



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOFÍSICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

ALEXANDRE SODRÉ FERNANDES

**UMA PROPOSTA PARA UM CAMPO DE TESTES PARA O ENSINO DE
GRAVIMETRIA.**

Belém – Pará
2010

ALEXANDRE SODRÉ FERNANDES

**PROPOSTA PARA UM CAMPO DE TESTES PARA O ENSINO DE
GRAVIMETRIA.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Geofísica do Instituto de
Geociências da Universidade Federal do Pará -
UFPA, em cumprimento às exigências para
obtenção de Bacharel em Geofísica.
Orientador: Cícero Roberto Teixeira Régis

Belém - Pará
2010

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca Geólogo Raimundo Montenegro Garcia de Montalvão

F363p Fernandes, Alexandre Sodré

Proposta para um campo de testes para o ensino de gravimetria /
Alexandre Sodré Fernandes; Orientador: Cícero Roberto Teixeira
Régis – 2010

36 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geofísica) –
Faculdade de Geofísica, Instituto de Geociências, Universidade
Federal do Pará, Belém, Quarto Período de 2010.

1. Gravidade (Física). 2. Ensino do método gravimétrico. 3.
Sítio de testes controlado. 4. Poço cilíndrico escavado. I. Régis,
Cícero Roberto Teixeira, *orient.* II. Universidade Federal do Pará.
III. Título.

CDD 20° ed.: 531.14

ALEXANDRE SODRÉ FERNANDES

**UMA PROPOSTA PARA UM CAMPO DE TESTES PARA O ENSINO DE
GRAVIMETRIA.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará - UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção de Bacharel em Geofísica.

Data de Aprovação: ____ / ____ / ____

Banca Examinadora

Prof. Cícero Roberto Teixeira Régis - Orientador
Doutor em Geofísica
UFPA

Prof. José Gouvêa Luiz - Membro
Doutor em Geofísica
UFPA

Prof. Alberto Leandro de Melo - Membro
Mestre em Geofísica
UFPA

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado força, coragem e determinação para transpassar barreiras e dificuldades, conquistar meus objetivos, tudo por que tenho fé em ti senhor.

Agradeço à minha mãe Maria Sodré, pelos anos que trabalhou duro para me dar condições de estudar e alcançar meu ensino superior. Amo você mãe! Ao meu irmão Junior Almeida, desejo que você siga os mesmos passos, e que você seja, além desse homem grande, um grande homem. Sucesso e felicidade na sua vida meu irmão! Agradeço à minha vó Luzia Sodré, apesar de saber que ela não está mais aqui, ainda a levo comigo.

Agradeço pelo companheirismo, amor e afeto da minha noiva e futura engenheira de minas Jéssica (JéKa). Que essa nossa linda história seja eterna, e que o amor e o sucesso nos acompanhe durante toda a vida.

Agradeço ao Corpo de Bombeiros Militar do Pará, especificamente, ao 2º Grupamento de Busca e Salvamento/Grupamento de Socorro de Emergência, por me proporcionar a concessão para que pudesse estudar. Desejo que o apoio ao estudo continue, porque assim podemos construir uma corporação forte e obter moral para conquistar nossos objetivos.

Agradeço aos professores Cícero Regis, Alberto Leandro, José Gouvêa e ao técnico em geofísica Paulo Magalhães, pelo apoio e por não mediram esforços para a realização desse trabalho.

E finalmente agradeço à verdadeira amizade de amigos irmãos que conquistei durante o curso. Eles são: Thiago Rosa (Pedro de Lara), Gelbson Moreira (cintura de moça), Davison Calado (Michael Jackson).

RESUMO

Este trabalho propõe uma ferramenta para o ensino do método gravimétrico na forma de um sítio de testes controlado para a realização de medidas gravimétricas sobre um poço cavado no solo. Calculamos o campo gravimétrico devido a um cilindro e usamos este cálculo para modelar um levantamento gravimétrico sobre um poço vazio. Tal sítio pode ser empregado nas aulas de gravimetria da Faculdade de Geofísica da UFPA, em trabalhos que incluem a necessidade dos estudantes realizarem o levantamento, o processamento dos dados, com correções gravimétricas e a interpretação.

Palavras-chave: Gravidade (Física). Ensino do método gravimétrico. Sítio de testes controlado. Poço cilíndrico escavado.

ABSTRACT

This paper propose a tool to the teaching of the gravimetric method in the form of a controlled test site to the realization of gravimetrics measurements over a cylindrical well dug in the soil. We have calculated the gravimetric field due a cylinder and we used this calculation to model a gravimetric survey over an empty well. The site can be used at gravimetry classes in the faculty of Geophysics of UFPA, in a work in which the students would perform the survey, the gravimetric corrections and the interpretations.

Keywords: Gravity (physics).Teaching of the gravimetric method. Controlled test site. Cylindrical well dug.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representações das acelerações na superfície do planeta.	13
Figura 2 – Representação da correção de latitude (C_L). Em que θ_0 é a latitude da estação de referência. A C_L é subtraída das medidas quando são feitas mais próximo do pólo, em relação à estação de referência, e somada nas medidas quando são feitas mais próximo do equador, em relação à estação de referência.	15
Figura 3 – Representação da correção de ar-livre ou de altura (C_{AL}). A C_{AL} é somada nas medidas feitas em estações acima do nível de referência, e é subtraída das medidas feitas abaixo do nível da estação base.	16
Figura 4 – Representação da correção Bouguer (C_B). A C_B é adicionada ao valor normal da gravidade para eliminar o efeito da massa existente entre o ponto de medida e o nível da estação base ou o geóide.	17
Figura 5 – Representação esquemática ilustrando o efeito da topografia na variação do valor das medidas de gravidade.	17
Figura 6 – Representação esquemática ilustrando o efeito da perturbação no valor da gravidade devido a posição relativa da terra em relação ao sol e a lua. Essa perturbações atingem 0,3 mGal, e devem ser eliminadas, pois uma anomalia com essa magnitude pode ser confundida com anomalias comuns em prospecção geológica.	18
Figura 7 – O gráfico ilustra o efeito de maré. Os valores foram calculados em Belém do Pará, Brasil, para 24h, a partir das 16h28min do dia 01/12/2010, na latitude -1.48S, longitude -48.45W, local do levantamento gravimétrico discutido no capítulo 4 deste tcc.	18
Figura 8 – Gráfico mostrando o efeito do <i>drift</i> instrumental. A fadiga da mola causa uma variação aproximadamente linear no valor da gravidade.	19
Figura 9 – Procedimento para medidas do valor de gravidade em larga escala mostrando a reocupação para a correção de drift instrumental.	20
Figura 10 – Funcionamento interno do gravímetro LaCoste & Romberg.	21
Figura 11 – Esquema ilustrando o modelo sobre o qual são calculados os valores de aceleração da gravidade.	22
Figura 12 – Anomalia negativa devido ao poço com $R = 1$ m, $L = 2$ m e contraste de densidade $\Delta\rho = -1.5 \text{ g.cm}^{-3}$	25
Figura 13 – Anomalia negativa devido ao poço com $R = 1$ m, $L = 3$ m e contraste de densidade $\Delta\rho = -1.5 \text{ g.cm}^{-3}$	25
Figura 14 – Anomalia negativa devido ao poço com $R = 1,5$ m, $L = 2$ m e contraste de densidade $\Delta\rho = -1.5 \text{ g.cm}^{-3}$	26
Figura 15 - Anomalia positiva devido ao poço com $R = 1,5$ m, $L = 2$ m e contraste de densidade $\Delta\rho = 1.5 \text{ g.cm}^{-3}$	26
Figura 16 – Imagem ilustrando a localização do poço da UFPA.	28
Figura 17 – Modelo esquemático ilustrando o levantamento sobre o poço da UFPA.	29
Figura 18– Drift instrumental no levantamento sobre o poço da UFPA.	31
Figura 19– Comparação entre a anomalia devido ao poço real e a anomalia calculada no modelo computacional com os parâmetros do poço real ($R=1,5\text{m}$; $p=0,05\text{m}$; $L=1.6\text{m}$; $\rho=1.75\text{g.cm}^{-3}$). A variação de 0,06 mGal é igual na anomalia devido ao poço, e no modelo.	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Densidade do solo. Variação e média de densidade em poros com fluido e sem fluido. (Luiz; Silva,1995).	20
Tabela 2: Detalhes do levantamento como ordem e localização das estações, horário da aquisição das medidas e medida no dial (contador) do gravímetro.....	30
Tabela 3: Média dos horários e das medidas do dial, a conversão das medidas em mGal, as correções de drift e o valor corrigido.....	30

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
2	O MÉTODO GRAVIMÉTRICO	12
2.1	LEI DA GRAVITAÇÃO UNIVERSAL.....	12
2.2.	ACELERAÇÃO DA GRAVIDADE NA SUPERFÍCIE DA TERRA	13
2.3	CORREÇÕES DOS DADOS GRAVIMÉTRICOS	14
2.3.1	Correção de Latitude.....	15
2.3.2	Correção de elevação (Ar-Livre)	16
2.3.3.	Correção Bouguer	16
2.3.4	Correção topográfica ou de terreno	17
2.3.5	Correção de maré (C_M)	18
2.3.6	Correção de <i>drift</i> instrumental	19
2.4	DENSIDADE DO SOLO	20
2.5	O GRAVÍMETRO	21
2.5.1	O Gravímetro Lacoste & Romberg.....	21
3	MODELAGEM DO SÍTIO DE TESTES CONTROLADO DE GRAVIMETRIA	22
3.1	CÁLCULO DO CAMPO DE UM CILINDRO.....	22
3.2	RESULTADOS PARA O MODELO PROPOSTO.....	24
3.6	PROCEDIMENTOS PARA O TRABALHO SOBRE O MODELO PROPOSTO.....	27
4.1	CORREÇÕES DOS DADOS	30
4.2	PLOTAGEM DOS DADOS CORRIGIDOS.....	32
5	CONCLUSÃO: A PROPOSTA DO CIRCUITO GRAVIMÉTRICO	33
	REFERÊNCIAS.....	36

1 INTRODUÇÃO

O ensino de gravimetria, dentro do contexto geral do ensino dos métodos geofísicos, engloba dois aspectos fundamentais para a formação do profissional da Geofísica: o desenvolvimento teórico sobre o método, baseado no estudo do campo gravitacional e dos campos potenciais em geral; e o aprendizado dos aspectos práticos relativos à aquisição, ao processamento e à interpretação de dados gravimétricos.

As dificuldades para realizar medidas de dados gravimétricos para fins de aprendizagem aparecem principalmente por causa do nível do sinal das anomalias que podem ser medidas com um gravímetro. Para realizar um levantamento em que variações do campo gravimétrico sejam mensuráveis é preciso trabalhar sobre uma distribuição de massa anômala grande para ser observável na faixa de resolução do gravímetro, de forma que os dados gerados mostrem claramente uma anomalia passível de ser interpretada. Em geral, isso significa um trabalho de campo extenso e difícil, sendo necessário transportar o equipamento e uma turma de estudantes para um local do qual se conheça previamente a distribuição do campo gravimétrico e suas fontes geológicas, de modo que se possa trabalhar desde a aquisição até a interpretação dos dados.

Para a formação dos estudantes é necessário e importante o trabalho de campo o mais próximo possível do que poderá ser encontrado no exercício de sua profissão, pois os alunos ainda estão se familiarizando com a técnica e com os aspectos teóricos, em um primeiro contato com o método gravimétrico. Pode ser útil um levantamento gravimétrico em um ambiente controlado, sem a necessidade de grandes deslocamentos e no qual a fonte do campo gravimétrico anômalo seja totalmente conhecida. Um levantamento nestas condições permite ao professor explorar vários aspectos do processamento e da interpretação dos dados, tendo como objetivo identificar um alvo do qual são conhecidos todos os detalhes.

Este Trabalho de Conclusão de Curso propõe a construção de um modelo de campo de teste para o ensino de gravimetria, na forma de um poço cilíndrico vazio, coberto por uma laje de concreto para permitir medidas gravimétricas na sua superfície.

No capítulo 2 apresentarei um resumo sobre o método gravimétrico, incluindo as correções necessárias nos dados coletados em um levantamento; no capítulo 3 desenvolverei o cálculo do campo gravimétrico do cilindro, necessário para modelar um levantamento sobre o poço proposto e mostrarei a intensidade do campo gravimétrico esperado sobre esta estrutura e discutirei quais os aspectos que podem ser explorados em um levantamento sobre o modelo

proposto e quais os tipos de correções nos dados podem ser trabalhadas em tal levantamento. O capítulo 4 traz o levantamento gravimétrico sobre o poço cilíndrico na UFPA; O capítulo 5 traz a conclusão com a proposta do circuito gravimétrico.

2 O MÉTODO GRAVIMÉTRICO

2.1 LEI DA GRAVITAÇÃO UNIVERSAL

A força de atração entre duas massas m_1 e m_2 , separadas pela distância r entre seus centros de massa tem módulo igual a

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

Em que G é a constante de gravitação universal de valor igual a $6,67428 \times 10^{-11} \text{N m}^2/\text{kg}^2$ no MKS. Através de segunda lei de Newton encontramos a aceleração com que a massa m_1 atrai m_2 .

$$a_2 = G \frac{m_1}{r^2} \quad (2)$$

Corpos esféricos, de densidade uniforme, atraem corpos que estão fora deles como se toda sua massa estivesse concentrada no seu centro. Tomando a massa da terra igual a M ($5,972 \times 10^{24}$ kg) e seu raio médio R (6.400km), a aceleração produzida em um corpo que está as proximidades da superfície terrestre é igual a

$$g = G \frac{M}{R^2} \quad (3)$$

A lei de atração gravitacional como escrita acima é válida para partículas diminutas comparadas a distância que as separa ou para corpos esféricos homogêneos ou, pelo menos, com uma distribuição de densidade que varia apenas radialmente. No caso mais geral, o campo gravitacional gerado por um corpo qualquer é a soma dos efeitos de cada elemento infinitesimal da massa distribuída por todo o volume do corpo. Assim

$$a = G \int_V \frac{dm}{r^2} = G \int_V \frac{\rho(r') dV}{r^2} \quad (4)$$

Em que ρ é uma função que descreve a densidade do corpo e r' é a coordenada radial no interior do corpo.

2.2. ACELERAÇÃO DA GRAVIDADE NA SUPERFÍCIE DA TERRA

A Terra executa o movimento de rotação, conseqüentemente uma medida do campo gravitacional em sua superfície está sujeita a uma força centrífuga dependente do raio de rotação l e da velocidade angular ω e agindo na direção radial em relação ao eixo de rotação do planeta. A aceleração centrífuga ligada a esta força é $a_c = \omega^2 l$, de forma que a componente vertical (ou seja, na direção do raio terrestre) da aceleração resultante na superfície é calculada por:

$$g = G \int_V \frac{dm}{R^2} - \omega^2 l \cos(\theta) \quad (5)$$

Nesta expressão, θ é a latitude em que o corpo está localizado. O raio de rotação l atinge seu máximo no equador e zero nos pólos (Figura 1).

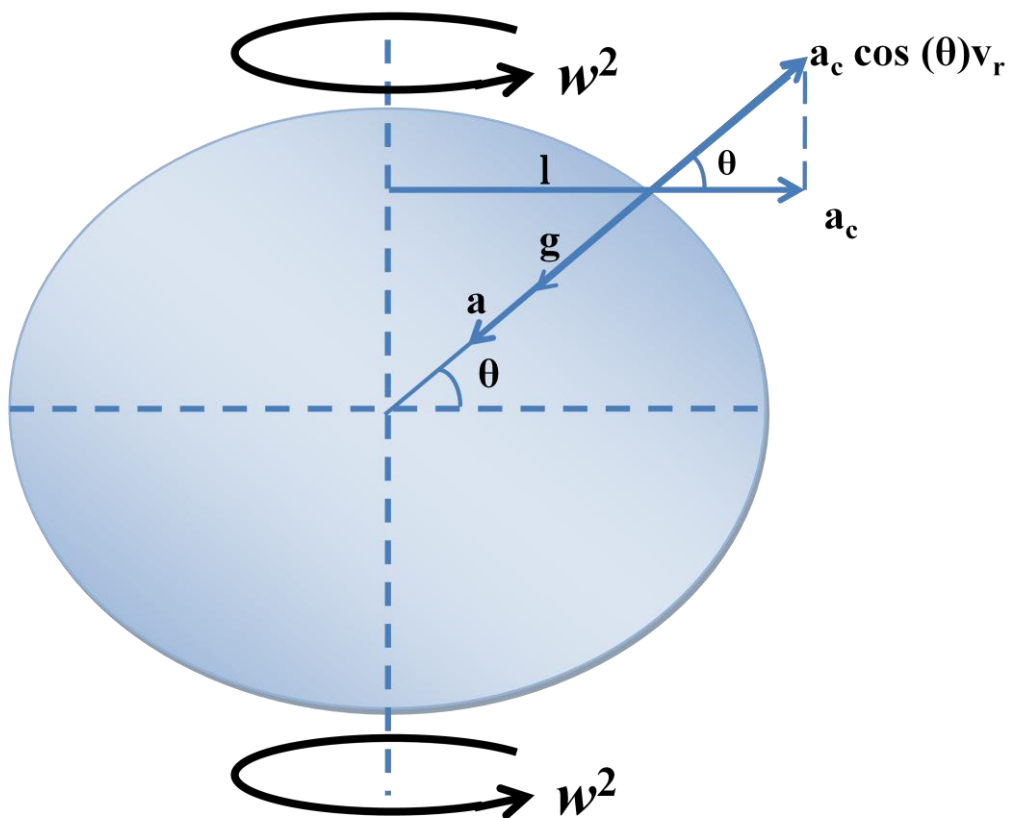


Figura 1 – Representações das acelerações na superfície do planeta.

A unidade usualmente empregada na gravimetria para representar a aceleração da gravidade é o *Gal* que corresponde a 10^{-2} m/s^2 . Comumente os valores de levantamentos gravimétricos são expressos em miligal (*mGal*, ou 10^{-5} m/s^2), ou até mesmo, microgal (*μGal*, ou 10^{-8} m/s^2).

O valor normal da gravidade é calculado através da fórmula GRS-67 (Geodetic Reference System - 1967) adotada pela União internacional de Geodésia e Gravimetria (LUIZ; SILVA, 1995). A fórmula que nos fornece o valor da gravidade em qualquer latitude, em *gal*, é:

$$g = 978,03146(1 + 0,005278895 \sin^2 \theta + 0,000023462 \sin^4 \theta) \quad (6)$$

A fórmula (6) pressupõe que o planeta tem apenas variação radial em sua densidade. Entretanto, a crosta terrestre está longe de ser uniforme e as variações laterais de densidade devidas às estruturas geológicas formadas por vários diferentes tipos de rochas provocam desvios mensuráveis nos valores da aceleração da gravidade medidos na superfície em relação àqueles calculados pelas fórmulas (6). Estas variações de densidade são as fontes do sinal medido no gravímetro.

2.3 CORREÇÕES DOS DADOS GRAVIMÉTRICOS

O valor local da aceleração da gravidade varia com a latitude, elevação do terreno, topografia regional, atração devida ao Sol e à Lua (marés), alterações no funcionamento do instrumento de medida e a variação de densidade em subsuperfície. Na prospecção geofísica queremos que os valores de gravidade em levantamentos gravimétricos estejam relacionados somente a variações de densidade, pois são elas que trazem informação sobre as estruturas geológicas sob a superfície. Então, para eliminar os demais efeitos que influenciam as medidas, aplicamos as seguintes correções sobre os valores medidos:

- Correção de latitude
- Correção de elevação (ar-livre)
- Correção Bouguer
- Correção topográfica ou de terreno
- Correção de maré
- Correção de *drift* instrumental

A seguir farei uma breve descrição de cada uma dessas correções, a partir do que é descrito em Luiz e Silva (1995).

2.3.1 Correção de Latitude

Medidas de gravidade em latitudes diferentes não podem ser comparadas diretamente, pois o valor da gravidade aumenta do equador em direção aos pólos. A correção de latitude consiste em estabelecer uma latitude de referência para que todas as medidas realizadas em outras latitudes sejam ajustadas como se estivessem sido medidas na latitude de referência. Vale ressaltar que a correção de latitude é aplicada quando a distância entre a estação de referência e as demais estações for inferior a 10 km. A expressão da correção de latitude é a seguinte:

$$C_L = 0,81 \sin 2\theta \text{ mGal/km} \quad (7)$$

Em que θ é a latitude. A correção deve ser soma no valor de gravidade normal, calculada na latitude de referência, quando as medidas forem realizadas mais próximas do equador que a latitude de referência, e subtraída quando forem feitas medidas mais próximas dos pólos do que a latitude de referência.

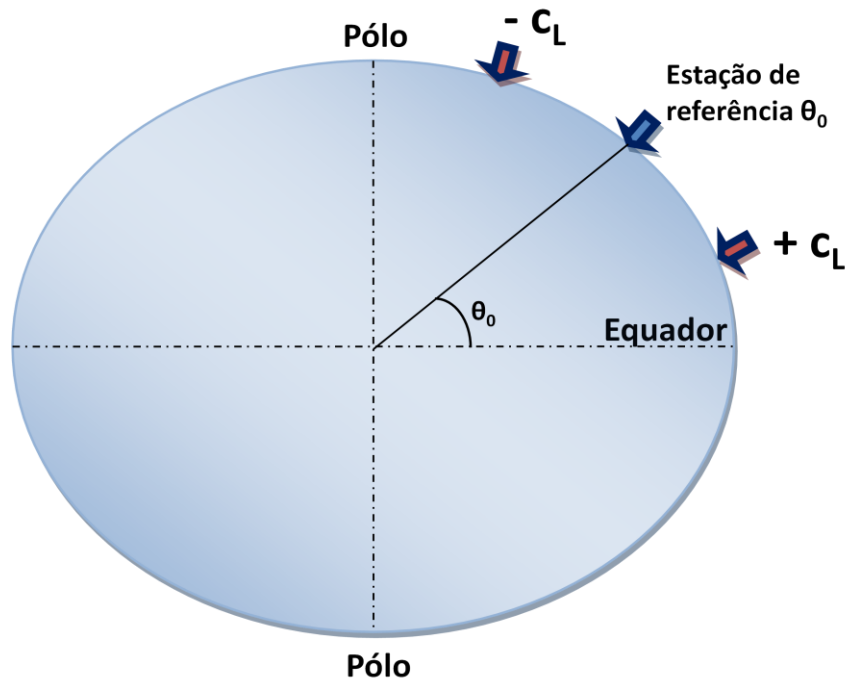


Figura 2 – Representação da correção de latitude (C_L). Em que θ_0 é a latitude da estação de referência. A C_L é subtraída das medidas quando são feitas mais próximo do pólo, em relação à estação de referência, e somada nas medidas quando são feitas mais próximo do equador, em relação à estação de referência.

2.3.2 Correção de elevação (Ar-Livre)

As medidas de gravidade realizadas em altitudes diferentes devem ser reduzidas a um nível de referência ou em relação ao geóide (nível do mar) para compensar os efeitos que a altitude provoca no valor normal da gravidade. A correção de ar-livre faz com que as medidas sejam transportadas para a mesma altura em relação ao nível de referência, ou seja, como se todas as medidas fossem realizadas na mesma altitude. A correção de ar livre tem este nome por que não é considerada a massa existente entre o geóide ou o nível de referência e o ponto de medida. A expressão da correção de ar-livre é a seguinte:

$$C_{AL} = 0,3086 h \text{ mGal} \quad (8)$$

Em que h é a diferença entre a altitude em que foi efetuada a medida e aquela de referência ou o geóide.

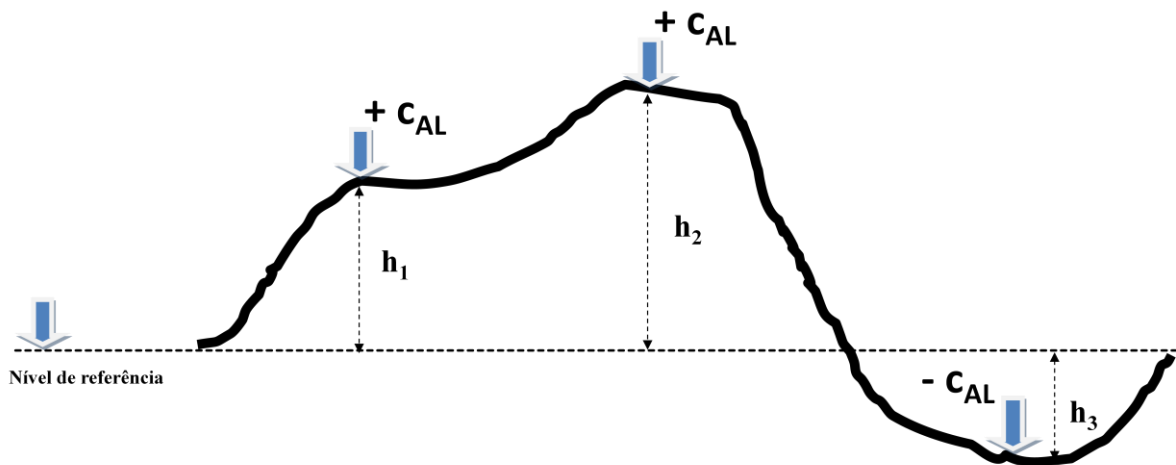


Figura 3 – Representação da correção de ar-livre ou de altura (C_{AL}). A C_{AL} é somada nas medidas feitas em estações acima do nível de referência, e é subtraída das medidas feitas abaixo do nível da estação base.

2.3.3. Correção Bouguer

A correção Bouguer consiste em eliminar o efeito da massa existente entre o ponto de medida e o geóide. Esta correção adiciona, ao valor normal da gravidade, a atração de um cilindro de raio infinito de altitude igual à altitude do ponto de medida e densidade ρ , igual à densidade da rocha entre o ponto de medida e o geóide (se existir algum corpo mineralizado entre a estação de medida e o geóide usa-se a densidade da rocha encaixante). A expressão da correção Bouguer é a seguinte:

$$C_B = 0,04191 \rho h \text{ mGal} \quad (9)$$

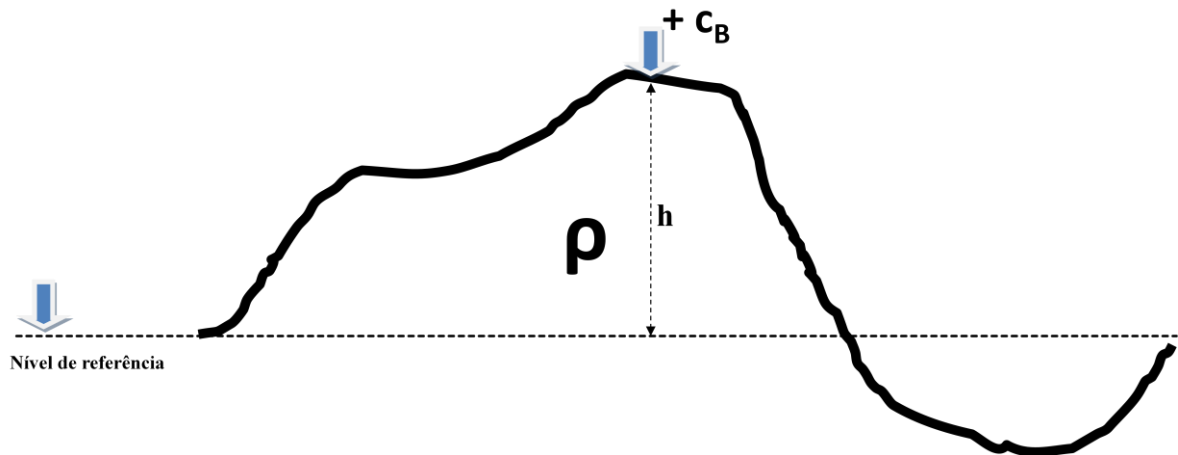


Figura 4 – Representação da correção Bouguer (C_B). A C_B é adicionada ao valor normal da gravidade para eliminar o efeito da massa existente entre o ponto de medida e o nível da estação base ou o geóide.

2.3.4 Correção topográfica ou de terreno

A correção topográfica (Figura 5) compensa a correção Bouguer, pois quando a correção Bouguer é aplicada simula-se a retirada de massa acima do ponto de medida e nos vales adiciona-se massa, tudo para que o nível de medidas da gravidade seja elevado à altitude do terreno. Porém na realidade nas cotas acima do ponto de medida essa massa ainda existe e a contribuição da componente vertical, oposta a componente principal \vec{g} , provocada por essa massa reduz o valor da gravidade medida no ponto. Esse efeito deve ser somado ao valor da gravidade medida no terreno. Nos vales supostamente adiciona-se massa onde na realidade ela não existe e o efeito dessa massa deve ser também somado ao valor medido no terreno. Quando o terreno é pouco desnivelado essa correção pode ser desprezada.

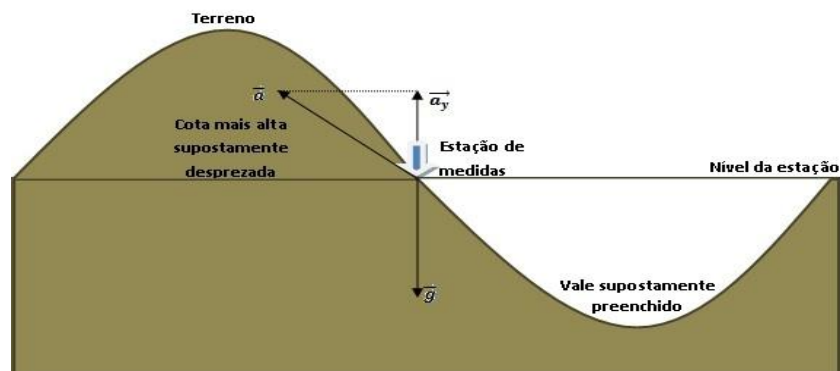


Figura 5 – Representação esquemática ilustrando o efeito da topografia na variação do valor das medidas de gravidade.

2.3.5 Correção de maré (C_M)

A posição da Terra em relação ao Sol e à Lua causa perturbações no valor normal da gravidade com amplitudes máximas pico-a-pico inferior de 0,3 mGal, e devem ser eliminadas, pois uma anomalia com essa magnitude pode ser confundida e até mascarar anomalias comuns em prospecção geológica. Essas perturbações podem ser calculadas através das fórmulas matemáticas (LONGMAN, 1959), e para facilitar a C_M , as perturbações estão pré-calculadas em tabelas para cada minuto, dia do ano e em qualquer posição geográfica. A C_M é calculada também por programas computacionais, como **Tide Correction Utility** disponibilizado no site MEG SYSTEMS LTD.

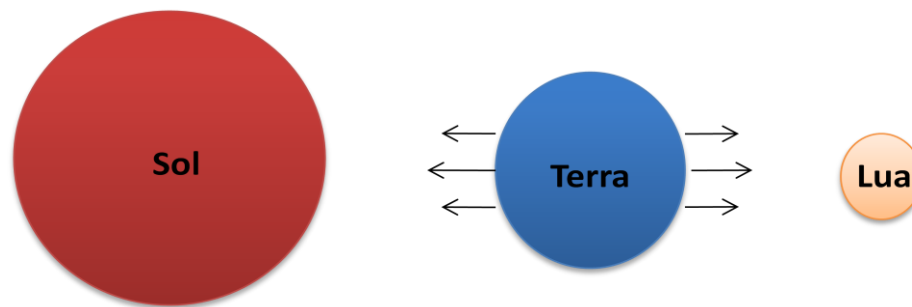


Figura 6 – Representação esquemática ilustrando o efeito da perturbação no valor da gravidade devido a posição relativa da terra em relação ao sol e a lua. Essa perturbações atingem 0,3 mGal, e devem ser eliminadas, pois uma anomalia com essa magnitude pode ser confundida com anomalias comuns em prospecção geológica.

Para levantamentos em pequena escala a C_M é corrigida está incorporada a correção de *drift* instrumental.

Efeito de maré

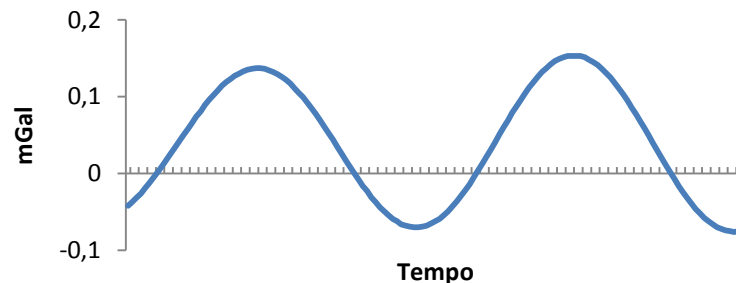


Figura 7 – O gráfico ilustra o efeito de maré. Os valores foram calculados em Belém do Pará, Brasil, para 24h, a partir das 16h28min do dia 01/12/2010, na latitude -1.48S, longitude -48.45W, local do levantamento gravimétrico discutido no capítulo 4 deste tcc.

2.3.6 Correção de *drift* instrumental

Na realização de medidas gravimétricas verifica-se que mesmo após a correção de maré ainda persiste uma variação aproximadamente linear (Figura 8) do valor de gravidade, o *drift* instrumental. O *drift* instrumental é uma variação do ponto de ajuste interno ao instrumento de medida causada por fadiga na mola depois de inúmeras medições. Mudança de temperatura e choques mecânicos no instrumento de medida também causa *drift* instrumental, porém não linear.

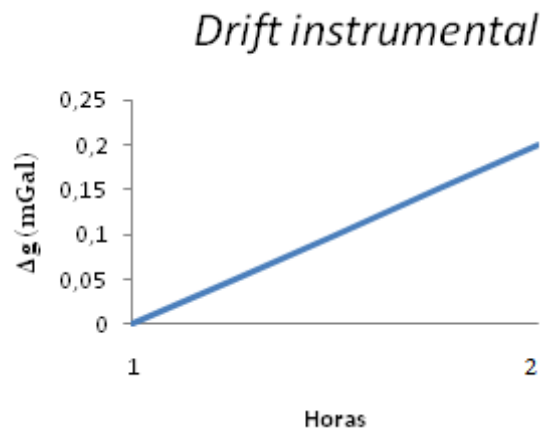


Figura 8 – Gráfico mostrando o efeito do *drift* instrumental. A fadiga da mola causa uma variação aproximadamente linear no valor da gravidade.

Se fizermos duas medidas em tempos diferentes na mesma estação podemos estimar a correção que deve ser aplicada. Se a variação instrumental for positiva, devemos subtrair do valor da gravidade medido, se for negativa devemos somar ao valor da gravidade.

Chamamos de reocupação esta volta a uma estação em que a medida já foi feita anteriormente. O intervalo recomendado para reocupação das estações é de 2 a 3 horas. Quanto menor o intervalo de reocupação, mais precisa será a correção.

Nos levantamentos em grande escala não é vantajoso reocupar a mesma estação, pois perderíamos muito tempo durante o percurso até a reocupação da primeira estação de medida que está longe. Uma forma mais vantajosa de fazer a reocupação das estações é reocupar estações que já foram ocupadas dentro do intervalo de tempo de reocupação e depois reiniciar as medidas uma estação a frente da nova estação reocupada como ilustrado na figura 9:

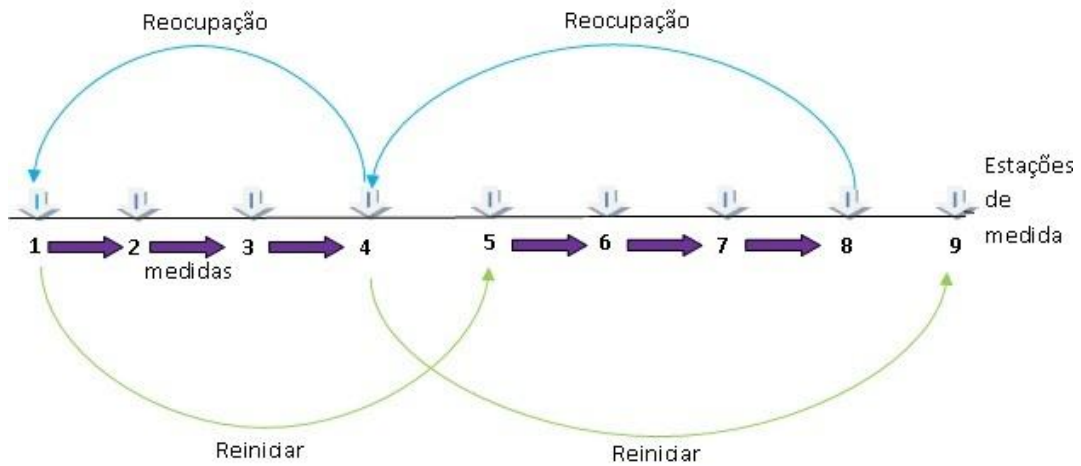


Figura 9 – Procedimento para medidas do valor de gravidade em larga escala mostrando a reocupação para a correção de drift instrumental.

Na figura 9, inicialmente realizam-se medidas nas estações 1, 2, 3 e 4, reocupa-se a estação 1 dentro do intervalo recomendado de reocupação para controlar o *drift* instrumental. Em seguida, reiniciam-se as medidas nas estações 5, 6, 7 e 8, reocupando, agora, a estação 4 dentro do intervalo de reocupação recomendado para controlar, novamente, o *drift* instrumental. Em seguida reiniciam-se medidas na estação 9, e assim por diante.

2.4 DENSIDADE DO SOLO

Neste trabalho, calcularemos a resposta gravimétrica de um modelo formado por um corpo cilíndrico ou de secção retangular. Para simular corretamente os resultados de medidas gravimétricas, precisamos incluir em nosso modelo valores de densidade dentro de uma faixa correta para a densidade do solo. Esta depende da composição mineralógica, porosidade e do grau de compactação, porém a maior contribuição vem da porosidade, complementada por contribuições menores de fluidos no interior dos poros. A tabela 1 mostra a variação e a média de densidade em poros com fluido e sem fluido.

Tabela 1: Densidade do solo. Variação e média de densidade em poros com fluido e sem fluido.

Densidade do solo			
Varição de densidade (g/cm³)		Densidade média (g/cm³)	
Poros com fluido	Poros sem fluido	Poros com fluido	Poros sem fluido
1,2 → 2,4	1 → 2	1,92	1,46

Fonte: (SENGIK, 2010).

2.5 O GRAVÍMETRO

Gravímetros são os instrumentos utilizados em levantamentos gravimétricos. Eles são constituídos essencialmente de um sistema massa-mola. A massa é suspensa pela mola em um sistema que supostamente obedece à lei de Hook, de modo que qualquer variação no valor da gravidade provoca uma elongação proporcional na mola.

Os valores de elongação da mola são reduzidíssimos (na ordem de milésimos) e são amplificados por técnicas óticas, mecânicas ou elétricas. Os gravímetros astáticos contam com um sistema para produzir instabilidade fazendo com que pequenas variações no campo gravimétrico provoquem maiores elongações na mola. Isto resulta em uma amplificação mecânica que permite uma precisão de medidas de 0,01 mGal (TELFORD;GELDART;SHERIFF, 1990). A mola é feita de fibra de quartzo ou por liga de ferro e níquel. Existem gravímetros em que um gás substitui o sistema elástico. Os gravímetros são sensíveis a temperatura, pressão, vibrações e campo magnético (quando a mola é de ferro).

2.5.1 O Gravímetro Lacoste & Romberg

O gravímetro LaCoste & Romberg é portátil e funciona junto a uma bateria que fornece energia ao sistema que mantém constante a temperatura do elemento sensetivo. Este gravímetro usa um sistema inovador de “mola de comprimento zero” (*zero-length spring*) em que a elongação da mola provocada pela variação de gravidade pode ser balanceada proporcionalmente por uma tensão aplicada à mola. A figura10 ilustra o funcionamento do gravímetro.

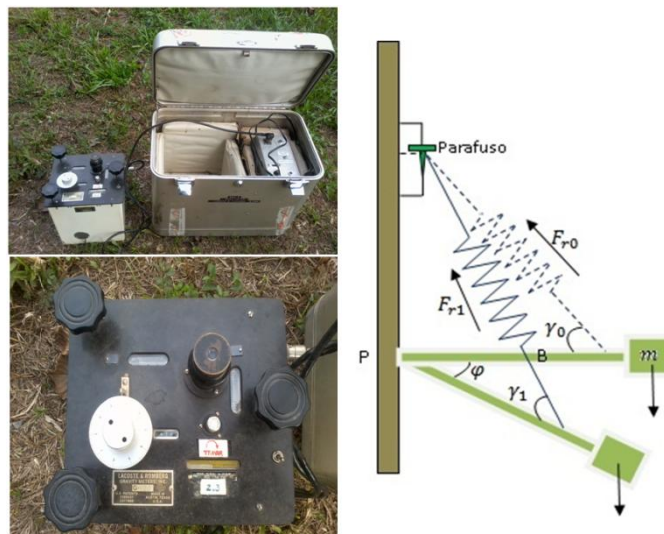


Figura 10 – Funcionamento interno do gravímetro LaCoste & Romberg.

A figura 10 mostra o funcionamento interno do gravímetro do LaCoste & Romberg. A massa m está acoplada na barra B e mantida em posição de equilíbrio com ela na horizontal. A variação de gravidade provoca uma rotação na barra descrita pelo ângulo φ modificando o ângulo entre a barra e a mola de γ_0 para γ_1 e, conseqüentemente os ângulos em relação ao pivô P. A variação dos momentos causa instabilidade no sistema, resultando numa magnificação do incremento da gravidade. A barra é trazida à posição horizontal por um parafuso ligado a mola. O valor da variação da gravidade é obtido se calibrado o número de voltas dadas no parafuso, necessário para trazer à barra à posição horizontal.

O gravímetro LaCoste & Romberg, como o que pertence à Faculdade de Geofísica da UFPA, tem sensibilidade de 0,01 mGal e permite medir variações na gravidade na faixa de 7000 mGal (LUIZ; SILVA,1995).

3 MODELAGEM DO SÍTIO DE TESTES CONTROLADO DE GRAVIMETRIA

3.1 CÁLCULO DO CAMPO DE UM CILINDRO

O modelo de um ambiente controlado para medidas de gravimetria proposto neste trabalho é formado por um cilindro vazio sob a superfície de um terreno plano. Sobre o poço cilíndrico deve ser colocada uma tampa rígida de modo a ser possível a realização de medidas com o gravímetro sobre ela. Este modelo está ilustrado na figura 11:

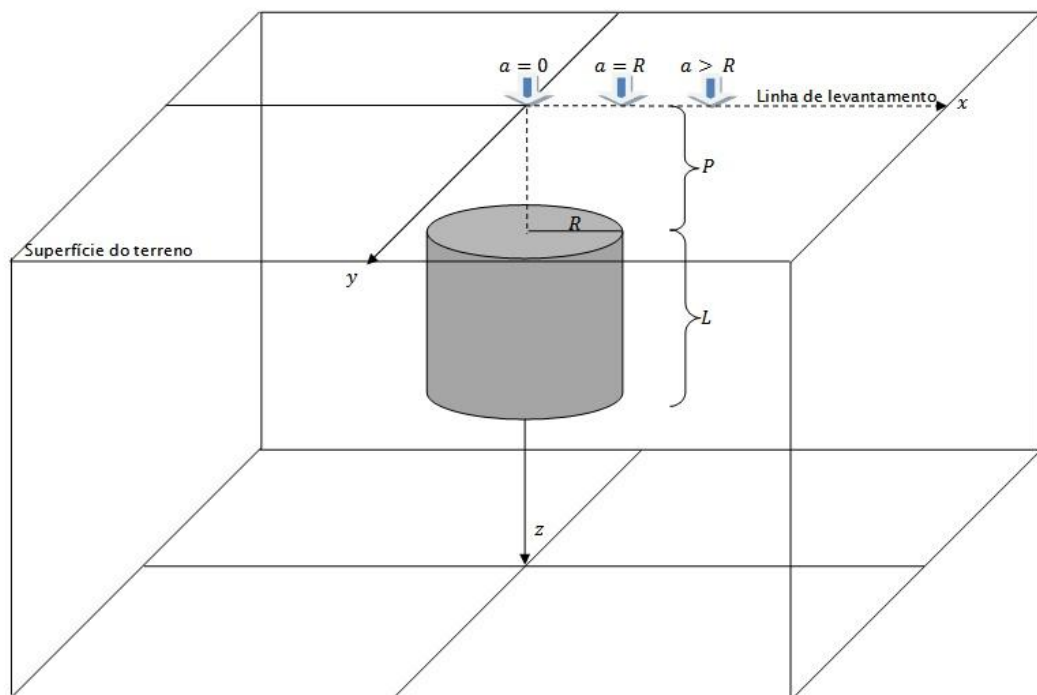


Figura 11 – Esquema ilustrando o modelo sobre o qual são calculados os valores de aceleração da gravidade.

Para calcular a componente vertical do campo gravimétrico devido ao cilindro, definimos o sistema de coordenadas mostrado na figura 11. O campo gravimétrico devido ao cilindro foi calculado com a origem na base do cilindro (CHANG, 1987). Agora o topo do cilindro está a uma profundidade p . O comprimento do cilindro é L e seu raio é R . Calculamos a componente vertical da aceleração da gravidade do cilindro sobre os pontos no eixo x indicados pela variável a . A densidade do solo é ρ_s , considerada uniforme. Consideraremos a densidade do cilindro igual a zero. O valor da componente vertical da aceleração da gravidade em um ponto distante do cilindro é g_0 . Tomaremos este valor como referência para o cálculo da variação do campo na superfície (Δg). O valor do campo na superfície será $g = g_0 - g_c$, em que g_c é a componente vertical do campo de um corpo cilíndrico de densidade igual a ρ_s . Então:

$$\Delta g = g - g_0 = -g_c \quad (10)$$

$$\Delta g = -G\rho \int_{-R}^R \int_{-(R^2-y^2)^{\frac{1}{2}}}^{(R^2-y^2)^{\frac{1}{2}}} \int_p^{p+L} \frac{z \, dz \, dx \, dy}{[(a-x)^2 + y^2 + z^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (11)$$

Resolvemos esta integral de volume em três etapas: primeiro a integral em dz :

$$I_z = \int_p^{p+L} \frac{z \, dz}{[(a-x)^2 + y^2 + z^2]^{\frac{3}{2}}} = \left[\frac{-1}{[(a-x)^2 + y^2 + z^2]^{\frac{1}{2}}} \right]_p^{p+L} \quad (12)$$

$$I_z = \left[\frac{1}{[(a-x)^2 + y^2 + p^2]^{\frac{1}{2}}} - \frac{1}{[(a-x)^2 + y^2 + (p+L)^2]^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (13)$$

Em seguida, a integral em dx :

$$I_x = \int_{-(R^2-y^2)^{\frac{1}{2}}}^{(R^2-y^2)^{\frac{1}{2}}} I_z(x, y) \, dx \quad (14)$$

$$I_x = \int_{-(R^2-y^2)^{\frac{1}{2}}}^{(R^2-y^2)^{\frac{1}{2}}} \left[\frac{1}{[(a-x)^2 + y^2 + p^2]^{\frac{1}{2}}} - \frac{1}{[(a-x)^2 + y^2 + (p+L)^2]^{\frac{1}{2}}} \right] dx \quad (15)$$

Usando

$$\int \frac{1}{[(a-x)^2 + y^2 + p^2]^{\frac{1}{2}}} = -\ln\{2(a-x)[(a-x)^2 + y^2 + p^2]^{\frac{1}{2}}\} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} I_x &= \ln \left\{ \frac{a + [R^2 - y^2]^{\frac{1}{2}} + [a^2 + p^2 + R^2 + 2a(R^2 - y^2)^{\frac{1}{2}}]^{\frac{1}{2}}}{a - [R^2 - y^2]^{\frac{1}{2}} + [a^2 + p^2 + R^2 - 2a(R^2 - y^2)^{\frac{1}{2}}]^{\frac{1}{2}}} \right\} \\ &+ \ln \left\{ \frac{a - [R^2 - y^2]^{\frac{1}{2}} + [a^2 + L^2 + 2Lp + p^2 + R^2 + 2a(R^2 - y^2)^{\frac{1}{2}}]^{\frac{1}{2}}}{a + [R^2 - y^2]^{\frac{1}{2}} + [a^2 + L^2 + 2Lp + p^2 + R^2 + 2a(R^2 - y^2)^{\frac{1}{2}}]^{\frac{1}{2}}} \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

Finalmente, temos a integral em dy . A integral em dy foi calculada no software Wolfram Mathematica 7.0 pelo comando **NIntegrate**[f, {y, y_{min}, y_{max}}].

$$I_y = \int_{-R}^R I_x(y) dy \quad (18)$$

Calculamos esta integral numericamente, introduzindo os valores de p , L , e R e multiplicamos por G e ρ_s para obter o valor de Δg na posição a .

Para expressar os valores de Δg em Gal, usaremos p , L , R e a em metros, ρ_s em g/cm³ e G em Nm²/kg². O valor resultante é então multiplicado por 10⁵. Para expressar finalmente os valores em mGal, multiplicamos por 1000.

3.2 RESULTADOS PARA O MODELO PROPOSTO

Precisamos determinar qual a intensidade da anomalia que poderá ser observada nas medidas sobre um cilindro vazio. Os valores de Δg dependem do volume do cilindro e precisam ser altos o suficiente para ser detectados pelo gravímetro da UFPA, que tem capacidade para medir variações mínimas de 0,01 mGal.

Em nossos modelos, vamos supor que existe uma laje de 5 cm de espessura sobre o poço construída de modo que sua densidade seja igual à do solo, de modo que nos cálculos faremos $p = 0,05$ m. Vamos usar um valor de densidade do solo $\rho_s = 1,5 \text{ g/cm}^3$ (dentro da média apresentada na tabela 1), ρ_c é a densidade do cilindro e $\Delta\rho = \rho_s - \rho_c$ é o contraste de densidade.

Iniciamos calculando os dados para um modelo no qual $R = 1$ m e $L = 2$ m. Os resultados para este modelo são mostrados na figura 12.

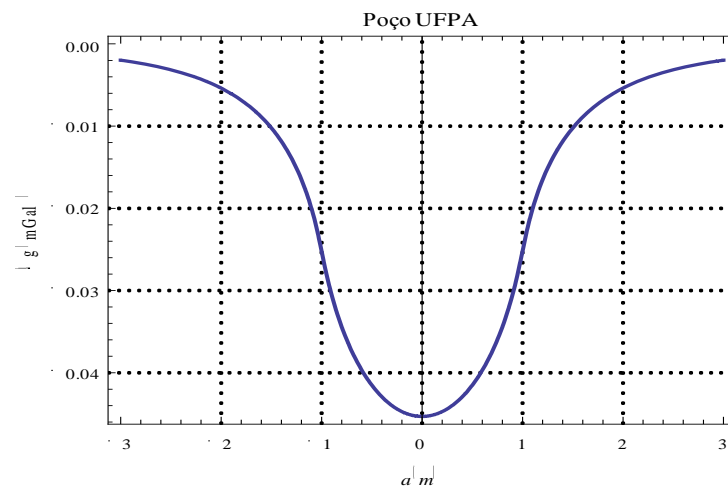


Figura 12 – Anomalia negativa devido ao poço com $R = 1$ m, $L = 2$ m e contraste de densidade $\Delta\rho = -1,5 \text{ g.cm}^{-3}$.

Para este modelo, o pico da anomalia atingiu o valor de -0,045 mGal. O limite de 0,01 mGal foi atingido a uma distância próxima de 1,5m do centro do cilindro.

Na figura 13 estão os resultados para um cilindro novamente com 1m de raio, mas agora com comprimento de 3m, o que representa um volume 1,5 vezes maior do que o primeiro.

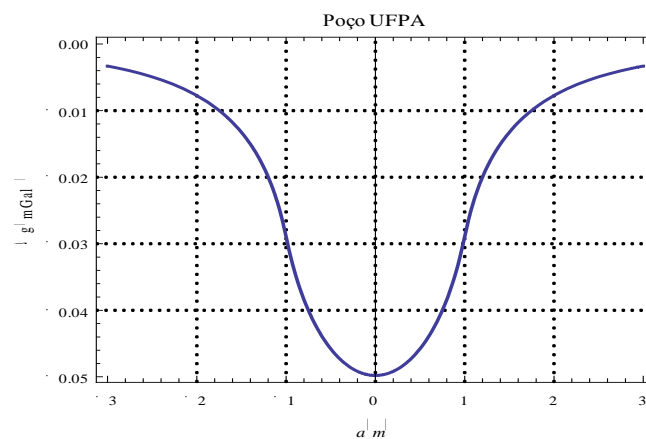


Figura 13 – Anomalia negativa devido ao poço com $R = 1$ m, $L = 3$ m e contraste de densidade $\Delta\rho = -1,5 \text{ g.cm}^{-3}$.

Agora o pico da anomalia atingiu -0,05 mGal.

Para o terceiro modelo, aumentamos o volume do cilindro, fazendo agora o raio de 1,5m e mantendo o comprimento de 2m, como no primeiro modelo. Agora o volume do cilindro é 2,25 vezes maior do que o do modelo 1. O resultado para este modelo está mostrado na figura 14:

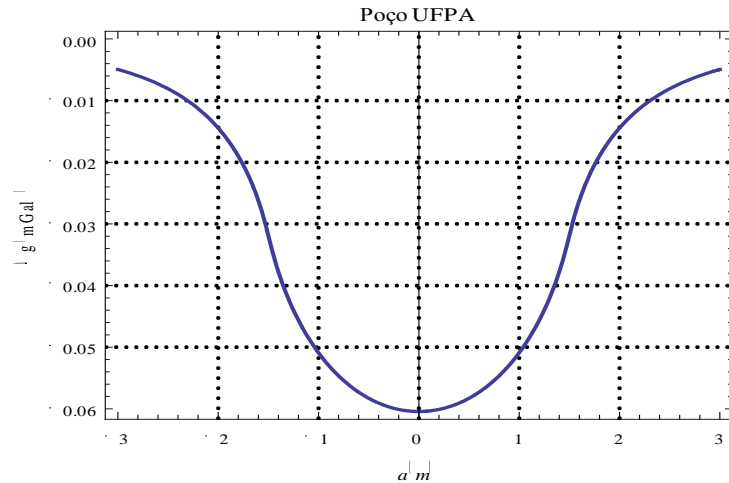


Figura 14 – Anomalia negativa devido ao poço com $R = 1,5$ m, $L = 2$ m e contraste de densidade $\Delta\rho = -1,5 \text{ g.cm}^{-3}$.

Para este modelo, o máximo da anomalia foi de -0.06 mGal.

Agora, com $R=1,5\text{m}$, $L=2\text{m}$ e $\rho = 1,5 \text{ g.cm}^{-3}$. O resultado deste modelo esta na figura 15.

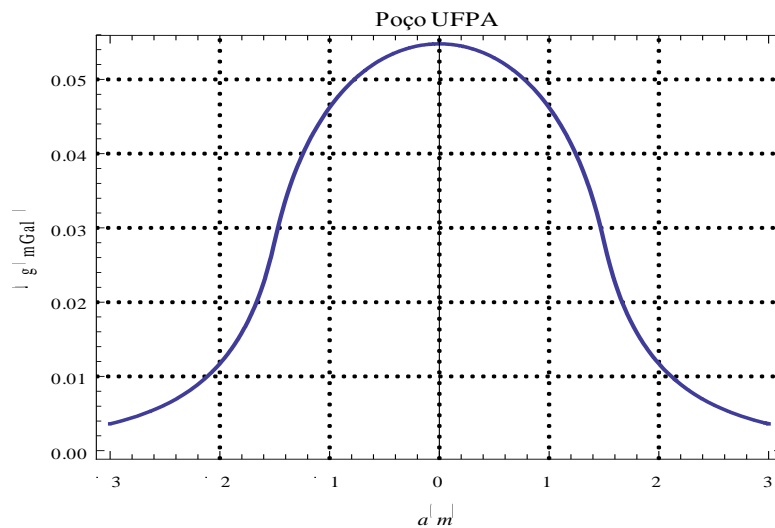


Figura 15 - Anomalia positiva devido ao poço com $R = 1,5$ m, $L = 2$ m e contraste de densidade $\Delta\rho = 1,5 \text{ g.cm}^{-3}$.

Para este modelo, em que a densidade é maior que o solo, o máximo da anomalia foi de 0.056 mGal.

3.6 PROCEDIMENTOS PARA O TRABALHO SOBRE O MODELO PROPOSTO

Um levantamento gravimétrico sobre o poço cilíndrico deverá ser capaz de localizar e medir o nível da anomalia provocada pelo poço em relação aos dados medidos na área ao redor. Os dados precisarão ser suficientemente precisos e exatos para permitir um trabalho de interpretação e possivelmente ser aplicado em um processo de inversão para determinar a geometria do corpo anômalo, no caso, o cilindro vazio.

O levantamento pode ser planejado para atingir um nível de detalhe alto em uma área relativamente pequena ao redor do poço. Os resultados acima mostram que, nos modelos calculados, uma distância de apenas 5m do centro do poço já é suficiente para que o sinal caia praticamente a zero. O trabalho pode ser planejado de modo que demore um tempo suficiente para que seja necessário realizar correções de maré e do drift instrumental, de modo que os estudantes precisem processar seus dados para poder realizar uma interpretação correta. Uma área de testes como esta pode, inclusive ser planejada para incluir variações no relevo do terreno, para que sejam incluídas correções de altura e Bouguer, conforme comentarei na sessão 5 deste trabalho.

4 LEVANTAMENTO GRAVIMÉTRICO REFERENTE AO MODELO NO POÇO DA UFPA.

Para por em prática um levantamento nos moldes do que é proposto neste trabalho, procuramos um local onde haja um poço que produza uma anomalia correspondente ao nosso modelo. O levantamento gravimétrico, referente ao modelo do poço, foi feito nas dependências da UFPA em um poço localizado no campus profissional em frente à faculdade de arquitetura e urbanismo como mostra a figura 16.



Figura 16 – Imagem ilustrando a localização do poço da UFPA
Fonte: Google Earth

O poço tem diâmetro e profundidade de 3 m e 1,6 m respectivamente, onde foi feita uma linha de 6 m com três medidas. O esquema abaixo ilustra como foi feito o levantamento gravimétrico sobre o poço da UFPA na figura 17.

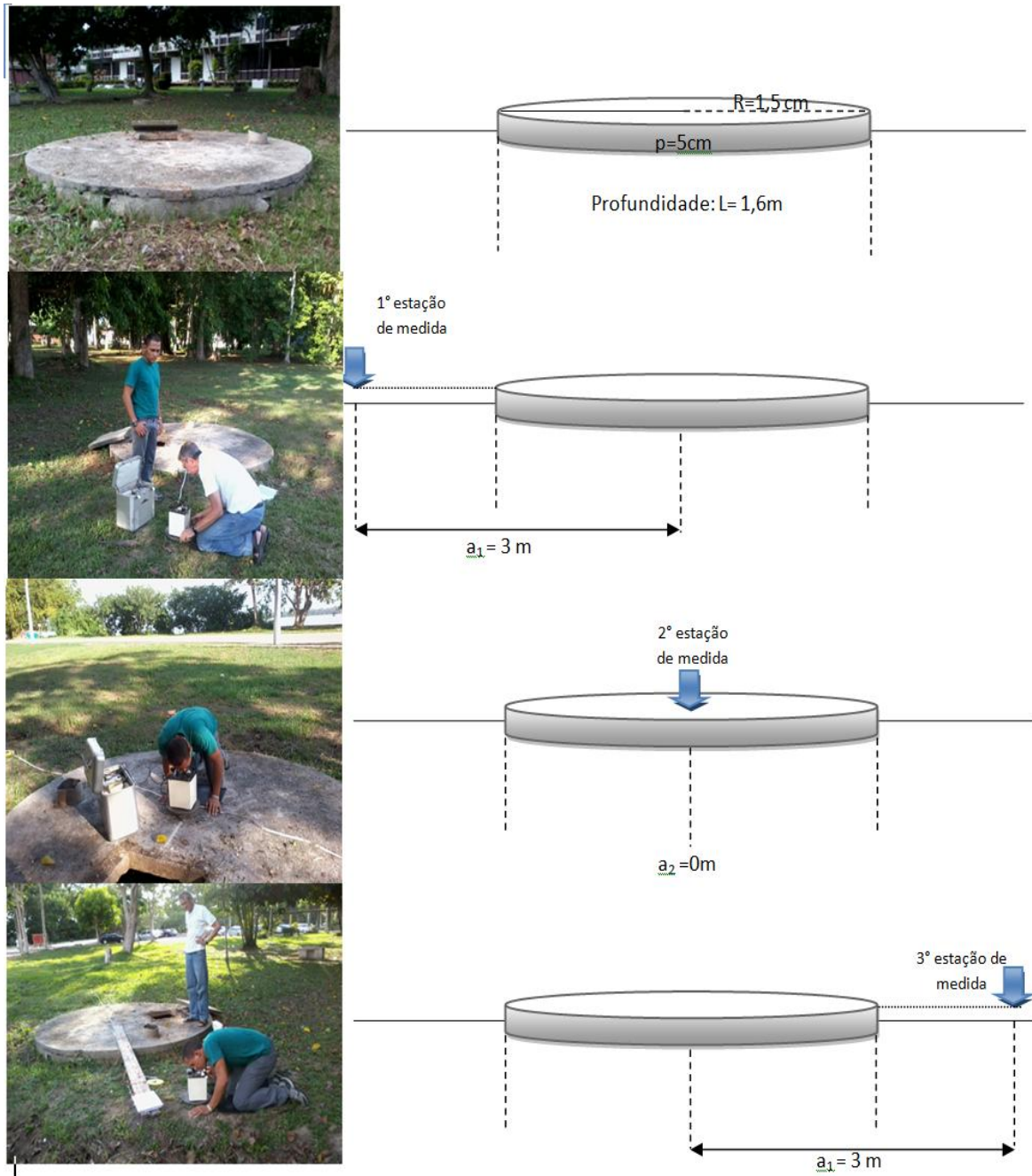


Figura 17 – Modelo esquemático ilustrando o levantamento sobre o poço da UFPA.

Na tabela abaixo estão especificados os detalhes do levantamento no poço da UFPA.

Tabela 2: Detalhes do levantamento como ordem e localização das estações, horário da aquisição das medidas e medida no dial (contador) do gravímetro.

Ordem	Localização das Estações	Horário.	Medida no dial
1° (base)	À esquerda, 3m do centro do poço	16h28min 16h32min 16h35min	1672,710
2°	No centro do poço	16h48min 16h53min 17h02min	1672,630
3°	À direita, 3m do centro do poço	17h17min 17h19min 17h23min 17h27min	1672,650 1672,670 1672,680 1672,690

Reocupação

1° (base)		17h39min 17h45min 17h52min	1672,670 1672,650 1672,670
--------------	--	----------------------------------	----------------------------------

Foram feitas de 3 a 4 medidas em cada estação. O horário foi registrado para cada uma das medidas, e mostra o tempo total do trabalho, 1h23min.

4.1 CORREÇÕES DOS DADOS

Tabela 3: Média dos horários e das medidas do dial, a conversão das medidas em mGal, as correções de drift e o valor corrigido.

Média dos horários por estação	Média das medidas do dial.	Conversão das medidas do dial para mGal	Drifts (mGal)	Valor corrigido (mGal)
16h32min	1672,710	1706,982	0,000	1706,982
16h53min	1672,630	1706,901	+0,016	1706,917
17h23min	1672,673	1706,945	+0,032	1706,977

Reocupação

17h45min	1672,663	1706,934	+0,048	1706,982
----------	----------	----------	--------	----------

Fiz a média das medidas do dial e converti para mGal através da expressão $\Delta g = (\text{medida} - 1600) \times 1.0208 + 1632.76$, de acordo com a tabela do manual de instruções do gravímetro LaCoste & Romberg modelo G e D (LACOSTE & ROMBERG, 2004). Foi obtida uma variação de drift instrumental de 0,048 mGal, esse valor foi interpolado pela função drift ($d = 1,6 \cdot 10^{-2} E_{(\text{estação})}$) e somado para cada medida em cada estação. Para levantamentos locais a correção de maré está intrínseca a correção e drift instrumental. Dessa forma, com as devidas correções, chegamos ao valor da variação de g em cada estação.

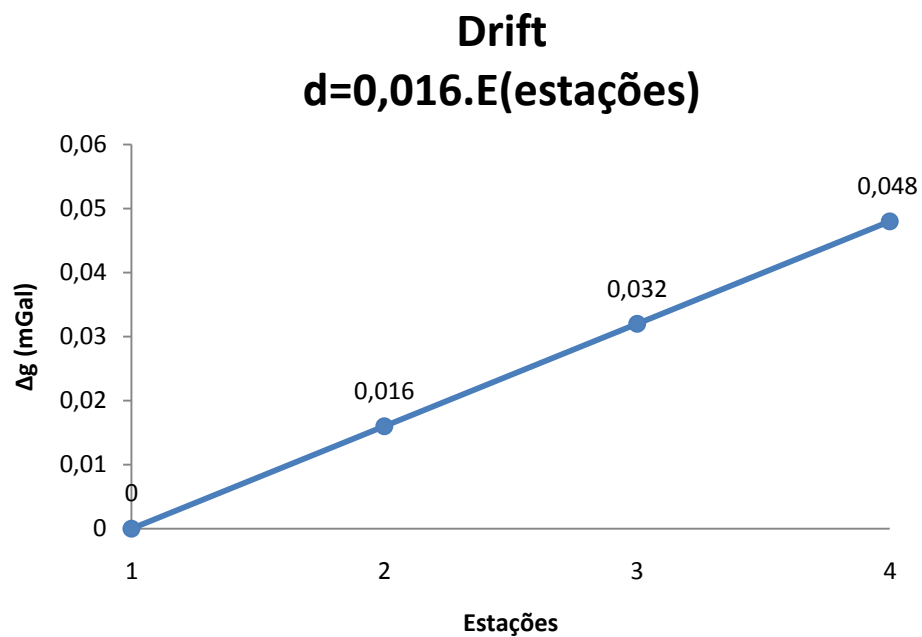


Figura 18– Drift instrumental no levantamento sobre o poço da UFPA.

4.2 PLOTAGEM DOS DADOS CORRIGIDOS.

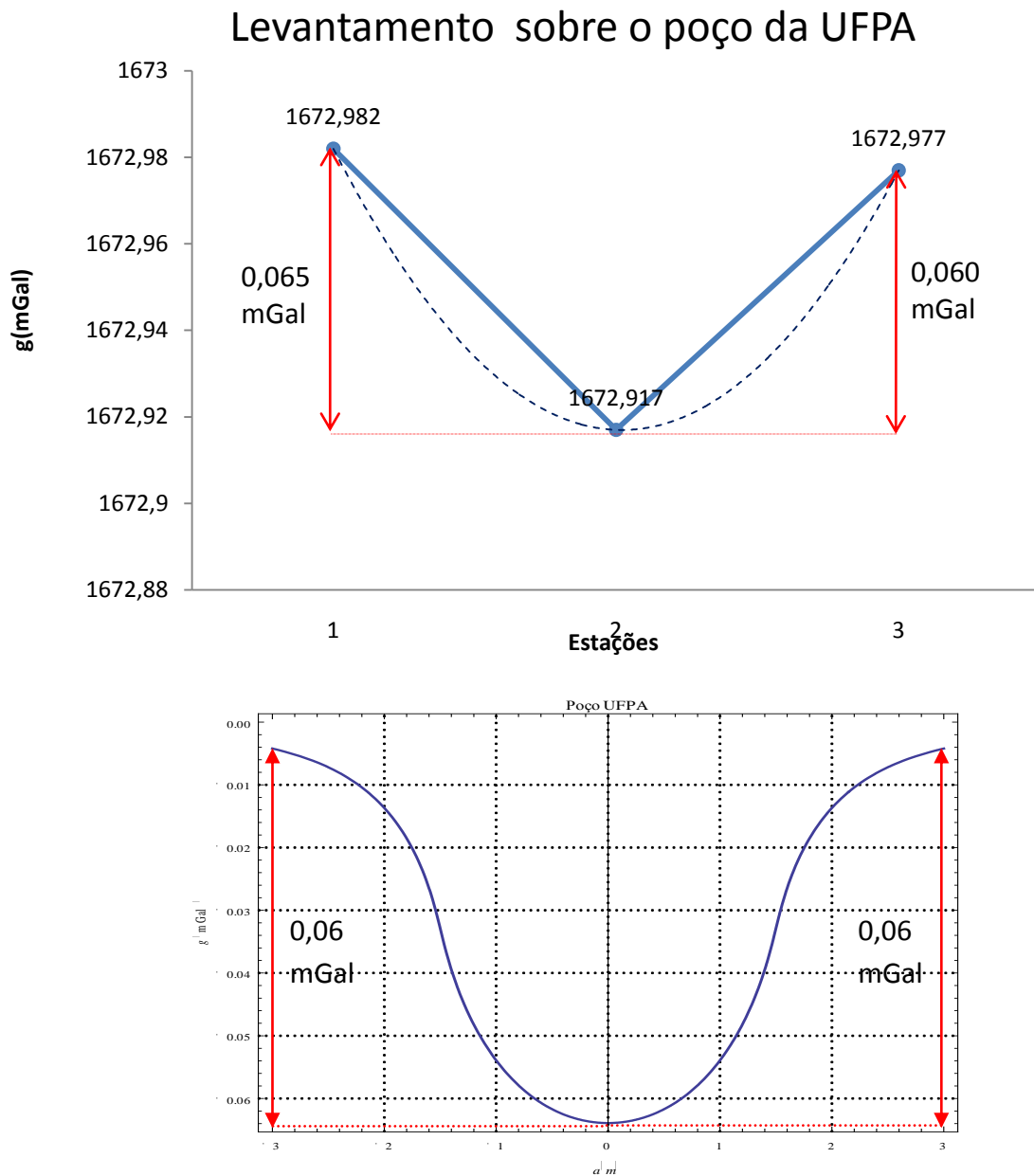


Figura 19– Comparação entre a anomalia devido ao poço real e a anomalia calculada no modelo computacional com os parâmetros do poço real ($R=1,5\text{m}$; $p=0,05\text{m}$; $L=1.6\text{m}$; $\rho=1.75\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$). A variação de 0,06 mGal é igual na anomalia devido ao poço, e no modelo.

Dessa forma a anomalia devido ao poço real corresponde à anomalia prevista pelo modelo computacional, com parâmetros do poço real ($R=1,5\text{m}$; $p=0,05\text{m}$; $L=1.6\text{m}$; $\Delta\rho=1.75\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$). A variação da gravidade da 1ª para a 2ª estação, assim como da 2ª para 3ª estação, é de 0,06 mGal similar ao modelo computacional proposto.

5 CONCLUSÃO: A PROPOSTA DO CIRCUITO GRAVIMÉTRICO

Os resultados do levantamento sobre o poço na UFPA nos indicam o nível do sinal que podemos mensurar com um gravímetro do tipo LaCoste & Romberg, como o que pertence à Faculdade de Geofísica da UFPA. Como as medidas para um cilindro como o da UFPA estão próximas do limite de precisão do aparelho, a construção de um poço com a finalidade de servir como sítio de testes para medidas gravimétricas deve ser feita para atingir um volume maior do que o poço da UFPA. O volume do cilindro varia diretamente com sua altura e com o quadrado do raio. Evidentemente, a melhor escolha será construir um poço com o maior diâmetro possível e a maior profundidade para a qual a construção seja prática. A geometria final de um poço destes será determinada por fatores como a verba disponível para a construção e as limitações impostas pela geologia do terreno.

Conforme afirmei anteriormente, o trabalho em um sítio controlado para o ensino de gravimetria como o aqui proposto pode ser planejado para que seja necessária a correção de maré para a correta interpretação dos dados. Outras características de um levantamento gravimétrico podem ser incluídas em um campo de testes se pudermos sofisticar a obra para incluir, por exemplo, um relevo não plano e/ou anomalias positivas.

Na figura 17 está ilustrado um possível desenho para um campo de testes mais completo que estou batizando de Circuito Gravimétrico. Este consiste em uma combinação de fontes de anomalias diferentes, conforme descrito a seguir.

Na área estão presentes dois poços, o primeiro preenchido com um material de densidade maior do que a do solo ao redor, de maneira que teremos uma anomalia positiva, e o segundo deixado vazio. O material que preencherá o primeiro poço pode ser composto de peças de sucatas de ferro, que podem ser adquiridas em siderúrgicas, e sua densidade média será uma função da forma e do tamanho das peças empregadas. Com um material adequado, a densidade média final será maior do que a do solo, com um contraste consideravelmente maior do que aquele de um poço vazio em relação ao solo. A presença de uma anomalia positiva e uma negativa será uma ótima ilustração das possibilidades encontradas em um levantamento gravimétrico.

Outra possibilidade, aproveitando a fonte de um sinal mais forte do que o do poço vazio, é a construção de uma parte elevada do terreno sobre o poço preenchido. A elevação do terreno iria iniciar a alguns metros antes da borda do poço preenchido e seria feita em degraus, de modo a permitir a realização de medidas em suas faces laterais. Como a intensidade do sinal

que será medido será muito pequena, uma variação de altura de apenas um metro será suficiente para provocar uma variação na mesma ordem de grandeza do sinal gerado pelo alvo do levantamento. Os estudantes terão, então, que incluir a realização de correções de altitude e Bouguer para poder interpretar corretamente os dados (Figura 18).

Este modelo para um campo de testes para o ensino de gravimetria precisará de uma área que pode ser de 300 m² a 1000 m², dependendo de como sejam distribuídas as feições na área. Os levantamentos podem ser feitos em uma única linha, que se estenderia sobre o topo das fontes das anomalias, ou em uma área que iria abranger ambas as fontes, de modo a ser produzidos mapas de isovalores do campo gravimétrico (Figura 19).

Esta certamente não será uma obra barata e as dificuldades para sua construção já começam com a disponibilidade de uma área grande o suficiente. Entretanto, o esforço para a construção de um tal campo de testes seria recompensado com uma ferramenta para o ensino de gravimetria que, até onde pude apurar, será inédita no Brasil.

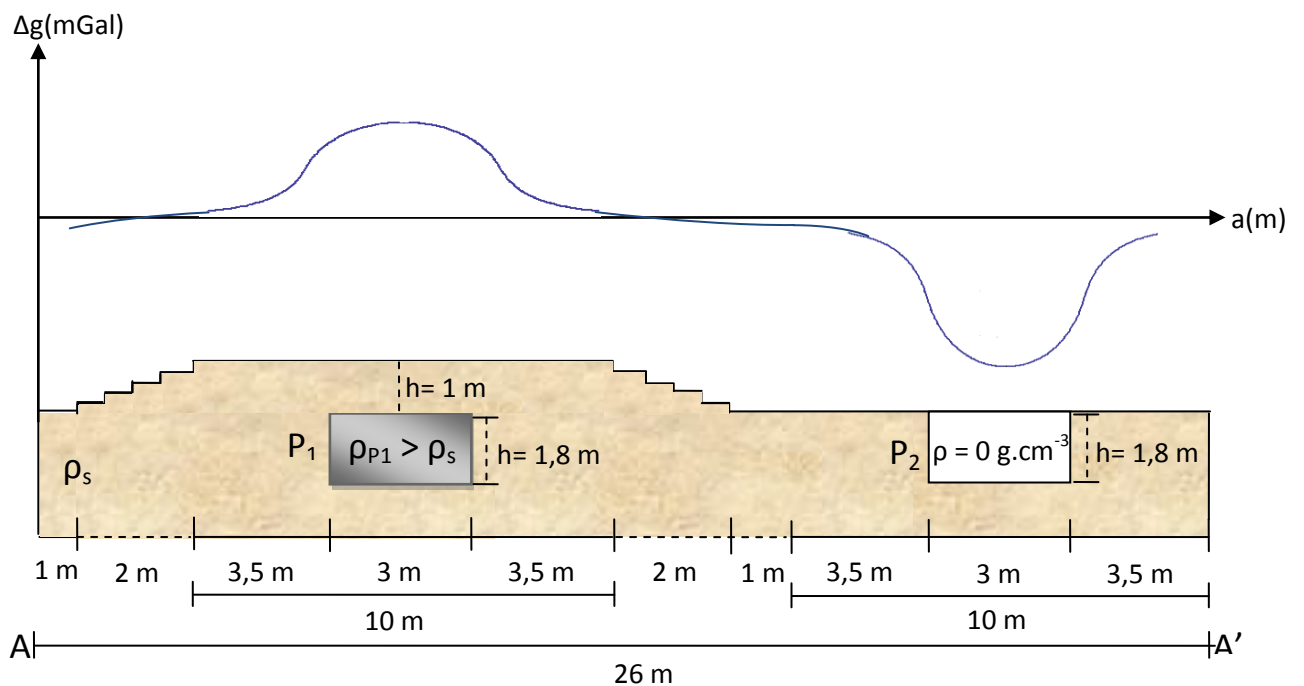


Figura 20 – Modelo esquemático ilustrando os modelos de poço e suas respectivas anomalias no circuito gravimétrico proposto. O solo tem densidade de ρ_s . O poço P_1 tem densidade $\rho_{P1} > \rho_s$ e gera uma anomalia positiva. O poço P_2 tem densidade $\rho_{P2}=0$ e gera uma anomalia negativa.

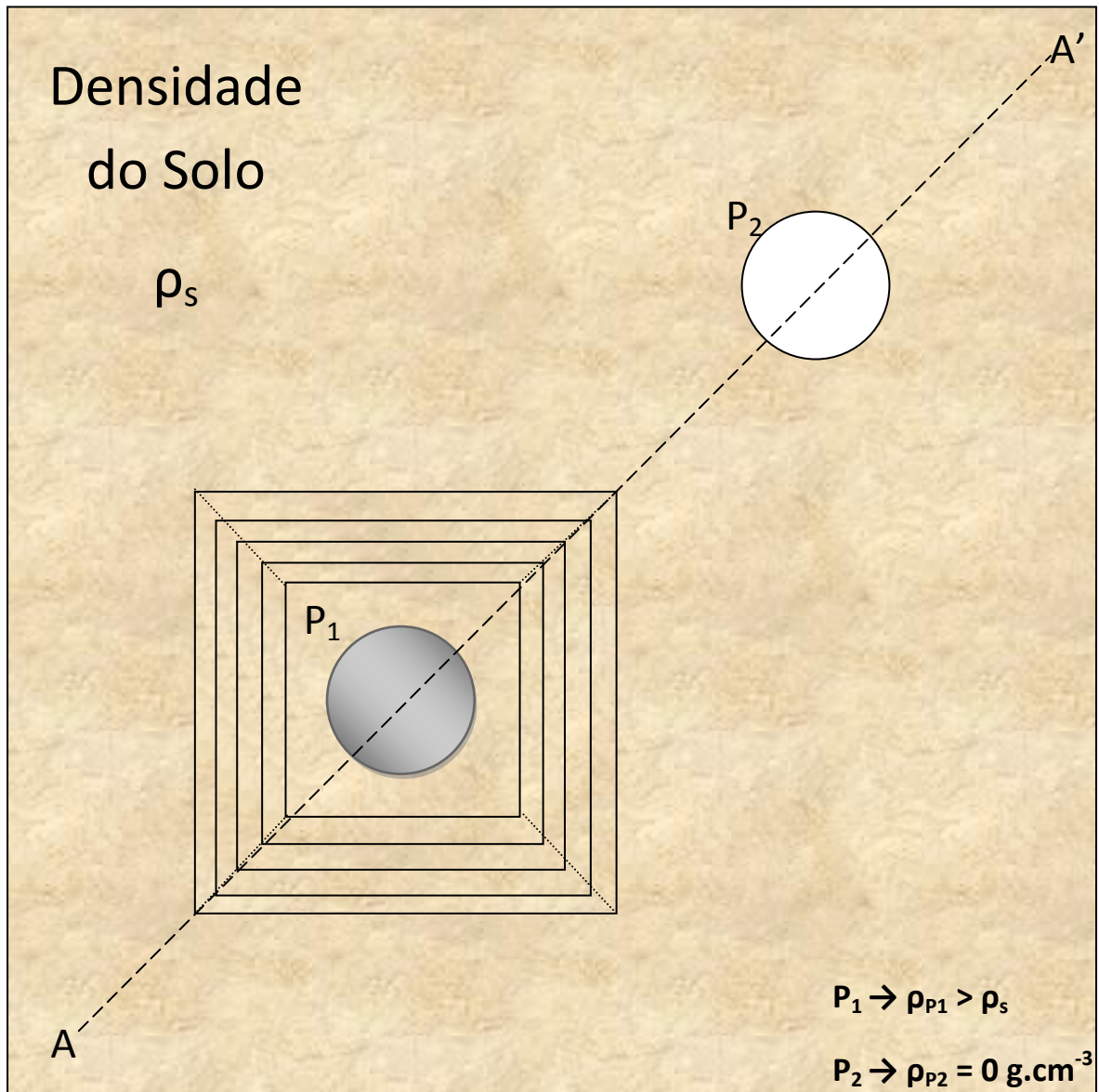


Figura 21 – Modelo esquemático ilustrando uma visão de cima do circuito gravimétrico. O solo tem densidade ρ_s . O poço P_1 tem densidade $\rho_{P1} > \rho_s$. O poço P_2 tem densidade $\rho = 0 \text{ g.cm}^{-3}$. O perfil da figura 18 foi feito na linha AA'.

REFERÊNCIAS

CHANG, Y. H. **On calculation of the gravitational force of a finite cylinder.** Xia Hong Shan, Wuhan, China: Institute of Seismology, State Seismological Bureau, 1987. p. 507-513.

LACOSTE & ROMBERG. **Instruction manual model g & d gravity meters.** Austin, Texas, 2004. p. 1-9.

LONGMAN, I. M. **Formulas for Computing the Tidal Accelerations Due to the Moon and the Sun.** Los Angeles, California: Institute of Geophysics, University of California, 1959.

LUIZ, J. G; SILVA, L. M. C. **Geofísica de prospecção.** Belém: Universidade Federal do Pará; Cejup, 1995. 311 p.

MEG SYSTEMS LTD. [**Tide Correction Utility**]. Disponível em: <<http://www.megsystems.ca/webapps/tidecorr/tidecorr.aspx>>. Acessado em: dez. 2010.

SENGIK, E. **Roteiro de aulas práticas: Solos e Adubação.** Curso de Zootecnia, Marigá-Paraná, v1, n.1. 2005. Disponível em <<http://www.dzo.uem.br/disciplinas/solos.pratica.doc>>. Acessado em: 10 mar. 2010

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied geophysics.** 2 ed. Cambridge : Cambridge University Press, 1990. 792p.