

OS GRAVÍMETROS MECÂNICOS

Iris Pereira Escobar

Resumo

Os gravímetros mecânicos são, atualmente, os principais instrumentos de determinação relativa da gravidade. Tais aparelhos são largamente empregados na busca de soluções de alguns problemas geodésicos e geofísicos. Suas características impõem certos cuidados na construção e no uso prático e, às vezes, limitam seu campo de aplicação.

A característica mais notável dos gravímetros mecânicos é a chamada deriva instrumental que se traduz numa variação contínua das leituras, mesmo com a gravidade constante. Além disso, as leituras são obtidas em uma escala particular, que varia de instrumento para instrumento, fazendo-se necessária a conversão em miligals (10^{-5} m/s²), através de uma operação denominada calibração. Outra característica destes instrumentos é a limitação na amplitude de medida, que depende da sua construção e precisão.

As condições ambientais: temperatura, pressão atmosférica, campo magnético, influenciam igualmente na qualidade das observações, devendo ser consideradas tanto na construção do instrumento quanto no estabelecimento dos métodos operacionais.

1 — Introdução

A determinação relativa da gravidade, ou seja, a determinação da variação na aceleração da gravidade, Δg , de ponto para ponto, encontra nos gravímetros mecânicos os seus principais instrumentos na atualidade. Notáveis pela alta sensibilidade e precisão, portabilidade, facilidade e rapidez no manejo, tais instrumentos são largamente empregados na busca de soluções de alguns problemas geodésicos e geofísicos.

Não obstante suas qualidades, estes instrumentos apresentam características que, em contrapartida, impõem certos cuidados na construção, no uso prático e às vezes, limitam seu campo de aplicação. A mais notável destas características é a chamada deriva do ponto zero, que se traduz numa variação contínua das leituras, decorrente de deformações irreversíveis no material que constitui o sistema elástico do gravímetro. Além disso, as observações são, na realidade, leituras das graduações da escala do gravímetro. Essa escala varia de aparelho para aparelho e sua conversão em miligals é feita através de coeficientes denominados fatores de escala dos gravímetros. A operação de determinação deste fator é uma das questões mais complexas e importantes na gravimetria e denomina-se calibração. Outra característica dos gravímetros mecânicos é a sua limitação na amplitude de medida, que depende da sua cons-

trução e precisão. Os gravímetros denominados geodésicos possuem grande amplitude de medida (de 3 a 5 gals) que possibilita o levantamento de grandes intervalos de gravidade. Já os gravímetros utilizados nos trabalhos de prospecção possuem uma amplitude de medidas de 100-200 mGal.

2 — O sistema elástico usado nos gravímetros

Os gravímetros, de modo geral, são construídos segundo o princípio de contrapor à gravidade uma força que lhe é sensivelmente igual, registrando-se a posição de equilíbrio.

Nos gravímetros mecânicos a força da gravidade é contrabalçada pela força elástica de molas especiais (metálicas ou de quartzo), segundo o princípio do dinamômetro, com base na lei de Hooke. As pequenas variações na gravidade acarretarão pequenas variações no peso de uma massa, que se traduzirão em alongamentos ou encurtamentos da mola de suspensão.⁰¹

De acordo com o sistema de medida das variações do comprimento da mola, os gravímetros mecânicos classificam-se fundamentalmente em duas categorias⁰²: os estáveis e os instáveis ou astáticos. Nos gravímetros estáveis, variações extremamente pequenas (da ordem de $10^{-10}m$) no comprimento da mola são medidas diretamente, por meio de uma amplificação adequada, seja ótica, mecânica ou elétrica. Os gravímetros astáticos são projetados de modo a trabalharem em estado de equilíbrio, aproximadamente instável, tal que quando o sistema é deslocado devido à variação na gravidade, outras forças suplementares são introduzidas, tendendo a aumentar o deslocamento.⁰³ A variação da gravidade pode ser medida pela força necessária para retornar o sistema a sua posição de equilíbrio original. A vantagem do sistema astático é a sua grande sensibilidade; a desvantagem é a não linearidade da deformação do sistema em relação à ação da gravidade. Atualmente, os gravímetros astáticos são os mais usados.

A título de ilustração são dadas, a seguir, as descrições sucintas dos princípios de funcionamento de alguns gravímetros:

2.1 — Gravímetros Estáveis

a — ASKANIA

Este instrumento (fig. 1) consiste essencialmente de um sistema elástico constituído por uma alavanca, contendo uma massa (6) em uma extremidade, sendo sustentada, na outra, por uma mola helicoidal (5). As variações da gravidade acarretarão pequenos deslocamentos na massa, que podem ser medidos pela restauração da posição de equilíbrio original, por intermédio de um dispositivo de compensação constituído pela mola auxiliar (4) e um micrômetro (3). A compensação é feita pela variação da tensão na mola auxiliar, por meio do parafuso micrométrico que reconduz a massa à mesma posição (posição zero). Um espelho (2) solidário à alavanca reflete um sinal lumi-

noso em uma célula fotoelétrica dupla. O movimento da alavanca devido à variação na gravidade é indicado pela deflexão de um galvanômetro, provocada pela variação do potencial relativo nas duas células. Girando-se o parafuso micrométrico, a alavanca é reconduzida à posição zero e o galvanômetro indicará zero. A diferença entre as leituras na escala do micrômetro serve como indicador da variação de gravidade.

O aparelho possui uma escala de medida com alcance de 800 mGal. Cada volta no parafuso de medida altera a capacidade do aparelho de 200 mGal.⁰⁴ Em condições de operação no campo o instrumento permite uma exatidão real de 0,02 mGal. Seu peso excessivo (20,5 kg sem pedestal e 43 kg na embalagem de transporte), no entanto, o torna mais indicado para medidas estacionárias (estações de maré), para o que possui um dispositivo especial de registro automático que permite uma exatidão de leitura de alguns microgals.

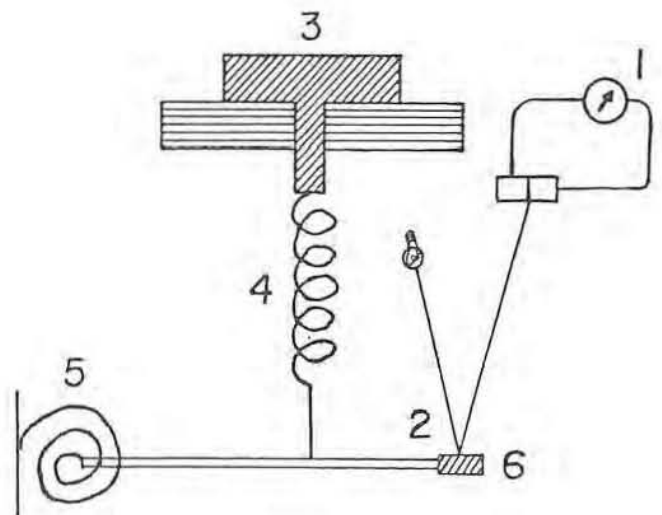


Fig. 1

b — GULF

O gravímetro Gulf é constituído por uma fita helicoidal (fig. 2). A mola, assim formada, possui uma das extremidades fixa, enquanto que da outra extremidade pende uma massa com um espelho. Uma variação na gravidade causa uma variação no comprimento da fita helicoidal, acompanhada de uma rotação da extremidade livre. No gravímetro Gulf a rotação (da ordem de segundos) é muito maior do que o deslocamento, podendo ser medida mais precisamente, mediante um conveniente jogo de prismas que refletem um raio de luz sobre o espelho. O alcance do instrumento é cerca de 30 mGal e a precisão de medida é da ordem de 0,02 mGal.⁰⁵



Fig. 2

2.2 — Gravímetros Astáticos

a — THYSSEN

O gravímetro de Thyssen demonstra convenientemente o princípio da astatização. É essencialmente uma balança de braço AB (fig.3) apoiado sobre o fulcro C. Uma carga de massa m é suspensa na extremidade A e a extremidade B é presa a uma mola que equilibra o sistema e mantém o braço na posição horizontal. Uma carga adicional m' , solidária ao braço da balança através de uma haste, é colocada acima do fulcro. Na posição de equilíbrio o peso da massa m' atua somente sobre o ponto C. Variando a gravidade a haste Cm' inclina-se com o braço da balança de modo tal que a linha de ação da força $m'g$ deixa de passar por C. Desenvolve-se, desse modo, um momento suplementar em relação a C, que tenderá a aumentar a inclinação do braço, proporcionalmente ao valor da massa m' , à distância Cm' e ao ângulo de inclinação. O sistema retornará ao equilíbrio pela variação da tensão na mola. O deslocamento do braço fornecerá uma medida da variação da gravidade.

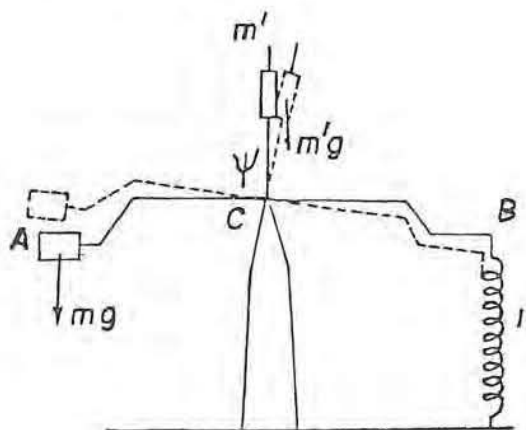


Fig. 3

b — WORDEN

O gravímetro Worden, construído pelo "Houston Technical Laboratory" (Texas, U.S.A.), é um dos gravímetros mais utilizados na atualidade. Trata-se de um instrumento astático, cujo sistema elástico é construído de quartzo fundido. O quartzo fundido é o material usado em virtude de suas propriedades favoráveis⁰⁶; é fácil de ser trabalhado, podendo ser transformado em hastes ou fibras de espessura de alguns micra que podem ser enroladas de modo a se obter uma mola. O instrumento funciona segundo o princípio do braço de balança (fig.4). Uma carga é colocada na extremidade do braço OC, que pode girar sobre um eixo O perpendicular ao plano do desenho. O braço OC é mantido em equilíbrio por uma mola AB conectada a ele através de um braço OB (as linhas pontilhadas mostram sua posição quando deslocado por um aumento na gravidade Δg). Quando o sistema está em equilíbrio os momentos da gravidade e da

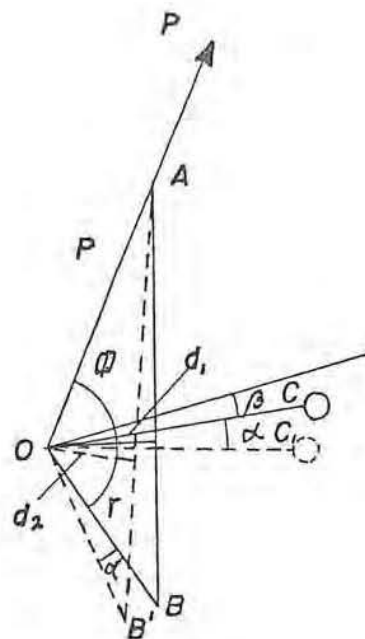


Fig. 4

força elástica da mola são iguais. O braço d_2 da força elástica nesse sistema é menor do que o braço da gravidade d_1 ; portanto é necessária uma variação grande da força elástica Q para balancear a variação no momento da gravidade. A equação de equilíbrio é:

$$md_1 = Qd_2$$

Como o sistema é medido a partir do zero (i.e. retornando o braço OC à mesma posição), assim os braços d_1 e d_2 podem ser considerados variáveis com a

variação da gravidade. Então a variação do momento é determinada pela variação das forças

$$md_1 dg = d_2 dQ,$$

$$\text{assim } \frac{dQ}{mdg} = \frac{d_1}{d_2}$$

ou seja, a variação da força Q deve ser maior do que a variação da gravidade g na mesma razão de d_1 para d_2 . Conseqüentemente pequenas variações da gravidade causam grandes esforços na mola e correspondentemente grandes rotações no braço, tornando o sistema astatizado.

Um diagrama da disposição dos sistema elástico do gravímetro é apresentado na fig.5. A parte do sistema à esquerda do diagrama (consistindo de uma armação, fibra de torção (1), braço do peso (7), e mola de compensação principal (8) forma a unidade básica para medidas da gravidade. A direita apresenta-se o dispositivo de leitura, com as molas de medida e rea-

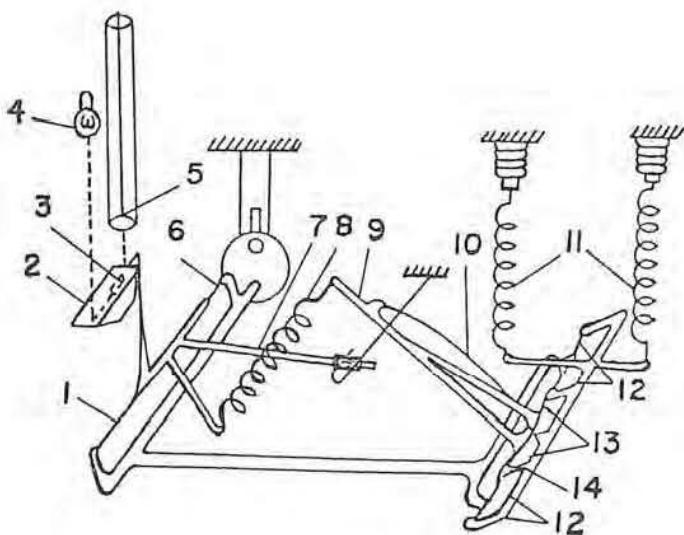


Fig. 5

juste ou geodésica (11) e um braço (9), ligado à mola de trabalho (8), que serve como um compensador de temperatura. O momento do braço de pesagem (7) é equilibrado pelo momento elástico da mola (8) e pelo torque da dobradiça (6). Uma variação da gravidade provoca um giro no braço de pesagem, fazendo girar juntamente uma haste em forma de L (3), que lhe é solidária e que serve como ponteiro do instrumento. O deslocamento do ponteiro pode ser observado por intermédio de um microscópio (5), iluminado por uma lâmpada (4), através de um prisma (2). O microscópio possui uma escala no campo ocular e o ponteiro é posicionado em uma de suas divisões. As leituras são obtidas pelo método zero. A mola de reajuste ou geodésica pode ter sua tensão variada, o que acarretará uma rotação na armação (14), que por sua

vez girará o compensador de temperatura (9), variando a tensão na mola principal (8).

O braço de pesagem também pode girar em função da variação de temperatura. Uma elevação da temperatura, por exemplo, o erguerá ligeiramente; ao mesmo tempo o fio metálico (10) do compensador de temperatura (9) alonga-se e gira este último sobre a dobradiça (13) (da direita para a esquerda na figura 5), reduzindo deste modo a tensão na mola principal (8). Assim os deslocamentos do braço de pesagem em função da variação de temperatura são compensados por deslocamento no sentido oposto por intermédio do compensador de temperatura.

O fio metálico (10) é uma mola curva que permite a compensação de variação não-lineares com a temperatura. A compensação do efeito da variação de temperatura é feita de modo que o coeficiente de temperatura não exceda 0,3 mGal por 1°C na faixa de temperatura de + 20°C.⁰⁷

A exatidão do gravímetro Worden varia entre + 0,1 e + 0,2 mGal, dependendo da qualidade do instrumento considerado e do modo operacional. A mola de compensação (11) permite a medida de um intervalo gravimétrico de cerca de 100 mGal. Entretanto, no modelo geodésico, podem ser medidos intervalos maiores, de Hooke, denominam-se elasticidade im-
prefeita, que se acentua notavelmente com a variação da temperatura.

Os materiais escolhidos para a fabricação dos elementos elásticos dos gravímetros de metal são as ligas de ferro-níquel (elinvar, isoelástico, nevarox), que diferenciam entre si mais pelas pequenas impurezas de outros elementos (por exemplo, berílio), tempera e método de produção do material, do que pela quantidade de ferro e níquel. Não obstante sejam ligas pouco sujeitas ao efeito elástico residual, são magnéticas e, portanto, sujeitas à influência de campos magnéticos. Por esta razão alguns sistemas elásticos são construídos de quartzo fundido, além das ligas gravimétricas especiais. As desvantagens do quartzo são um alto coeficiente termoelástico, fragilidade, e perda da vitrificação com o tempo, piorando as propriedades elásticas.

Teoricamente considera-se que ao variar a gravidade ocorra uma translação ou rotação (dependendo do tipo de sensor) da massa do sistema de medida. Nas realidade podem ocorrer outros tipos de deslocamentos que, entretanto, devem ser evitados tanto quanto possível. Considera-se, portanto, que os sistemas elásticos dos gravímetros tenham apenas um grau de liberdade, possibilitando movimento de translação ou de rotação. Sabe-se que, quando o sistema se encontra em equilíbrio estático a soma das forças externas e internas (elásticas), ou de seus momentos, deve ser igual a zero.

Considerando uma deformação no sistema elástico, x , registrada por um indicador especial conectado à massa em um sistema rotacional, o momento das forças externas,

$gM(x,t,B,\beta)$, devido fundamentalmente à ação da gravidade sobre todas as massas móveis do sistema em relação ao eixo de rotação, dependerá da temperatura t , da pressão atmosférica B e do ângulo β de inclinação do sistema. O momento elástico $\bar{M}(x,t)$, resultante de todas as forças internas em relação ao eixo de rotação, varia com a temperatura t . Então, a equação de equilíbrio é:

$$gM(x,t,B,\beta) + \bar{M}(x,t) = 0. \quad (3.1)$$

No caso de um sistema translacional, as próprias forças atuantes entram na equação de equilíbrio em lugar de seus momentos. Nesse caso,

$$mg + Fx = 0, \quad (3.2)$$

onde m é a massa deslocada; x é a deformação total do sistema elástico; F é a rigidez mecânica do sistema elástico, que depende do módulo de elasticidade e das dimensões dos elementos sistema.

Omitindo as variáveis entre parêntesis, em benefício da abreviação, e diferenciando a equação (3.1) em relação a todas as variáveis, obtém-se a forma geral da equação de equilíbrio do sistema elástico do gravímetro:

$$\left(g \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial \bar{M}}{\partial x} \right) \frac{dx}{dg} + \left(g \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \right) \frac{dt}{dg} + g \frac{\partial M}{\partial B} \cdot \frac{dB}{dg} + g \frac{\partial M}{\partial \beta} \cdot \frac{d\beta}{dg} + M = 0 \quad (3.3)$$

A grandeza dx/dg representa a variação da deformação do sistema elástico em função da variação da gravidade e denomina-se **sensibilidade do gravímetro**; dg/dt caracteriza a influência da temperatura nas leituras do gravímetro e denomina-se **coeficiente de temperatura**; dg/dB expressa o efeito barométrico e denomina-se **coeficiente barométrico**; $dg/d\beta$ indica a dependência das leituras do gravímetro em relação ao ângulo de inclinação do sistema elástico.

3.1 — Sensibilidade do Gravímetro

Considerando o tipo de gravímetro translacional mais simples, ou seja, uma mola helicoidal sujeita à ação de uma carga que a traciona dentro dos limites de proporcionalidade, a sensibilidade dx/dg é dada pela diferenciação da equação (3.2):

$$\frac{dx}{dg} = -\frac{m}{F} = -\frac{x}{g} \quad (3.4)$$

É, portanto, proporcional à deformação total x . Um aumento da sensibilidade pode ser alcançado tanto pelo aumento da massa m como pela redução da rigidez da mola, o que proporcionará uma grande deformação inicial. En-

tretanto, a portabilidade do instrumento limita a amplitude de deformação a cerca de 20 cm, o que dificulta a obtenção de grande sensibilidade com tais sistemas, nos quais baseiam-se, fundamentalmente, os gravímetros estáveis ou não-astáticos.

Os gravímetros astáticos utilizam sistemas elásticos rotacionais cuja equação de sensibilidade é obtida a partir da equação (3.3), supondo t , B e β constantes. Assim,

$$\frac{dx}{dg} = -\frac{M}{g \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial \bar{M}}{\partial x}} \quad (3.5)$$

Observa-se, então, que a sensibilidade cresce na proporção direta do momento total $M(x)$ das massas móveis do sistema, ou na proporção inversa da expressão $\phi(x) = g(\partial M/\partial x) + \partial \bar{M}/\partial x$. De acordo com a equação de equilíbrio (3.1), os momentos gM e \bar{M} e suas derivadas devem ser de sinais contrários. Portanto, construindo-se um sistema de modo tal que em certo intervalo de variação da gravidade $\phi(x)$ seja pequena, obtém-se um sistema de alta sensibilidade. Assim sendo, os sistemas astáticos devem se caracterizar pela não-linearidade de pelo menos um dos momentos gM e \bar{M} em função da variação de deformação x , com o propósito de permitir a eleição de um pequeno valor para $\phi(x)$.

3.2 — Influência da Temperatura

As propriedades elásticas do sistema, bem como sua geometria, estão sujeitas a alterações em decorrência da variação de temperatura. Como consequência disso, as indicações do gravímetro variam com a temperatura.

A expressão do coeficiente de temperatura é obtida a partir da equação (3.3), considerando constantes a deformação do sistema elástico, a pressão atmosférica e a inclinação do instrumento; assim,

$$\frac{dg}{dt} = -\frac{g \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial \bar{M}}{\partial t}}{M} \quad (3.6)$$

As relações entre os momentos das forças externas e internas e pequenas variações de temperatura podem ser dadas pelas expressões:¹³

$$M = M_0(1 + \lambda_1 \Delta t + \lambda_2 \Delta t^2); \quad \bar{M} = M_0(1 + \mu_1 \Delta t + \mu_2 \Delta t^2). \quad (3.7)$$

onde M_0 e \bar{M}_0 são, respectivamente, as somas dos momentos das massas e das forças elásticas para uma determina-

da temperatura inicial, t_0 ; $\Delta t = t - t_0$ é a variação da temperatura em relação ao seu valor inicial; λ_1 , λ_2 , μ_1 e μ_2 são, respectivamente, os coeficientes efetivos de temperatura lineares e quadráticos para a totalidade do sistema elástico, os quais dependem dos coeficientes de expansão térmica e dos coeficientes termoelásticos dos materiais que constituem os diferentes elementos componentes do sistema elásticos.

A expressão do coeficiente de temperatura é, então, obtida pela diferenciação das equações (3.7), posterior substituição na (3.6) e algumas simplificações, resultando:¹⁴

$$\frac{dg}{dt} = -g [(\lambda_1 - \mu_1) + 2(\lambda_2 - \mu_2) \Delta t] \quad (3.8)$$

Inferese daí que é possível obter-se um pequeno coeficiente de temperatura, pela escolha adequada dos elementos do sistema elástico, tal que $\lambda - \mu$ se aproxime de zero. Além disso, são construídos dispositivos termocompensadores especiais, tais como os compensadores bimetálicos, construídos por duas hastes metálicas de coeficientes de dilatação linear diferentes, fixas por ambas as extremidades, que se flexionam ao variar a temperatura. Se uma das extremidades estiver ligada ao elemento elástico do gravímetro, pode-se gerar um momento elástico compensador da ação da temperatura. Entretanto, já que os coeficientes termomecânicos dos corpos dependem da temperatura, é possível uma compensação total apenas para determinados valores desta. Além disso, fatores tais como a velocidade de variação da temperatura, o fluxo térmico no interior do volume ocupado pelo sistema elástico, a diferença de difusividade entre as partes do instrumento, impedem o estabelecimento de uma temperatura homogênea entre os distintos elementos. Para minimizar essa heterogeneidade térmica, utilizam-se dispositivos de isolamento térmico do sistema elástico, tal como os vasos Dewar, empregados nos gravímetros Worden, ou assegura-se uma temperatura interna constante, dentro de centésimo ou até milésimo de grau, através de um termostato elétrico, como é o caso do gravímetro La Coste & Romberg.

O funcionamento normal do termostato exige que a temperatura interna seja pelo menos 5 a 6 graus mais alta do que a maior temperatura externa possível^{15, 16}. Somente após o estabelecimento desse regime térmico, que necessita de pelo menos dois ou três dias,¹⁷ podem ser iniciadas as observações. Portanto, é importante que o termostato esteja permanentemente conectada à fonte de energia durante o período de observações.

As leituras dos gravímetros controlados termostaticamente, normalmente não sofrem correções de temperatura, já que o aparelho é mantido a temperatura constante¹⁸. Experiências práticas demonstraram que, geralmente tais

correções pioram os resultados, por serem de natureza complexa.^{15, 19}

A correlação de temperatura para os gravímetros sem controle termostático pode ser determinada tanto em câmara térmica como em condições de operação normal, usando as variações da temperatura diária. Confrontando-se as temperaturas com as leituras, abstraídas de outros efeitos sistemáticos, pode-se determinar a curva que correlaciona as duas grandezas. Havendo superabundância de observações, a curva pode ser estimada por ajustamento.

3.3 — Influência da Pressão Atmosférica

As massas móveis do sistema elástico do gravímetro, visto que se encontram mergulhadas em um fluido (geralmente o ar), estão sujeitas a um empuxo arquiimediano. Este é função da massa específica do fluido, que, por sua vez, depende da pressão atmosférica B .

Denomina-se efeito barométrico as variações de leitura dos gravímetros em função das variações da pressão atmosférica. O coeficiente barométrico pode ser obtido da equação (3.3), considerando constantes a deformação x , a temperatura t e a inclinação β :

$$Q_B = \frac{dg}{dB} = -\frac{g}{M} \frac{\partial M}{\partial B} \quad (3.9)$$

Em^{20, 21 e 22} apresenta-se a seguinte fórmula para Q_B :

$$Q_B = -g \frac{\rho_0}{\bar{\sigma}} \frac{1}{760 \left(1 + \frac{t}{273}\right)} \quad (3.10)$$

onde $\rho_0 = 12,93 \cdot 10^{-4}$ g/cm³ é a massa específica do ar à temperatura de 0°C e pressão de 760 Torr, $\bar{\sigma}$ é a massa específica efetiva do sistema elástico e t é a temperatura em °C.

Assim, para um sistema elástico totalmente constituído de quartzo fundido ($\bar{\sigma} = 2,2$ g/cm³), a uma temperatura de 20°C, considerando $g = 0,98 \times 10^6$ mGal, tem-se:

$$Q_B = -0,71 \text{ mGal/Torr.}$$

Para um sistema construído totalmente de platina ($\bar{\sigma} = 21,4$ g/cm³), nas mesmas condições anteriores, o coeficiente barométrico será:

$$Q_B = -0,07 \text{ mGal/Torr.}$$

Todos os gravímetros modernos ou são impermeáveis ao ar (e.g. Worden), ou dispõem de compensação barométrica.

trica (e.g. La Coste & Romberg), de modo que não é necessário introduzir-se uma correção pra a variação para a variação da pressão atmosférica. Pode-se verificar em laboratório, com o auxílio de uma câmara de pressão, a existência de correlação entre as leituras do gravímetro e a pressão atmosférica, resultante de falha na impermeabilidade ou compensação barométrica. Variando-se a pressão, ao mesmo tempo em que se faz leitura do gravímetro, constata-se a existência, ou não, da correlação barométrica. A evidência de tal correlação indicará que o aparelho não está em condições de operação, devendo ser reparado.²³

3.4 — Influência do Campo Magnético

As indicações dos gravímetros cujos sistemas elásticos são construídos de ligas metálicas estão sujeitas à influência dos campos magnéticos.

A principal fonte de influência magnética nos gravímetros é o campo magnético da Terra, que varia de um ponto de observação para outro. Alguns tipos de equipamentos (v.g. linhas de transmissão de alta voltagem, motores elétricos, etc.) podem induzir campos magnéticos de intensidade alta. A própria corrente que circula através dos condutores e do elemento de aquecimento do circuito termostático gera um campo magnético. Por este motivo os condutores do termostato são bifilares, de modo que a corrente que flui neles em sentidos opostos, provoca a cancelamento mútuo dos campos magnéticos.

A variação, δg_M , no valor da gravidade causada pela influência magnética pode ser expressa pela equação (3.11),^{24, 25, 26}:

$$\delta g_M = Q_Z \cdot Z + Q_H \cdot H \cdot \cos A, \quad (3.11)$$

onde Q_Z e Q_H são, respectivamente, os coeficientes magnéticos vertical e horizontal do gravímetro, determinados empiricamente e expressos em mGal/oersted; Z e H são, respectivamente, as componentes vertical e horizontal da intensidade do campo magnético no ponto de observação, expressas em oersteds; e A é o ângulo entre a alavanca do gravímetro e a direção do campo magnético.

Os valores dos coeficientes Q_Z e Q_H podem ser obtidos a partir de medidas efetuadas com o gravímetro no interior de uma bobina de Helmholtz.

A equação (3.11) mostra que a influência da componente horizontal do campo magnético depende da orientação do instrumento; portanto, considerando o campo geomagnético, tal influência pode ser eliminada, se o instrumento for orientado de modo que o azimuth magnético, A , da sua alavanca, seja igual a 90° ou 270° . Pode-se, também, compensar esta influência, fazendo-se leituras com o instrumento orientado segundo dois azimuths opostos. Entretanto, a redução da influência da componente horizontal, H , não implica que o mesmo ocorra com a influência da componente vertical, Z .

Na prática, procura-se reduzir a influência magnética a um valor negligenciável, de modo a se evitar a introdu-

ção da correção correspondente. Com este objetivo, todas as partes metálicas do gravímetro são submetidas à desmagnetização durante a sua montagem. Adicionalmente, os sistemas elásticos metálicos são providos de uma blindagem magnética, feita de material de fácil magnetização (v.g. permalloy), que reduz a influência dos campos externos. Entretanto, por não constituírem proteção totalmente segura e permanente, tais dispositivos devem ser complementados com testes periódicos, que comprovem e, caso necessário, restabeleçam a desmagnetização das partes ferromagnéticas.²⁴

3.5 — Influência da Inclinação

Da equação (3.3), considerando x , t e B constantes, resulta:

$$\frac{dg}{d\beta} = - \frac{g}{M} \frac{\partial M}{\partial \beta} \quad (3.12)$$

que é a expressão da dependência das leituras do gravímetro em relação à inclinação β . O ângulo β pode ser de duas naturezas:

- 1 — Referente à inclinação do eixo de rotação do sistema de medida em relação ao plano horizontal;
- 2 — Referente à inclinação do gravímetro em um plano vertical perpendicular ao eixo de rotação.

Seja M_0 o momento das forças externas que atuam sobre o sistema elástico, quando $\beta = 0$. Sujeitando-se, agora, o sistema a uma inclinação β , independentemente de sua natureza, o momento resultante será dado por:

$$M = M_0 \cos \beta \quad (3.13)$$

Derivando-se a (3.13) em relação a β , tem-se:

$$\frac{\partial M}{\partial \beta} = - M_0 \operatorname{sen} \beta \quad (3.14)$$

Substituindo as (3.13) e (3.14) na (3.12) e efetuando-se as simplificações cabíveis, resulta:

$$\frac{dg}{d\beta} = g \operatorname{tg} \beta$$

Como, na prática, $\beta < 1^\circ$, a $\operatorname{tg} \beta$ pode ser substituída por β , conduzindo a:

$$dg = g \cdot \beta \cdot d\beta$$

que integrando fornece:

$$\begin{pmatrix} g_1 \\ dg \\ g_0 \end{pmatrix} = g \begin{pmatrix} 0 \\ d\beta \\ \beta \end{pmatrix}$$

ou

$$g_1 - g_0 = \delta g = -g \frac{\beta^2}{2} \quad (3.15)$$

que é a equação de uma parábola cujo ápice corresponde ao ponto $\beta = 0$. O sinal negativo indica que qualquer inclinação se traduzirá numa diminuição acentuada da gravidade.

Como o erro de inclinação aumenta proporcionalmente ao quadrado do ângulo β , procura-se manter o gravímetro tanto quanto possível na posição horizontal. Com este objetivo, os instrumentos são equipados com dois níveis mutuamente perpendiculares, um transversal e outro longitudinal, conectados rigidamente à estrutura na qual o sistema elástico é montado. O nível transversal é situado paralelo ao eixo de rotação do sistema elástico, podendo ser nivelado por intermédio de dois parafusos calantes dispostos nesta direção. O nível longitudinal, paralelo ao plano que contém a alavanca do sistema de medidas, pode ser nivelado por um terceiro parafuso calante.

A eliminação da inclinação do instrumento é feita de tal modo que as bolhas estejam nos centros dos níveis quando $\beta = 0$. Para assegurar esta coincidência, é necessário proceder-se o ajuste periódico dos níveis.²⁷ O fabricante do instrumento fornece as instruções necessárias para se atingir este objetivo.

Assegurando-se o nivelamento do instrumento com erro inferior a 0,5', o erro nas leituras do gravímetro será de apenas 0,01 mGal.

3.6 — Deriva do Ponto-Zero

Dá-se o nome de deriva do ponto zero, ou simplesmente deriva, à variação lenta e contínua da posição do indicador do gravímetro com o tempo, sem que a gravidade tenha variado. Conseqüentemente, as leituras tomadas em um mesmo ponto em épocas diferentes serão discordantes. A variação deve-se ao fato de que os elementos elásticos do gravímetro, submetidos a um estado de tensão permanente, estão sujeitos à fadiga, sofrendo alterações gradativas nas

suas propriedades elásticas. A deriva depende, também, das condições externas à qual o instrumento é submetido, tais como: variações de temperatura, vibrações, impactos e muitos outros fatores.

O fabricante procura tornar a deriva o mais linear possível, dentro de certo intervalo de tempo, a fim de facilitar a sua correção. A taxa ou razão de deriva varia com o sistema e o material empregado no gravímetro, podendo ir de centésimos de miligal (v.g. gravímetro La Coste & Romberg) até alguns miligals por dia. Esta característica determina as condições, o método e o tipo de trabalho mais adequado a cada tipo de gravímetro. Um gravímetro com uma taxa de deriva grande é inadequado para o levantamento de uma rede de referência, embora possa ser suficientemente preciso para levantamentos de pequenas áreas.

É usual distinguir-se duas espécies de derivas:

a — Deriva estática.

Ocorre quando o instrumento está em repouso. Para sua determinação deve-se instalar o instrumento em local adequado e fazer leituras do micrômetro três a quatro vezes por dia em intervalos definidos, durante dois ou três dias, se o instrumento dispuser de controle termostático; caso contrário, o tempo de observação deve ser maior, a fim de se compensar a influência da variação de temperatura, considerada periódica em um dia.²⁸

b — Deriva dinâmica

Ocorre durante o transporte do instrumento. Nesta circunstância o gravímetro está sujeito a diversas acelerações que podem afetar o comportamento e a taxa da deriva. Portanto, deve-se evitar tanto quanto possível os movimentos bruscos, impactos e vibrações. Em²⁹ encontra-se uma pesquisa envolvendo o estudo de isoladores de vibrações aplicáveis à embalagem de transporte dos gravímetros La Coste & Romberg. O uso de embalagens especiais, providas de absorvedores de choques e isoladores de vibrações é essencial para o transporte do instrumento. Além disso, na estação de observação o aparelho deve ser mantido à sombra e protegido do vento.

A deriva do ponto zero determina em grande parte os procedimentos a serem seguidos nos levantamentos gravimétricos. Algumas organizações de renome internacional propuseram normas para execução destes levantamentos^{30, 31}, onde esses aspectos são considerados. As linhas gravimétricas, normalmente, iniciam e terminam na mesma estação ou em estações cujos valores de gravidade são conhecidos. Quando o levantamento deve ser paralisado, sem que a linha tenha sido fechada, faz-se uma série de feituas no início do período de imobilidade do ins-

trumento e outra no final desse período; a diferença entre os valores obtidos, corrigidos dos demais efeitos sistemáticos, é atribuída à deriva estática, devendo ser subtraída de todas as leituras posteriores da mesma linha. O erro de fechamento da linha é atribuído à deriva dinâmica, que é considerada linear com o tempo, e, desse modo, corrigida nas leituras das estações intermediárias. A diferença no tratamento das duas derivas, estáticas e dinâmica, justifica-se em função da mudança no estado do gravímetro. O comprimento da linha é definido em função do intervalo de tempo no qual a deriva pode ser considerada linear; isso depende do tipo de gravímetro usado e da acurácia desejada.

3.7 — Função de Calibração ou de Escala

Nas medidas gravimétricas, a uma determinada variação da gravidade corresponde uma variação de leitura do gravímetro, expressa em uma escala convencional, própria do instrumento (n° de voltas de um parafuso micrométrico). A determinação da correta relação entre aquela variação, em miligals, e a variação de leitura, em graduações da escala do instrumento, é conhecida como calibração. Esta relação, dependendo do tipo de gravímetro, pode ser linear (v.g. gravímetro Worden), ou não-linear (v.g. gravímetro La Coste & Romberg). No primeiro caso, representa-se por um único fator, que se aplica a toda a extensão da escala do instrumento; no segundo caso, representa-se por uma função do segundo ou maior grau, ou ainda uma função trigonométrica, sendo, então, determinadas constantes diferentes para intervalos definidos da escala.

Como um erro no fator ou função de calibração ou escala dá origem a um erro sistemático proporcional à variação da gravidade medida, é importante que a calibração seja bem acurada. Para tal, é utilizado um dos seguintes métodos:^{32, 33, 34 e 35}

- 1 — Observações entre estações com diferença de gravidade conhecida;
- 2 — Observações das variações de leitura com a inclinação do gravímetro; e
- 3 — Suspensão de carga adicional.

3.7.1 — Calibração entre Estações com Diferença de Gravidade Conhecida

Neste método o fator de escala e do gravímetro é determinado dividindo-se a diferença de gravidade conhecida, Δg , pela diferença de leituras correspondente, D

Assim,

$$c = \frac{\Delta g}{\Delta \ell} \quad (3.16)$$

A precisão da determinação do c com este método depende dos erros em Δg e $\Delta \ell$. Assim, considerando que não existe correlação entre Δg e $\Delta \ell$, é válida a seguinte equação:

$$\frac{\sigma_c^2}{c^2} = \frac{\sigma_{\Delta g}^2}{(\Delta g)^2} + \frac{\sigma_{\Delta \ell}^2}{(\Delta \ell)^2} \quad (3.17)$$

onde σ_c^2 é a variância do fator de escala; $\sigma_{\Delta g}^2$ é a variância do intervalo de gravidade padrão; e $\sigma_{\Delta \ell}^2$ é a variância da diferença de leitura. Conclui-se, portanto, que a determinação do fator de escala com um erro relativo da ordem de $1 \cdot 10^{-4}$, implica na medida do intervalo de gravidade Δg com um erro relativo pelo menos igual, considerando negligenciável o erro em $\Delta \ell$. Assim, se o intervalo de gravidade é conhecido com um desvio padrão de 0,05 mGal, sua magnitude deve ser no mínimo de 500 mGal.

Quando a escala do gravímetro não é linear, são necessários vários intervalos de gravidade conhecidos, a fim de se atingir toda a amplitude de leitura do instrumento. Para cada intervalo determina-se, então, um fator de escala, que se aplica ao intervalo de leituras correspondente. A função de calibração do gravímetro La Coste & Romberg é representada por uma tabela, cuja amplitude de leituras vai de 0 a 7000 unidades, dividida em intervalos de 100 unidades, para os quais o fabricante fornece os respectivos fatores de escala.

São notórias as dificuldades práticas deste método de calibração: viagens longas, a fim de serem obtidos intervalos de gravidade suficientemente grandes; gastos de tempo e recursos financeiros relativamente altos; e nem sempre são obtidos resultados compatíveis com a acurácia desejada. Devido a estas dificuldades, o método é utilizado principalmente para o controle da calibração efetuada por outros métodos, ou na impossibilidade da aplicação destes. Em³⁶ encontra-se publicada uma avaliação das funções de calibração de seis gravímetros La Coste & Romberg, utilizando o método das estações com diferença de gravidade conhecida.

3.7.2 — Calibração pelo Método de Inclinação

O método de calibração por inclinação se aplica aos gravímetros cujos sistemas elásticos são do tipo rotacional. O método baseia-se na influência da inclinação sobre as leituras gravimétricas, ou seja, inclinando-se o gravímetro de um pequeno ângulo β a partir de sua posição normal, a leitura diminuirá como se a gravidade fosse diminuída de acordo com a equação (3.15). Portanto, ao inclinar o gravímetro suas leituras serão expressas mediante a equação:

$$c \Delta \ell = c (\ell_1 - \ell_0) = -g \frac{\beta^2}{2} \quad (3.18)$$

onde ℓ_1 e ℓ_0 são as leituras com o gravímetro inclinado e como o gravímetro perfeitamente nivelado, respectivamente; assim,

$$c = -\frac{g}{\Delta\ell} \cdot \frac{\beta^2}{2} \quad (3.19)$$

Considerando a inexistência de correlação entre as variáveis do segundo membro, pode-se escrever:

$$\frac{\sigma_c^2}{c^2} = \frac{\sigma_g^2}{g^2} + \frac{4\sigma_\beta^2}{\beta^2} + \frac{\sigma_{\Delta\ell}^2}{(\Delta\ell)^2} \quad (3.20)$$

Decorre daí que, se o erro relativo na calibração deve ser da ordem de $1 \cdot 10^4$, o valor de g deve ser conhecido com um erro máximo de 100 mGal, o que é sempre possível. O erro relativo máximo tolerável na medida do ângulo β deve ser duas vezes menor do que o erro de calibração, ou seja:

$$\frac{\sigma_\beta}{\beta} = \frac{1}{2} \frac{\sigma_c}{c}$$

Para uma inclinação de 1° , o erro máximo em β deve ser $\sigma_\beta = 0,18''$, para assegurar uma calibração com erro relativo da ordem de $1 \cdot 10^{-4}$. Neste caso, a redução aparente na gravidade, dada pela equação (3.18), considerando $g = 979$ Gal, será de 149 mGal.

Para uma variação de leitura da ordem de 100 mGal, o erro de leitura máxima deve ser de 0,01 mGal, para assegurar a acurácia preconizada. O gravímetro La Coste & Romberg, segundo o fabricante¹¹, possui esta exatidão de leitura.

Para a execução deste método de calibração são usadas pranchas reclináveis, ou os próprios parafusos calantes do instrumento, sendo o ângulo β medido diretamente no limbo vertical de um teodolito, ou deduzido em função do passo do parafuso e do número de voltas efetuadas durante a inclinação,^{37, 38, 39}

Com este método um gravímetro pode ser calibrado em toda a extensão de sua escala, sem a necessidade de ser transportado de uma estação para outra. Entretanto, a medição do ângulo de inclinação deve ser feita com muito cuidado, a fim de que se possa obter a exatidão necessária.

3.7.3 Calibração por Suspensão de Carga Adicional

Este método baseia-se no efeito produzido pelo aumento da massa móvel do sistema elástico sobre as leituras do gravímetro. Conhecendo-se o valor do incremento de mas-

sa é fácil calcular o peso adicional e a correspondente variação aparente da gravidade. Assim, se Δm é o incremento de massa, o peso adicional será:

$$\delta p = g\Delta m$$

Considerando, agora, a massa m constante, a mesma variação no peso seria observada em presença de uma variação da gravidade equivalente, Δg . Deste modo,

$$\delta p = g\Delta m = \Delta g m,$$

e a variação aparente da gravidade em função da adição de massa é dada por:

$$\Delta g = g \frac{\Delta m}{m}$$

Como $\Delta g = c(\ell_1 - \ell_0)$, resulta:

$$c = \frac{g}{\ell_1 - \ell_0} \cdot \frac{\Delta m}{m} = \frac{g}{\Delta\ell} \cdot \frac{\Delta m}{m}$$

Este método é aplicável somente aos gravímetros que possuem dispositivos especiais que permitem a suspensão das massas adicionais, além disso requer muita exatidão no conhecimento de tais massas e da distância do seu ponto de suspensão ao eixo de rotação do sistema.⁴⁰

Notas de Referências

- ⁰¹SHOKIN, P.F. *Gravimetry* (apparatus and methods for measuring gravity). Jerusalem, Israel Program for Scientific Translations, 1963, p. 143-144.
- ⁰²PARASNIS, D.S. *Principles of Applied Geophysics*, London, Chapman and Hall Ltd., 1972, p. 39.
- ⁰³MELCHIOR, P. *Physique et dynamique planétaires*. Louvain, Vander, 1971, v.2. p. 83-89.
- ⁰⁴SAZHINA, N. & GRUSHINSKY, N. *Gravity Prospecting*. Moscow, Mir Publishers, 1971, p. 229.
- ⁰⁵MELCHIOR, P., p. 77.
- ⁰⁶SAZHINA, N. & GRUSHINSKY, N., p. 183.
- ⁰⁷Ibid., p. 207.
- ⁰⁸SHOKIN, P.F., p. 241.
- ⁰⁹DEHLINGER, P. *Marine Gravity*, Amsterdam, Elsevier Scientific publishing Company, 1978, p. 107.

- ¹⁰ROSIER, F.A. *Medidas Diferenciais da Gravidade: Ajustamento de uma Sub-Rede de Estações Gravimétricas e Determinação de Coeficientes de Escala para os Gravímetros La Coste & Romberg Modelo G N^{os} 41, 372 e 454*, Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 1979, p. 15-16.
- ¹¹LA COSTE & ROMBERG, INC. *Instruction Manual for La Coste & Romberg, Inc. model G land gravity meter n.º 674*. Austin, s.d. Não paginado.
- ¹²MIRONÓV, V.S. *Curso de Prospección Gravimétrica*. Barcelona, Reverté, 1977. p. 118.
- ¹³Ibid., p. 130.
- ¹⁴Ibid., p. 131.
- ¹⁵Ibid., p. 134.
- ¹⁶SHOKIN, P.F., p. 161.
- ¹⁷SAZHINA, N. & GRUSHINSKY, N., p. 252.
- ¹⁸Ibid., p. 238.
- ¹⁹SHOKIN, P.F., p. 162.
- ²⁰Ibid., p. 166.
- ²¹MIRONÓV, V.S., p. 137.
- ²²PICK, M. et alii. *Theory of the earth's gravity field*, Amsterdam, Elsevier, 1973. p. 144.
- ²³SAZHINA, N. & GRUSHINSKY, N., p. 245.
- ²⁴SHOKIN, P.F., p. 172.
- ²⁵PICK, M. et alii, p. 145.
- ²⁶MIRONÓV, V.S., P. 142.
- ²⁷SAZHINA, N. & GRUSHINSKY, N., p. 250-252.
- ²⁸Ibid., p. 249.
- ²⁹HAMILTON, A.C. & BRULÉ, B.G. Vibration-induced drift in La Coste and Romberg geodetic gravimeters. *Journal of Geophysical Research*, 72(8): 2187-2197, 1967.
- ³⁰ESTADOS UNIDOS. Defense Mapping Agency Topographic Center. *General land gravity survey instructions*. s. 1., 1974.
- ³¹KOZLOSKY, J.A. & ZIEGLER, R.E., *Standards of precision and operating methods for modern gravity surveys*, U.S. Army Topographic Command, 1969.
- ³²SHOKIN, P.F., p. 187.
- ³³MIRONÓV, V.S., p. 148.
- ³⁴PICK, M. et alii, p. 147.
- ³⁵SAZHINA, N. & GRUSHINSKY, N., p. 342.
- ³⁶McCONNELL, R.K. et alii. *An evaluation of six La Coste and Romberg gravimeters for use on the Latin American Primary Gravity Net*, Earth Physics Branch, Ottawa, Servicio de Hidrografia Naval, Buenos Aires, Hawaii Institute of Geophysics, Honolulu, 1972.
- ³⁷MIRONÓV, V.S., p. 150-152.
- ³⁸SHOKIN, P.F., p. 189-198.
- ³⁹SAZHINA, N. & GRUSHINSKY, N., p. 344-348.
- ⁴⁰SHOKIN, P.F., p. 187-188.

Referências Bibliográficas

01. DEHLINGER, P. *Marine Gravity*, Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company, 1978. 322 p.
02. ESTADOS UNIDOS. Defense Mapping Agency Topographic Center. *General land gravity survey instructions*. s.1., 1974. 50 p.
03. HAMILTON, A.C. & BRULÉ, B.G. Vibration-induced drift in La Coste & Romberg geodetic gravimeters. *Journal of Geophysical Research*, Richmond, 72(8): 2187-2197, 1967.
04. KOZLOSKY, J.A. & ZIEGLER, R.E., *Standards of precision and operating methods for modern gravity surveys*, Army Topographic Command, 1969. 10 p.
05. LA COSTE & ROMBERG, INC. *Instruction manual for La Coste & Romberg, Inc. model G gravity land gravity meter n.º 674*. Austin, s.d. Não paginado.
06. McCONNEL, R.K. et alii. *An evaluation of six La Coste and Romberg gravimeters for use on the Latin American Primary Gravity Net*, Earth Physics Branch, Ottawa, Servicio de Hidrografia Naval, Buenos Aires, Hawaii Institute of Geophysics, Honolulu, 1972, 26 p.
07. MELCHIOR, P. *Physique et dynamique planétaires*. Louvain Vanden, 1971, v. 2.
08. MIRONÓV, V.S. *Curso de Prospección Gravimétrica*. Barcelona, Reverté, 1977. 525 p.
09. PARASNIS, D.S. *Principles of Applied Geophysics*, London, Chapman and Hall Ltd., 1972. 214 p.
10. PICK, M. et alii *Theory of the earth's gravity field*. Amsterdam, Elsevier, 1973. 538 p.
11. ROSIER, F.A. *Medidas Diferenciais da Gravidade: Ajustamento de uma Sub-Rede de Estações Gravimétricas e Determinação de Coeficientes de Escala para os Gravímetros La Coste & Romberg Modelo G N^{os} 41, 372 e 454*, Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 1979. 190 p.
12. SAZHINA, N. & GRUSHINSKY, N. *Gravity prospecting*. Moscow, Mir Publishers, 1971. 491 p.
13. SHOKIN, P.F. *Gravimetry (apparatus and methods for measuring gravity)*. Jerusalém, Israel program for Scientific Translations, 1963. 232 p.