

ARTIGOS DE DESENVOLVIMENTO TÉCNICO TECHNICAL DEVELOPMENT ARTICLES

LINHA DE CALIBRAÇÃO GRAVIMÉTRICA OBSERVATÓRIO NACIONAL – AGULHAS NEGRAS

I.P. Escobar ^{1,3}, N.C de Sá ², J.J. Dantas ¹ & F.J.S.S Dias ¹

A Linha de Calibração Gravimétrica Observatório Nacional-Agulhas Negras foi implantada com o objetivo de monitorar as características dos gravímetros utilizados nos levantamentos da Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira. Trata-se de um trajeto com um intervalo de gravidade de 628 mGal, desmembrado em quatro subintervalos. O percurso envolve uma diferença de altitude da ordem de 2.500 metros, em aproximadamente 230 quilômetros de distância, onde a temperatura e a pressão ambientais variam significativamente com a altitude. Percorrendo-se o trajeto duas vezes em ida e volta, é possível determinar os fatores de escala dos gravímetros com desvio padrão estimado melhor do que 0,00006. No período de 1982 a 1994 foram feitas nove ocupações da linha, sendo efetuadas observações com grupos de gravímetros pertencentes a diversas entidades. Um ajustamento pelo método dos mínimos quadrados permitiu estimar o desvio padrão de uma observação em 31 μ Gal. Os valores da gravidade ajustados nas estações da linha foram estimados com desvios padrão em torno de 14 μ Gal.

Palavras-chave: Gravidade; Gravímetro; Calibração.

THE OBSERVATÓRIO NACIONAL AGULHAS NEGRAS GRAVITY CALIBRATION LINE - *The Observatório Nacional - Agulhas Negras Gravity Calibration Line was established with the objective of monitoring the characteristics of the gravimeters used in the Brazilian Gravity Fundamental Network surveying. It is a 628 mGal gravity range circuit, divided in four subintervals. The traverse comprises an altitude difference of about 2.500 meters, in a distance of around 230 kilometers, where both ambient temperature and atmospheric pressure change significantly with elevation. If the circuit is covered in two round trips, it is possible to determine the scale factors of the gravimeters, with an estimated standard deviation better than 0.00006. From 1982 to 1994, nine determinations in the line were performed. Observations with different sets of gravimeters, belonging to several entities, were carried out. A least squares adjustment estimated the standard deviation of one observation in 31 μ Gal. The adjusted gravity values of the calibration line stations were estimated with standard deviations around 14 μ Gal.*

Key words: Gravity; Gravimeter; Calibration.

¹ CNPq - Observatório Nacional

Rua General José Cristino, 77

20921-400 Rio de Janeiro, RJ, Brasil

² Instituto Astronômico e Geofísico/USP

Rua do Matão, 1226

05508-900, São Paulo, SP, Brasil

³ Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Rua São Francisco Xavier, 524

20559-900 Rio de Janeiro, RJ, Brasil

INTRODUÇÃO

Não obstante o desenvolvimento da tecnologia instrumental alcançado nos últimos anos na área de gravimetria, principalmente no tocante aos gravímetros absolutos, os gravímetros diferenciais mecânicos ainda são os mais utilizados nos levantamentos gravimétricos, devido a sua portabilidade e acurácia. De fato, seu peso total inferior a 12 quilos na embalagem de transporte e sua acurácia de 10 μGal ou melhor justificam a preferência por este tipo de instrumento.

No gravímetro diferencial mecânico a variação da gravidade é compensada pela variação no comprimento de uma mola especial. Com base na lei de Hooke, uma pequena variação do comprimento da mola pode ser considerada proporcional à variação da gravidade. Para a determinação do coeficiente de proporcionalidade, ou fator de escala, o instrumento necessita ser aferido em local de gravidade conhecida (LaCoste & Romberg, 1990).

Uma das características mais notáveis do gravímetro diferencial mecânico é a deriva instrumental, que se manifesta pela variação lenta e progressiva da leitura com o tempo, em consequência de pequenas acomodações no sistema elástico. Nos gravímetros mais modernos, a deriva pode ser considerada linear dentro de um intervalo de tempo característico do instrumento, geralmente inferior a 48 horas, o que permite a sua fácil determinação e correção. Uma vez ultrapassado o período de linearidade, a deriva pode assumir um comportamento irregular que compromete a sua correção.

A natural instabilidade das características do sistema elástico torna necessário submeter o gravímetro diferencial mecânico a periódicas avaliações e aferições em pontos onde a gravidade seja conhecida. Assim, é possível controlar eventuais variações na escala e/ou no padrão de comportamento da deriva do instrumento, bem como verificar o bom funcionamento dos dispositivos que evitam ou compensam os efeitos de variações das condições ambientais nas leituras do gravímetro, notadamente os efeitos relacionados com a variação na temperatura e na pressão atmosféricas. Um dos métodos usados para a aferição dos gravímetros diferenciais é a observação periódica de suas leituras em trajetos entre pontos com gravidade conhecida, denominados linhas de calibração.

Dependendo do intervalo máximo de gravidade da linha de calibração e do instrumento a ser avaliado, a aferição pode abranger total ou parcialmente o alcance da escala do instrumento. Uma linha de calibração pode ser latitudinal, quando explora a variação da gravidade com a latitude (Gemael et al., 1990; Torge et al., 1994), ou vertical, quando explora a varia-

ção da gravidade com a altitude. As linhas de calibração verticais, embora apresentem intervalo de gravidade fisicamente limitado pelas altitudes máxima e mínima das estações da linha, normalmente são mais fáceis de serem ocupadas pois, para um mesmo intervalo de gravidade, exige um deslocamento menor do que uma linha latitudinal, em virtude do gradiente vertical da gravidade ser maior do que o gradiente horizontal. Além disso, é possível explorar a variação da temperatura e da pressão atmosféricas com a altitude para verificar o bom desempenho dos dispositivos térmicos e barométricos.

LINHA DE CALIBRAÇÃO OBSERVATÓRIO NACIONAL – AGULHAS NEGRAS (ON-AN).

A iniciativa da implantação de uma linha de calibração gravimétrica vertical no pico das Agulhas Negras coube ao Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo (IAG/USP). O IAG/USP fez o primeiro reconhecimento do trajeto e começou a implantação da linha a partir da cidade de Angra dos Reis até a entrada do Parque Nacional de Itatiaia, próximo ao Pico das Agulhas Negras, com estações escolhidas a intervalos de gravidade aproximados de 100 mGal. O percurso envolve uma diferença de altitude da ordem de 2.500 metros, em aproximadamente 230 quilômetros de distância, e uma significativa variação de temperatura e pressão ambientais.

Em 1982 o Observatório Nacional, interessado em monitorar as características dos gravímetros utilizados na Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira, se associou ao IAG/USP e, dentre as estações primitivas, selecionou as da Tab. 1, de modo a permitir a ocupação da linha em um período máximo de 24 horas. O trajeto, com um intervalo de gravidade de 628 mGal, é subdividido em quatro trechos por três estações intermediárias: Engenheiro Passos, Fazenda Lapa e Marco Zero (Fig. 1). As descrições das estações da linha podem ser encontradas no Apêndice 1. No período de 1982 a 1994 foram efetuados 9 (nove) levantamentos da linha. A partir de 1983 a estação de Angra dos Reis (CAL-01) foi abandonada em virtude de sua instabilidade (excesso de vibração) e dificuldade de acesso às demais estações da linha (estrada de qualidade inferior em região de serra). As demais ocupações foram feitas a partir da estação Rio de Janeiro C (016080), no Observatório Nacional, que além de não apresentar aquelas inconveniências, ainda apresenta a vantagem de um intervalo de gravidade maior.

A Tab. 2 apresenta os gravímetros utilizados nos levantamentos da linha de calibração ON-AN, destacando os anos das observações e a quantidade de ocupações (trajetos de ida e volta) em cada ano.

AJUSTAMENTO DA LINHA DE CALIBRAÇÃO

O ajustamento da linha de calibração ON-AN foi realizado pelo método dos mínimos quadrados, utilizando os programas de ajustamento de rede, contidos no sistema de processamento de dados gravimétricos GRAVSYS, versão 2.0, desenvolvido pelo "Geological Survey of Canada" (GSC, 1988). Para o ajustamento, o sistema adota um modelo matemático combinado, envolvendo diferenças de gravidade observadas e parâmetros a serem determinados, de acordo com a seguinte equação:

$$g_i - g_j + k_p \Delta r_{ij} + d_p \Delta t_{ij} = 0, \quad (1)$$

onde:

g_i e g_j são valores da gravidade nas estações de ordem i e j , respectivamente;

k_p é o fator de correção de escala para o gravímetro de ordem p ;

Δr_{ij} é a diferença de gravidade observada $r_j - r_i$, onde r_j e r_i são as leituras instrumentais nas estações de ordem j e i , respectivamente, corrigidas dos efeitos sistemáticos conhecidos;

d_p é a taxa de deriva para o instrumento de ordem p ;

Δt_{ij} é a diferença $t_j - t_i$, entre os instantes das observações nas estações de ordem j e i , respectivamente.

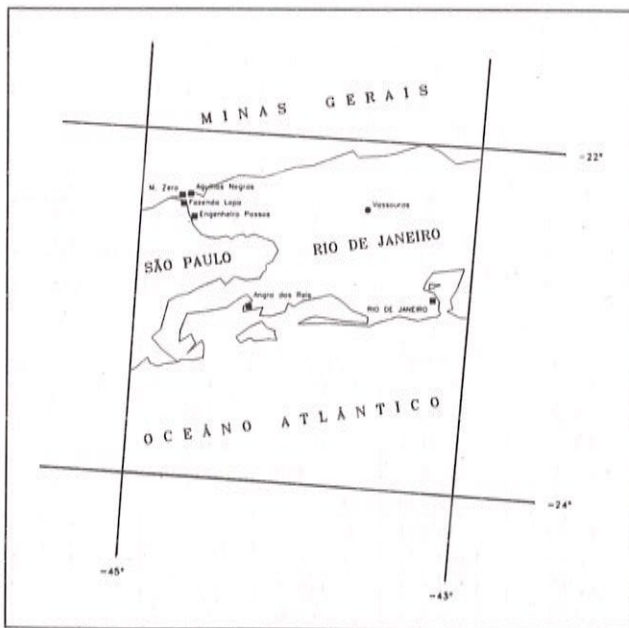


Figura 1 - Linha de Calibração Gravimétrica ON-AN.

Figure 1 - ON-AN Gravity Calibration Line.

Estação	Código	Latitude	Longitude	Altitude	Δg ON-Estação
Rio de Janeiro C	016080	-22° 53,6'	-43° 13,4'	18 m	0 mGal
Angra dos Reis*	CAL-01	-23° 00,2'	-44° 19,1'	6m	23 mGal
Engenheiro Passos	CAL-02	-22° 29,8'	-44° 40,7'	480 m	162 mGal
Fazenda Lapa	CAL-03	-22° 24,2'	-44° 45,1'	1300 m	256 mGal
Marco Zero	CAL-04	-22° 22,6'	-44° 45,6'	1669 m	437 mGal
Agulhas Negras	CAL-05	-22° 22,4'	-44° 42,4'	2500 m	628 mGal

Tabela 1 - Estações da Linha de Calibração ON-AN (*Ocupada apenas em 1982).

Table 1 - ON-AN Calibration Line Stations (*Occupied only in 1982).

	1982	1983	1985	1986	1987	1989	1991	1992	1994	Total
G011	-	4	2	3	2	-	-	-	-	11
G257	2	2	2	3	2	2	2	-	3	18
G372	-	2	-	-	-	-	-	-	-	2
G454	2	2	-	-	-	-	-	-	-	4
G602	2	2	2	2	2	-	2	-	3	15
G613	-	2	-	-	-	-	-	-	-	2
G622	2	2	2	2	2	-	2	-	3	15
G628	-	2	-	-	-	-	-	-	-	2
G670	-	-	-	-	-	-	-	2	-	2
G674	-	-	2	2	3	-	2	-	-	9
G745	-	-	-	-	-	-	3	-	-	3
G761	-	-	-	-	-	-	3	-	-	3
G864	-	-	-	-	-	2	-	-	-	2

Tabela 2 - Gravímetros Utilizados na Linha de Calibração On-AN.

Table 2 - Gravimeters used on ON-AN Calibration Line.

O modelo matemático será composto de m equações, correspondentes às m diferenças de gravidade observadas, envolvendo u parâmetros incógnitas, representados pelos valores de gravidade nas estações da linha de calibração, g_p , acrescidos dos fatores de escala dos gravímetros, k_p , e dos coeficientes de deriva de cada instrumento, d_p (Escobar, 1985).

Como referência para a linha de calibração foram adotados valores obtidos no ajustamento da Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira (RGFB). Tomou-se como origem o valor de gravidade na estação 016080 ($g = 978791,658$ mGal), com peso fixo igual a 5.000 (equivalente a um desvio padrão aproximadamente igual a 0,014 mGal). Para a referência de escala foi adotado o gravímetro G-257, cujo fator de escala, obtido no mesmo ajustamento, foi considerado fixo.

Para cada ocupação da linha, ou seja, para cada trajeto de ida e volta com cada gravímetro foi especificado um segmento de deriva, de modo a se considerar as peculiaridades de cada ocupação (época do ano, tipo de veículo utilizado, condições da estrada etc.).

Foram observadas 728 diferenças de gravidade entre as estações da linha, o que confere ao modelo igual número de equações. A quantidade total de incógnitas envolvidas no ajustamento é igual a 106 (cento e seis), referente aos 6 (seis) valores de gravidade nas estações da linha, acrescidos dos 12 (doze) fatores de escala (o fator de escala para o G-257 foi considerado fixo) e dos 88 (oitenta e oito) coeficientes de deriva (um para cada ocupação com cada gravímetro).

Após o último processamento, o sumário do ajustamento apresentou os seguintes resultados:

Número de observações lidas:	728
Número de observações aceitas:	698
Número de incógnitas:	106
Número de graus de liberdade:	594
Peso médio das observações:	1040,00
Desvio padrão da unidade de peso:	1,0107
Desvio padrão de uma observação (σ)	0,0313 mGal

Observa-se que foram rejeitadas 30 observações por apresentarem resíduos fora do intervalo de tolerância de $\pm 3\sigma$, ou seja, aproximadamente 4% das observações. Embora o ajustamento tenha indicado pesos diferentes para observações efetuadas com gravímetros distintos, adotou-se o critério de se ponderar indistintamente todas as observações com o peso médio (1040,00, coerente com $\sigma=0,031$ mGal), para se estabelecer uma homogeneização no critério de rejeição das observações. Caso contrário, poderiam ser rejeitadas observações efetuadas com um determinado gravímetro, as quais seriam aceitas se fossem obtidas com um segundo gravímetro, apenas pelo fato de o primeiro instrumento apresentar estimativa de desvio padrão médio das observações menor do que o segundo.

O desvio padrão da unidade de peso, aproximadamente igual à unidade, atesta a adequação dos pesos adotados. O desvio padrão de uma observação, $\sigma = 0,031$ mGal, está coerente com o valor encontrado para a mesma grandeza no ajustamento da RGFB.

Os valores de gravidade ajustados nas estações da linha de calibração ON-AN são apresentados na Tab. 3. Os desvios padrão estimados atestam a boa qualidade dos valores de gravidade. A quantidade de ligações rejeitadas pode ser considerada satisfatória, não comprometendo a estima-

Estação	Código	Gravidade mGal	D. Padrão mGal	Ligações Boas	Ligações Rejeitadas
Rio de Janeiro C	016080	978791,64	0,012	139	9
Angra dos Reis*	CAL-01	978768,84	0,015	16	0
Engenheiro Passos	CAL-02	978601,09	0,012	348	16
Fazenda Lapa	CAL-03	978419,55	0,013	354	10
Marco Zero	CAL-04	978325,58	0,014	350	14
Agulhas Negras	CAL-05	978163,10	0,016	172	10

Tabela 3 - Valores de Gravidade Ajustados (*Ocupada apenas em 1982).

Table 3 - Adjusted Gravity Values (*Occupied only in 1982).

tiva estatística dos valores de gravidade e seus respectivos desvios padrão.

A Tab. 4 mostra os fatores de escala ajustados para os 13 gravímetros que foram utilizados nos levantamentos da linha de calibração. Note que o fator de escala do gravímetro G257 está seguido da letra F por ter sido considerado fixo no ajustamento.

O desvio padrão, indicado na tabela, para este gravímetro é aquele obtido no ajustamento da RGFB. Os demais fatores de escala foram estimados no ajustamento da linha e apresentam valores coerentes, com variações na quarta ou quinta casas decimais. Os desvios padrão estão fortemente relacionados com o número de observações efetuadas com cada instrumento. Assim, pode-se observar que para os gravímetros G613, G628, G670, G372 e G864, o desvio padrão dos fatores de escala foi estimado em 0,000056 que é o esperado para duas ocupações da linha (duas vezes o trajeto de ida e volta).

Gravímetro	Escala Ajustada	D. Padrão	Ligações Boas	Ligações Rejeitadas
G257	1,000317F	0,000021	140	4
G011	0,999727	0,000030	81	7
G602	1,000471	0,000026	120	0
G622	1,000448	0,000027	115	5
G613	0,999963	0,000056	16	0
G628	1,000460	0,000056	16	0
G670	1,000431	0,000056	16	0
G674	1,000476	0,000030	88	8
G372	1,000474	0,000056	16	0
G454	1,000381	0,000044	30	2
G745	1,000331	0,000049	22	2
G761	1,000571	0,000049	22	2
G864	1,000563	0,000056	16	0

Tabela 4 - Fatores de Escala Ajustados.

Table 4 - Adjusted Scale Factors.

Os coeficientes de deriva estimados no ajustamento, para as diferentes ocupações com cada gravímetro, apresentaram valores geralmente negligenciáveis, exceto para o gravímetro G674, cujos coeficientes de deriva apresentaram os valores da Tab. 5. Observa-se que dos 12 (doze) segmentos de deriva especificados para o gravímetro G674, 7 (sete) apresentam coeficientes significativos. Este comportamento também foi observado em outros instrumentos do mesmo tipo e marca com números de série superiores.

Gravímetro	Da Data	Para a Data	Seg. No.	Deriva Ajustada	Dev. Padrão	Signif.?
G674	830830.0800	830831.0800	1	-0.01579	0.0082	NÃO
G674	830901.1400	830902.0800	2	-0.01659	0.0078	NÃO
G674	851119.0800	851120.0900	3	-0.03758	0.0066	SIM
G674	851121.1300	851122.0800	4	-0.02479	0.0063	SIM
G674	860806.1200	860807.0300	5	-0.04470	0.0080	SIM
G674	860808.1200	860809.0300	6	-0.05124	0.0062	SIM
G674	871006.1200	871007.0500	7	-0.00998	0.0060	NÃO
G674	871008.1200	871009.0500	8	-0.01979	0.0059	SIM
G674	871013.1200	871014.0500	9	-0.00605	0.0061	NÃO
G674	871016.1200	871017.0500	10	-0.00943	0.0059	NÃO
G674	910627.1300	910628.0400	11	-0.02952	0.0104	SIM
G674	910702.1400	910703.0600	12	-0.02502	0.0058	SIM

Tabela 5 - Coeficientes de deriva para o gravímetro G674.

Table 5 - Drift coefficients for the gravimeter G674.

O desempenho de cada gravímetro pode ser avaliado a partir da Tab. 6, onde é indicado o peso atribuído a priori para as observações de cada instrumento. Os pesos ajustados e os desvios padrão são grandezas inversamente proporcionais, estimadas após o ajustamento. Estes valores podem ser usados como estimadores da precisão das observações efetuadas com o respectivo gravímetro. Assim, pode-se observar que o gravímetro G628 apresentou o melhor indicador de precisão dentre os gravímetros utilizados. Entretanto, o número de ligações observadas com este gravímetro não é muito grande, apenas 16 (dezesseis), o que pode comprometer a significância estatística daqueles valores. Os dois gravímetros com desempenho menos favorável foram o G011 e o G674, com desvios padrão de 0,0394 mGal e 0,0339 mGal, respectivamente, embora estes resultados estejam dentro das especificações usualmente aceitas para este tipo de instrumento ($\sigma \leq 0,050$ mGal). Estes foram também os instrumentos que tiveram os maiores números de observações rejeitadas.

Gravímetro	Peso a Priori	Peso Ajustado	Resíduo Médio	Desvio Padrão	R. Médio Signif.?	Lig. Boas	Lig. Rej.
G011	1040.00	645.312	-0.0002	0.0394	NÃO	81	7
G257	1040.00	1061.523	0.0005	0.0307	NÃO	140	4
G372	1040.00	1546.908	0.0012	0.0254	NÃO	16	0
G454	1040.00	947.408	0.0031	0.0323	NÃO	30	2
G602	1040.00	973.277	-0.0002	0.0321	NÃO	120	0
G613	1040.00	1280.849	-0.0001	0.0279	NÃO	16	0
G622	1040.00	1204.991	0.0006	0.0288	NÃO	115	5
G628	1040.00	3055.181	-0.0028	0.0179	NÃO	16	0
G670	1040.00	1299.346	-0.0004	0.0277	NÃO	16	0
G674	1040.00	867.213	-0.0008	0.0339	NÃO	88	8
G745	1040.00	1239.525	-0.0020	0.0283	NÃO	22	2
G761	1040.00	1718.087	-0.0011	0.0241	NÃO	22	2
G864	1040.00	889.869	-0.0011	0.0335	NÃO	16	0

Tabela 6 - Desempenho dos Gravímetros.

Table 6 - Gravimeters' Performance.

Como foi esclarecido anteriormente, todas as observações receberam o mesmo peso a priori (1040), independentemente do instrumento. No caso do gravímetro G628, se o peso ajustado fosse adotado, eventuais observações efetuadas com este instrumento, que apresentassem resíduos maiores do que 0,054 mGal ($3 \times 0,0179$ mGal), seriam rejeitadas, enquanto que para as observações efetuadas com o gravímetro G011 seriam admitidos resíduos de até 0,118 mGal ($3 \times 0,0394$ mGal).

CONCLUSÕES

Não houve neste trabalho a pretensão de se estabelecer uma linha de calibração que fosse suficiente para calibrar, de fato, gravímetros geodésicos LaCoste & Romberg, ou similares. Para isso seria necessária uma linha com amplitude de gravidade igual ou maior do que o alcance da escala desses instrumentos (7000 mGal). Entretanto, os resultados obtidos no ajustamento da linha de calibração ON-AN, credenciam a sua utilização na verificação de desempenho de gravímetros geodésicos LaCoste & Romberg, ou similares, de modo a assegurar a boa qualidade das medidas efetuadas com estes instrumentos. No caso dos gravímetros utilizados na RGF, a Tab. 4 mostra que todos os gravímetros apresentam padrão de precisão normalmente encontrados para este tipo de instrumento. O maior cuidado fica por conta da deriva do gravímetro G674 (Tab. 5), que apresenta valores um pouco acima do normal.

Não obstante a limitação da linha em amplitude de gravidade, é possível a sua utilização para a determinação dos fatores de escala desses instrumentos em relação ao datum gravimétrico, visto tratarem-se de fatores residuais, obtidos após a aplicação da função de calibração de cada instru-

mento, fornecida pelo fabricante (tabela com fatores de escala). Neste caso, considerando-se que as funções de calibração dos gravímetros corrigem a falta de linearidade de suas escalas, os fatores residuais constantes da Tab. 4 devem ser suficientes para compatibilizar as escalas dos gravímetros verificados com o datum gravimétrico utilizado (neste caso, as estações absolutas de gravidade). Do mesmo modo, os valores de gravidade, constantes da Tab. 3, podem ser utilizados para verificação de outros gravímetros similares.

Normalmente, nos instrumentos termostatizados e dotados de dispositivos de compensação barométrica, nenhuma correção de temperatura ou de pressão é prevista. Até mesmo porque esses efeitos não são de fácil modelagem matemática. Entretanto, qualquer ineficácia desses dispositivos se refletirá no desempenho do gravímetro, como também nas suas características, que estarão sujeitas a variações, podendo comprometer a qualidade das medidas. Escala e deriva são características muito afetada por este tipo de problema. Assim, com reocupações periódicas da linha de calibração ON-AN será possível detectar eventuais mudanças nessas características, que podem estar associadas ao mal funcionamento do dispositivos térmico e barométrico. Neste caso, tudo que se pode fazer é encaminhar o instrumento ao fabricante para o devido reparo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às instituições e pessoas que cooperaram com este trabalho. Agradecemos ao Eng. N.P. dos SANTOS e Eng. A.J.S. CAVALCANTE (Observatório Nacional) e às seguintes instituições: DMA (Defense Mapping Agency), Petrobras S/A, UFPr, UFPa, UNB.

REFERÊNCIAS

- ESCOBAR, I. P. - 1985** - Injunções Relativas em Ajustamento Gravimétrico. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil. 122p.
- GEMAE, C.; LEITE, O. S. H.; ROSIER, F. A.; TORGE, W.; RÖDER, R. H. & SCHNÜLL, M.; - 1990**- Large-scale absolute gravity control in Brazil. In: RUMMEL R., HIPKIN R.G. (eds): IAG Symp. No. 103, Edimburg, Scotland, IAG Symp. Proceedings., 49-55, Springer, New York.
- GSC-GEOLOGICAL SURVEY OF CANADA - 1988** - Gravity Data Processing System -GRAVSYS. Ottawa, Canada. 210p.
- LACOSTE & ROMBERG - 1990** - Instruction manual for model G gravity meter. Austin, Texas. 14p.
- MCCONNELL, R. K.; WINTER, P. J. & GELLER, R. F. - 1979** - Latin American Gravity Standardization Network 1977 (LAGSN 77). Earth Physics Branch, Ottawa, Canada. 30p.
- MORELLI, C.; GANTAR, C.; HONKASALO, T.; MCCONNELL, R. K.; TANNER, J. G.; SZABO, B.; UOTILA, U. & WHALEN T. - 1974** - The International Gravity Standardization Net 1971 (IGSN71). IUGG-IAG-Spec. Publ., No. 4. 194p.
- TORGE, W.; TIMMEN, L.; RÖDER, R. H. & SCHNÜLL, M. - 1994** - The IFE Absolute Gravity Program "South America" 1988 - 1991. Deutsche Geodätische Kommission No. 299, München. 75p.

Submetido em: 05/11/95

Revisado pelo(s) autor(es) em: 26/03/96

Accito em: 29/03/96

APÊNDICE 1

Descrições das Estações da Linha de Calibração nas páginas 65 e 66.

APPENDIX 1

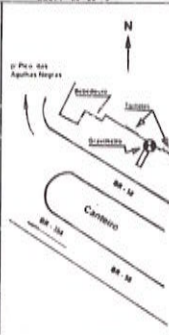

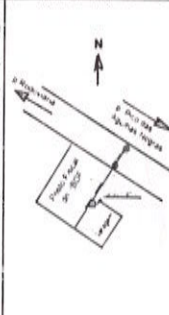

Descriptions of the Calibration Line Stations in pages 65 and 66.

CN₃ OBSERVATÓRIO NACIONAL		DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA
NÚMERO DA ESTAÇÃO / STATION NUMBER CAL - 02	PAÍS / COUNTRY Brasil	NOME DA ESTAÇÃO / STATION NAME Engenheiro Passos
ALT. : 489 m	LAT. : 22° 39' 8"	LONG. : 44° 40' 7"
PROVÍNCIA OU ESTADO / PROVINCE OR STATE Rio de Janeiro ESTABELECIDO POR / ESTABLISHED BY Observatório Nacional DATA DA ÚLTIMA REVISÃO / DATE OF LAST REVISION _____ OUTRA DESIGNAÇÃO / OTHER DESIGNATION _____		
Gravímetro sobre a placa gravimétrica do O. N. à direita de quem entra pela porta principal da antiga Igreja de S. Benedito, no bairro do mesmo nome		

CN₄ OBSERVATÓRIO NACIONAL		DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA
NÚMERO DA ESTAÇÃO / STATION NUMBER CAL - 03	PAÍS / COUNTRY Brasil	NOME DA ESTAÇÃO / STATION NAME Fazenda Lapa
ALT. : 1300 m	LAT. : 22° 34' 2"	LONG. : 44° 40' 7"
PROVÍNCIA OU ESTADO / PROVINCE OR STATE Rio de Janeiro ESTABELECIDO POR / ESTABLISHED BY Observatório Nacional DATA DA ÚLTIMA REVISÃO / DATE OF LAST REVISION _____ OUTRA DESIGNAÇÃO / OTHER DESIGNATION _____		
Gravímetro sobre a placa gravimétrica do O. N. , cravada à direita de quem entra pela porta principal da Capela da Fazenda Lapa .		

CN₅ OBSERVATÓRIO NACIONAL		DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA
NÚMERO DA ESTAÇÃO / STATION NUMBER 01000	PAÍS / COUNTRY BRASIL	NOME DA ESTAÇÃO / STATION NAME Observatório Nacional
ALT. : 18,00 m	LAT. : 22° 53' 35"	LONG. : 43° 13' 34"
PROVÍNCIA OU ESTADO / PROVINCE OR STATE Rio de Janeiro ESTABELECIDO POR / ESTABLISHED BY Observatório Nacional DATA DA ÚLTIMA REVISÃO / DATE OF LAST REVISION _____ OUTRA DESIGNAÇÃO / OTHER DESIGNATION _____		
Gravímetro situado sobre a placa gravimétrica do O.N. cravada no 2º degrau da porta para a Este de 184 portas localizadas no Sul do prédio do Departamento Administrativo do Observatório Nacional, em São Cristóvão.		

CN₆ OBSERVATÓRIO NACIONAL		DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA
NÚMERO DA ESTAÇÃO / STATION NUMBER CAL - 01	PAÍS / COUNTRY BRASIL	NOME DA ESTAÇÃO / STATION NAME Angra dos Reis
ALT. : 8 m	LAT. : 23° 45' 0"	LONG. : 44° 18' 1"
PROVÍNCIA OU ESTADO / PROVINCE OR STATE Rio de Janeiro ESTABELECIDO POR / ESTABLISHED BY Observatório Nacional DATA DA ÚLTIMA REVISÃO / DATE OF LAST REVISION _____ OUTRA DESIGNAÇÃO / OTHER DESIGNATION _____		
Gravímetro colocado no lado direito do degrau superior de 2º porta à esquerda da Igreja N. S. do Carmo - praça N. 1023 P. do Itaip. 25 em frente esta.		

CNPq - OBSERVATÓRIO NACIONAL		DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA	
NUMERO DE ESTACÃO ESTACIONAMENTO	PAIS (COUNTRY)	NOME DA ESTACÃO ESTACIONAMENTO	
CAL - 04	Brasil	Marco Zero	
ALT. = 1 669 m	Lat. = 22 22 S	Long. = 44 45 E	
PROVINCIA OU ESTADO PROVINCE OR STATE	RIO DE JANEIRO		
ESTABELECEDA POR ESTABLISHED BY	OBSERVATÓRIO NACIONAL		
DATA DA ÚLTIMA REVISÃO DATE OF LAST REVISION			
OUTRA DESIGNAÇÃO OTHER DESIGNATION			
Gravimetro sobre a placa gravimétrica do O.N. cravada próximo aos toldados, no bebedouro localizado no trevo do Km 0 da BR-58, no local denominado Garganta do Registro.			
			
CNPq - OBSERVATÓRIO NACIONAL		DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA	
NUMERO DE ESTACÃO ESTACIONAMENTO	PAIS (COUNTRY)	NOME DA ESTACÃO ESTACIONAMENTO	
CAL - 05	Brasil	Agulhas Negras	
ALT. = 2 500 m	Lat. = 22° 32' 4"	Long. = 44° 42' 4"	
PROVINCIA OU ESTADO PROVINCE OR STATE	Rio de Janeiro		
ESTABELECEDA POR ESTABLISHED BY	Observatório Nacional		
DATA DA ÚLTIMA REVISÃO DATE OF LAST REVISION			
OUTRA DESIGNAÇÃO OTHER DESIGNATION			
Gravimetro sobre a placa gravimétrica do O.N. cravada à direita de quem entra pela porta lateral esquerda dentro da garagem do posto fiscal do IBDF, sobre o lado do			
			

NOTAS SOBRE OS AUTORES NOTES ABOUT THE AUTHORS

Iris Pereira Escobar

Iris Pereira Escobar é Tecnologista Senior do CNPq-Observatório Nacional e Professor Adjunto da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Formou-se em Engenharia Cartográfica na Universidade do Estado do Rio de Janeiro em 1975, obteve o M.Sc em Geodésia na UFPr em 1985 e o Ph.D em Geofísica no IAG/USP em 1991. Suas principais áreas de interesse são a Geodésia Física e a Gravimetria.

Iris Pereira Escobar is a Senior Lecturer at the CNPq-Observatório Nacional and at the Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). He graduated at the UERJ with a B.Sc. in Cartographic Engineering in 1975, received his M.Sc. in Geodesy from the UFPr in 1985 and his Ph.D. in Geophysics from the IAG/USP in 1991. His main research interest is in Physical Geodesy and Gravimetry.

Nelsi Cogo de Sá

Nelsi Cogo de Sá é Professor Doutor do Instituto Astronômico e Geofísico (IAG) da USP. Formou-se em Matemática na UFPr em 1973, obteve o M.Sc. em Geodésia na UFPr em

1979 e o Ph.D. em Geofísica no IAG/USP em 1988. Suas principais áreas de interesse são a Geodésia Física e a Gravimetria.

Nelsi Cogo de Sá is a Senior Lecturer at the Instituto Astronômico e Geofísico da USP (IAG/USP). He graduated at the UFPr with B.Sc. in Mathematics in 1973, received his M.Sc. in Geodesy from the UFPr in 1979 and his Ph.D. in Geophysics from the IAG/USP in 1988. His main research interest is in Physical Geodesy and Gravimetry.

José Justino Dantas

José Justino Dantas é Tecnologista Senior do CNPq-Observatório Nacional. Formou-se em Engenharia Cartográfica na UERJ em 1976. Sua principal área de interesse é a Gravimetria.

Fernando José Soares e Silva Dias

Fernando José Soares e Silva Dias é Tecnologista Pleno do CNPq-Observatório Nacional (ON). Graduou-se como Bacharel em Física na UFRJ em 1976. Atualmente está concluindo o seu curso de mestrado em Geofísica no ON. Suas principais áreas de interesse são a Geodésia Física e a Gravimetria.

THE OBSERVATÓRIO NACIONAL – AGULHAS NEGRAS GRAVITY CALIBRATION LINE

In spite of recent years improvements in gravimetry instrumental technology, regarding the absolute gravimeters, the mechanical differential gravimeters still remain the most used in gravity survey. In fact, their total weight, less than 12 kg in the carrier case, and accuracy, less than 10 μ Gal, explain the preference for this instrument. In view of their inherent instability, a periodic control of the characteristics of mechanical differential gravimeters is necessary. This is specially important when these instruments are used in precise gravity surveys. In this case, instrumental drift as well as the scale factor must be controlled. Furthermore, it is important to verify the adequate behavior of the devices that avoid or compensate the effects on readings due to environment variations, mainly those related with the temperature and atmospheric pressure. The establishment of a vertical gravity calibration line, that is, one that explores the gravity variations with the elevation, provides the means to obtain satisfactory solutions to this problem.

The Observatório Nacional - Agulhas Negras Gravity Calibration Line (Fig. 1) was established with the objective of monitoring the characteristics of the gravimeters used in the Brazilian Gravity Fundamental Network surveying. It is a 628 mGal gravity range circuit, divided in four subintervals by three intermediate stations: Engenheiro Passos, Fazenda Lapa and Marco Zero (Tab. 1). Since 1983 the Angra dos Reis station was abandoned because of its instability and difficult access. Those stations descriptions are in Appendix 1. The traverse comprises an altitude difference of about 2500 meters, in a distance of around 230 kilometers, where both ambient temperature and atmospheric pressure change significantly with elevation. If the circuit is covered in two round trips, it is possible to determine the scale factors of the gravimeters, with estimated standard deviations better than 0.00006.

From 1982 to 1994, nine determinations in the line were performed. Observations with different sets of gravimeters, belonging to several entities, were carried out (Tab. 2). Those observations were adjusted by least squares, using network adjustment programs from GRAVSYS gravity data processing system, version 2.0, developed by the Geological Survey of Canada (GSC 1988). It was used the following mathematical model:

$$g_i - g_j + k_p Dr_{ij} + d_p Dt_{ij} = 0, \quad (1)$$

where:

g_i and g_j are adjusted gravity values on i^{th} and j^{th} gravity stations, respectively;

k_p is the scale correction factor for the p^{th} gravimeter;

Δr_{ij} is the observed gravity difference $r_j - r_i$, where r_j and r_i are, respectively; the readings on the j^{th} and i^{th} stations, corrected from the known systematic effects;

d_p is the drift rate for the p^{th} gravimeter;

Δt_{ij} is the time difference $t_j - t_i$, between the j^{th} and i^{th} stations, respectively.

The model was composed of 728 equations, related to the same number of observed gravity differences. The adjustment accounted for 106 unknowns, related to 6 gravity values on the line stations, increased by 12 scale factors and 88 drift rates (one for each occupation with each gravimeter). After the adjustment, the standard deviation of unit weight was estimated in 1.0107 and the standard deviation of one observation was estimated in 0.0313 mGal.

The adjusted gravity values on the calibration line stations are presented in Tab. 3. The Tab. 4 shows the adjusted scale factors for the 13 gravimeters used on the calibration line observations. Note that the scale factor for the gravimeter G257 is followed by the letter F, that means the value was fixed in the adjustment. For that instrument, the scale factor value and its standard deviation are the same as those obtained in the adjustment of the Brazilian Gravity Fundamental Network. The adjusted values for drift rates were estimated for different occupations with each gravimeter. In general, insignificant drift rates were found, except for G674 whose values are indicated in Tab. 5. The performance for each gravimeter can be evaluated from the Tab. 6, where both a priori and adjusted weights are pointed out.

In spite of its gravity range limitation, it is possible to use the line for the determination of the scale factors of the gravimeters, related to the gravity datum. Those are residual factors, obtained after the application of the manufacturer calibration function. Then the factors in Tab. 4 are presumably sufficient to make the scale factors of the gravimeters compatible with the adopted gravity datum. In addition, the scale factor and the drift rate depend on the efficacy of the thermostatic and pressure compensation devices. Consequently, with periodic line reoccupation it is possible to detect eventual problems in those devices, monitoring changes in the gravimeter's characteristics.