>Observatório Nacional</b>	<b>Procedimento Técnico do Laboratório de Gravimetria</b>	<b>Código</b> <b>PT. 08</b>
	<b>Ensaio do Gradiente Vertical de Gravidade utilizando gravímetros Scintrex, modelo "CG-5"</b>	<b>Versão</b> <b>00</b>
		<b>Página</b>

## 8 Sumário de Revisões

Revisão	Data	Descrição dos Itens Atingidos
00	13/11/2014	Emissão Inicial

<b>Elaborado por</b>	<b>Aprovado por</b>	<b>Data</b> / /
----------------------	---------------------	--------------------