



Revista Brasileira de Cartografia (2017), Nº 69/7: 1303-1312
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

MAPEAMENTO DAS ANOMALIAS DA GRAVIDADE PARA AVALIAR A VARIÇÃO DA DENSIDADE DE CONCRETO COMPACTADO COM ROLO: ESTUDO DE CASO USINA HIDRELÉTRICA (UHE) DE MAUÁ, ESTADO DO PARANÁ

Mapping of Gravity Anomalies to Evaluate the Concrete Density Variation: Case Study of Hydroelectric Power Plant (UHE) of Mauá, State of Paraná

Miguel Ribeiro Muguio¹, Pedro Luis Faggion¹, Francisco José Fonseca Ferreira² & Wander da Cruz¹

¹Universidade Federal do Paraná – UFPR

Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas - PPGCG

Centro Politécnico, Av. Cel Francisco H. dos Santos, s/n, Jardim das Américas – CEP: 81530-900, Curitiba (PR), Brasil
{mmuguio; pedro.faggion; wanderdacruz}@gmail.com

²Universidade Federal do Paraná – UFPR

Programa de Pós-Graduação em Geologia – PPGG

Centro Politécnico, Av. Cel Francisco H. dos Santos, s/n, Jardim das Américas – CEP: 81530-900, Curitiba (PR), Brasil
francisco.ferreira@ufpr.br

Recebido em 28 de Agosto, 2017/ Aceito em 27 de Setembro, 2017

Received on August 28, 2017/ Accepted on September 27, 2017

RESUMO

Este artigo apresenta o mapeamento das anomalias da gravidade sobre a barragem de Concreto Compactado com Rolo (CCR) da Usina Hidrelétrica de Mauá, buscando averiguar variações na densidade do concreto decorrentes de eventual saturação. Anomalias residuais positivas são relacionadas à densidade do CCR menos saturado, que varia entre 2,3 a 2,6 g/cm³. O vertedouro ficou bem caracterizado por anomalias residuais negativas. Comportamento semelhante foi observado na ombreira direita da barragem, o qual foi interpretado como reflexo da saturação do concreto convencional utilizado no fechamento do canal de adução. De um modo geral, as anomalias negativas se verificam com maior expressão em parte da ombreira direita (região NE) e no vertedouro (região central).

Palavras-chave: Mapeamento, Anomalia da Gravidade, Concreto Compactado com Rolo.

ABSTRACT

This article presents the mapping of gravity anomalies on the Roller Compacted Concrete Dam (CCR) of the Hydroelectric Plant of Mauá, aiming to investigate variations in the concrete density resulting from possible saturation. Positive residual anomalies are related to the density of the less saturated CCR, which varies between 2,3 and 2,6 g/cm³. The spillway was well characterized by the negative residual anomalies. Similar behavior was observed on the right bank of the dam, which was interpreted as a reflex of the conventional concrete saturation used in the closure of the adduction channel. In general, the negative anomalies occur with greater expression on the right bank (NE region) and in the spillway (central region).

Keywords: Mapping, Gravity Anomaly, Roll Compacted Concrete.

1. Introdução

A gravimetria consiste no conjunto de métodos e técnicas empregados na medida do campo da gravidade terrestre, com o objetivo de mapear as variações de densidade da superfície da Terra ou de materiais nela contidos. Estas variações de densidade, também chamadas de anomalias da gravidade são obtidas a partir de reduções do valor da gravidade observada e constituem ferramentas comuns ao geodesta, ao geólogo e ao geofísico, entre outros profissionais ligados às Geociências. A Geodésia, através de suas técnicas de medição, que se caracterizam pela precisão milimétrica e/ou submilimétrica, tem condições de detectar subsidência do solo e contribuir na elucidação dos mecanismos que desencadeiam a sismicidade decorrente de grandes reservatórios, além de contribuir com pesquisas sobre a percolação da água a grandes profundidades (GEMAEL, 2012).

O controle e segurança de barragens são baseados na análise de seu comportamento estrutural, em função do monitoramento de um conjunto de variáveis que descrevem as relações entre as ações e as respostas estruturais correspondentes, tendo em consideração as propriedades dos materiais utilizados na construção (CASACAE HENRIQUES, 2002). Estas barragens podem ser construídas em concreto, terra e enrocamento (COSTA, 2012).

A barragem da Usina Hidrelétrica de Mauá, que é objeto deste estudo foi construída com a tecnologia CCR - Concreto Compactado com Rolo. O CCR possui os mesmos materiais que o concreto convencional, porém com dosagens diferentes de cimento, que conferem uma consistência seca, nesta técnica o concreto é espalhado e compactado com equipamentos tradicionalmente empregados na pavimentação rodoviária (PCA, 1987). A técnica do CCR permite que haja redução de riscos de fissuração térmica e de reação álcali-agregado, em relação ao concreto convencional, devido principalmente ao baixo consumo de cimento (LACERDA *et al.*, 2006).

Batista *et al.* (2003) afirmam que o concreto é um material heterogêneo e sua porosidade é uma das propriedades que contribui para o envelhecimento e deterioração das barragens

de concreto. Para garantir estanqueidade ao longo dos anos são utilizadas soluções em concreto convencional pré-moldado e mantas poliméricas diversas (WENDLER, 2010). Apesar disso, a face de montante da barragem está em contato contínuo com a água, onde os efeitos de variação de temperatura devido ao calor de hidratação do cimento e de movimentação higrótérmica passam a ser significativos, podendo ocasionar fissuras. Em consequência destas fissuras e da característica porosa do CCR, admite-se a possibilidade de infiltração da água e variação gradual na densidade do concreto. Estes fatos representam indicativos de anomalias que podem provocar rupturas a estrutura da barragem e ocasionar perdas de vidas humanas, danos econômicos e socio-ambientais avultados. Deste modo, a intervenção antecipada ou imediata dos engenheiros responsáveis pela segurança da barragem minimizam potenciais danos, quando detectados na sua fase inicial, através de tomada de medidas corretivas.

As variações na densidade do concreto podem ser refletidas no campo da gravidade da Terra. Trata-se de massa anômala que causa uma perturbação localizada, conhecida como anomalia da gravidade (KEAREY *et al.*, 2009). É neste contexto que se desenvolveu a presente pesquisa com o objetivo de realizar o mapeamento das anomalias da gravidade que possa apoiar a averiguação de variações na densidade do concreto decorrentes de eventual saturação na barragem da Usina Hidrelétrica de Mauá.

2. METODOLOGIA

A metodologia é descrita em seis subseções seguintes.

2.1 Localização da Usina Hidrelétrica de Mauá

A barragem da Usina Hidrelétrica de Mauá localiza-se no rio Tibagi, entre os municípios de Telêmaco Borba e Ortigueira (Figura 1). É o primeiro aproveitamento de médio porte a ser implantado no contexto geológico de rochas sedimentares do Segundo Planalto Paranaense, onde também ocorrem disseminadas no maciço, intrusões de rochas ígneas na forma de soleiras e diques de diabásio.

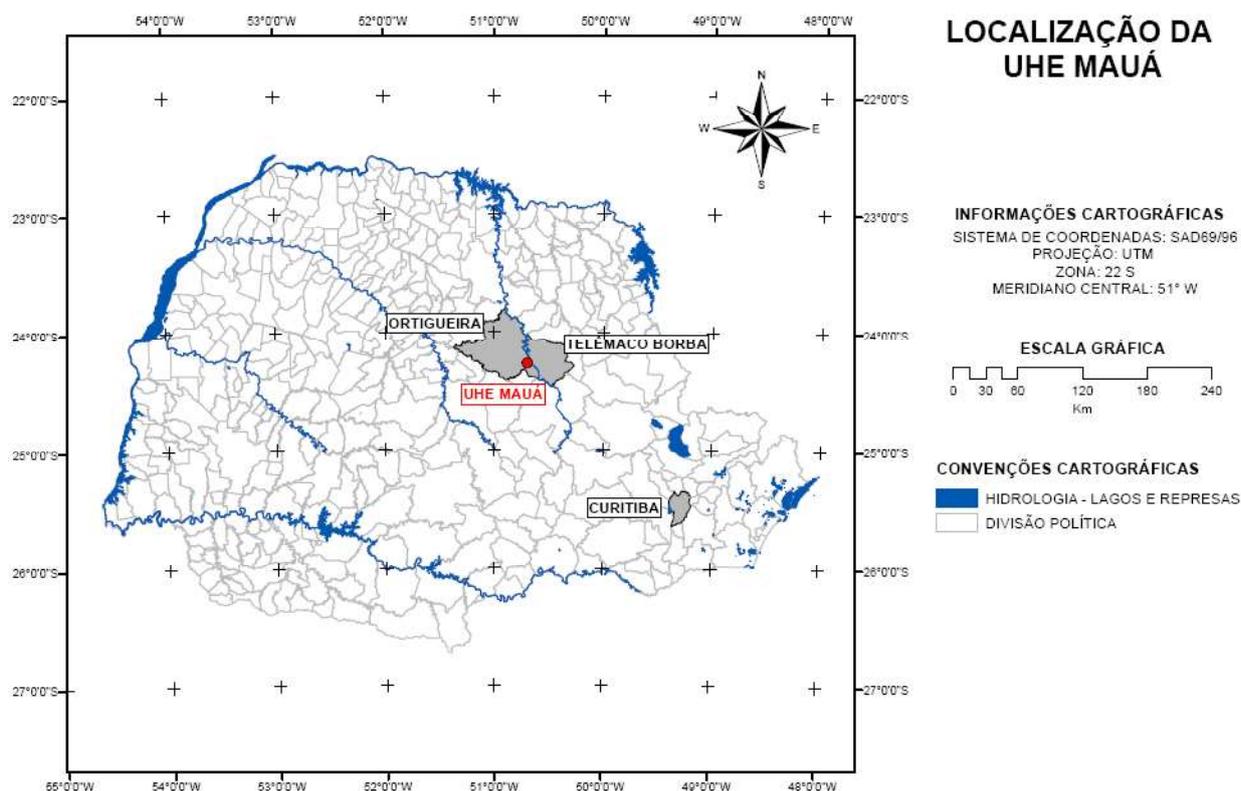


Fig. 1 - Localização da Usina Hidrelétrica de Mauá. Fonte: Silva, (2012).

2.2 Medições gravimétricas

Segundo Torge (1989), a magnitude do vetor gravidade (g) é obtida através de medições absolutas ou relativas. As medições absolutas proporcionam diretamente o valor de g para uma estação, enquanto as medições relativas devem ser realizadas em pelo menos duas estações, obtendo-se a diferença da gravidade Δg . Antes dos gravímetros, as medições relativas eram realizadas através de pêndulos, que devido a sua sensibilidade exigiam um operador especializado, cujo rendimento máximo era de uma estação por dia (GEMAEL, 2012). As medições absolutas também eram realizadas por método pendular ou através da queda livre de uma massa. Modernamente as medições absolutas são realizadas por gravímetros absolutos, que permitem registrar pequenos intervalos de tempo e variações de distância ao longo da queda de uma massa. A gravidade absoluta na estação LAIG (Laboratório de Instrumentação Geodésica) da UFPR que serviu de base para o transporte do valor da gravidade até a estação RN-5 (referência no levantamento gravimétrico na barragem) foi obtida por esta forma de medição.

2.3 Implantação e ampliação da rede gravimétrica

Como foi mencionado, para viabilizar os levantamentos gravimétricos na barragem, inicialmente foi realizado o transporte do valor da gravidade da estação absoluta (de 1ª ordem), materializada no LAIG da UFPR (Figura 2), para a estação da gravidade de referência de RN-5 (Figura 3) implantado próximo à barragem e fora da zona de influência do reservatório. O transporte de base foi realizado com o gravímetro relativo digital *SCINTREX CG-5* (com precisão de $\pm 0,5\mu\text{Gal}$ e pertencente a UFPR), através de um circuito fechado para o controle dos erros e garantindo um resultado compatível com a precisão da estação de 1ª ordem utilizada como referência. O valor da gravidade na estação LAIG é $978760,377 \text{ mGal}$ e pertence a rede gravimétrica brasileira de primeira ordem.

O procedimento aqui adotado é sustentado por Torge (1991), ao afirmar que uma rede deve conter pelo menos uma medida de gravidade absoluta implantada por um marco estabelecido num local estável (estabilidade geológica, hidrológica e de pouca sismicidade) e permanente (instituições científicas). Gemael (2012), afirmou

que para assegurar o valor de referência da gravidade, cada país deve estabelecer a sua “rede nacional” integrada por estações de 1ª ordem, geograficamente bem distribuídas e amarradas ao *International Gravity Standardization Net 1971* (IGSN-71) para facilitar a tarefa dos geodestas, geólogos e geofísicos que pretendam efetuar densificações gravimétricas.

A estação RN-5 acima descrita foi adotada como marco de referência para os levantamentos gravimétricos na região da barragem e o valor da gravidade obtido a partir do transporte é $g = 978755,292$ mGal.

A densificação gravimétrica na região da barragem utilizou o conceito de circuito fechado, sendo a partida e a chegada situadas na RN-5. Esta forma de realizar levantamentos gravimétricos permite o cálculo da deriva instrumental. Esta ocorre devido a mudanças no

comportamento do sistema elástico ou sensores do gravímetro ao longo do tempo, provocando alterações nas leituras executadas numa mesma estação em diferentes horários (KNÖDEL, 2007; GEMAEL, 2012). Um circuito com 80 estações foi implantado na crista ou sobre a rodovia PR-239 que utiliza a barragem da UHE de Mauá para transpor o rio Tibagi. Outros circuitos foram implantados sobre o 2°, 5°, 8°, 11° e 14° degraus à jusante da barragem. Estes possuem respectivamente 54, 45, 43, 42 e 25 estações, com o mesmo afastamento (10 metros) utilizado na crista (rodovia sobre a barragem), conforme mostra a Figura 4.

Os levantamentos gravimétricos foram realizados nos dias 17 e 18 de Dezembro de 2016 quando o nível d’água no reservatório indicava em média 630m, correspondente a 99,2% de enchimento.



Fig. 2 - Estação de gravidade absoluta materializada no LAIG da UFPR.



Fig. 3 - Estação de gravidade de referência RN-5.

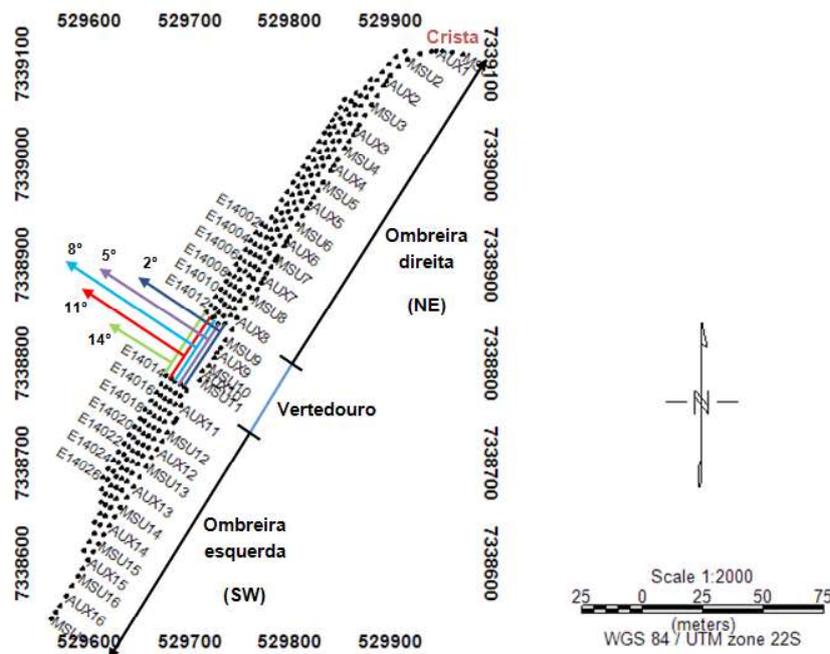


Fig. 4 - Localização das estações de gravidade na rodovia e degraus sobre a barragem da UHE de Mauá.

2.4 Espaçamento entre as estações

Os levantamentos gravimétricos, além de globais ou regionais, também são realizados em escala local ou de detalhe, com espaçamento entre as estações de 100 metros, ou menor, que apesar de não contribuir substancialmente para a cobertura regional, são utilizados para investigações especializadas, tais como nos levantamentos para a exploração de petróleo, localização de domos de sal, exploração mineral, cubagem de jazidas, localização de vazios, como cavidades naturais ou antrópicas (PATERSON E REEVES, 1985). Kearey *et al.* (2009) afirmam que o espaçamento das estações de uma rede com a finalidade de se executar um levantamento gravimétrico pode variar de uns poucos metros, no caso de levantamentos geotécnicos ou de detalhe para mineração, a vários quilômetros em levantamentos regionais. No projeto da Usina Hidrelétrica de Mauá adotou-se um intervalo de amostragem de cerca de 10m tendo por fundamento a possibilidade de uma rápida variação do campo da gravidade resultante de variações na densidade do concreto.

2.5 Determinação das coordenadas geodésicas

Durante as medições gravimétricas foram determinadas as coordenadas geodésicas das

estações pela técnica RTK (*Real Time Kinematic*), cuja base considerada foi o Pilar Geodésico (PG03) pertencente à rede geodésica implantada na barragem. As coordenadas da estação base foram determinadas pelo posicionamento relativo estático, com 10 horas de rastreamento em média. As coordenadas das demais estações gravimétricas foram determinadas através do receptor GNSS (*Global Navigation Satellite System*) de marca *Hiper*, com precisão horizontal nominal de $10\text{mm} \pm 1.5\text{ppm}$ e precisão vertical nominal de $20\text{mm} \pm 1.5\text{ppm}$, fabricado pela *Topcon*. Estas coordenadas geodésicas foram usadas no cálculo das correções de rotina, na determinação do valor da gravidade normal para posterior cálculo das anomalias da gravidade. De modo a facilitar a interpretação dos resultados em termos de posicionamento das anomalias da gravidade sobre a barragem, as coordenadas geodésicas foram também transformadas para o sistema cartesiano local (sistema da barragem), onde o eixo “X” está paralelo à estrutura da barragem, o eixo “Y” é perpendicular ao eixo “X”, com a direção e sentido coincidente com o curso do rio, positivo para jusante e, o eixo “Z” está na direção do zênite, formando um sistema dextrógiro. Mais informações sobre o sistema cartesiano local podem ser encontradas em (GRAÇA, 2013; DA CRUZ, 2015).

2.6 Anomalia Bouguer

A anomalia Bouguer (Δg_B) é a resultante obtida depois da aplicação da correção de Bouguer ao valor da anomalia ar livre (anomalia que resulta da redução do valor da gravidade medida, através do gradiente da gravidade normal) e é dada de forma analítica pela equação (1), (HOFMANN-WELLENHOF & MORITZ, 2005; GEMAEL, 2012):

$$\Delta g_B = g + 0,1967H + C_t - C_B - \gamma \quad (1)$$

onde:

Δg_B - Anomalia Bouguer (mGal);

g - Valor da gravidade medido;

H - Altitude Ortométrica (em metros), ou seja, altitude relacionada à superfície equipotencial do campo da gravidade, obtida através da conversão da altitude elipsoidal dada pelo sistema GNSS, quando combinado com a ondulação geoidal calculada através do *MAPGEO2015 (Sistema de Interpolação de Ondulação Geoidal SIRGAS2000) versão 1.0*;

γ - Gravidade normal determinada para cada ponto observado através da Fórmula Internacional de 1980, em função da latitude;

C_t - Correção de Terreno;

C_B - Correção Bouguer

As correções de terreno e Bouguer foram realizadas através do *software "Oasis montaj" da Geosoft, versão v 8.5.5*.

As anomalias Bouguer frequentemente encerram vários comprimentos de onda. Algumas podem ser de carácter regional, às quais podem estar sobrepostas anomalias de menor comprimento de onda, consideradas locais (residuais). A caracterização de regional e residual depende da escala do problema.

Normalmente, nos levantamentos gravimétricos, as anomalias locais são consideradas as mais importantes e, por isso, o primeiro passo na interpretação dos resultados é a remoção do campo regional de modo a isolar as anomalias residuais (KEAREY *et al.*, 2009; LOWRIE *et al.*, 2007; NABIGHIAN *et al.*, 2005; MILSOM, 2003). Em geral, para a separação dos componentes regionais, dos locais (residuais), são considerados vários métodos, tais como, gráficos, espectral (filtragem) e de ajuste polinomial, (KNÖDEL, 2007) ou por modelagem

das estruturas conhecidas, (KNÖDEL, 2007).

Segundo Knödel (2007) o método gráfico é lento e não pode ser automatizado. Além da intuição do intérprete, a única restrição imposta no campo regional, é a suavidade. Como resultado, haverá várias soluções para o problema da separação, e a subjetividade inerente tanto pode ser uma vantagem ou uma desvantagem, dependendo da experiência do intérprete e da capacidade de incorporar informação geológica relevante sobre o campo regional. O método espectral proporciona meios mais quantitativos para caracterizar a suavização de um campo regional, devido ao seu conteúdo espectral predominantemente de baixa frequência. Eles são mais rápidos e menos subjetivos do que o método gráfico, porque a separação é efetuada por uma filtragem passa-baixo adequada do campo total. Na aplicação de métodos espectrais, campos regionais podem ser produzidos por fontes largas ou profundas. No entanto, devido à sobreposição dos espectros regional e residual, uma separação completa não é possível e, dois tipos de erros, nomeadamente, distorção de sinal e transmissão de ruído, estão sempre presentes. Distorção de sinal é a eliminação de uma parte do conteúdo espectral do sinal por uma operação de filtragem. A transmissão de ruído é a remoção incompleta do ruído por um processo de filtragem.

O método de ajuste polinomial calcula a superfície matemática que dá o melhor ajuste para o campo de gravidade dentro de limites específicos. Esta superfície é considerada a anomalia da gravidade regional. A anomalia residual é obtida subtraindo-se o campo regional a partir da anomalia Bouguer. Deste modo, a anomalia regional de ordem n é equiparada a um polinômio de mesmo grau. Para graus menores de n , a diferença entre a anomalia regional e a anomalia Bouguer é maior. Com o aumento progressivo da ordem polinomial, a anomalia regional tende a se ajustar à anomalia Bouguer (KOUMETIO *et al.*, 2014).

3. RESULTADOS E DICUSSÕES

Os resultados do levantamento gravimétrico são apresentados através de mapas e perfis de anomalia da gravidade, todos gerados através do *software "Oasis montaj" da Geosoft, versão v 8.5.5* disponível no LAIG.

Com base nos comentários anteriores e após vários testes foi aplicado à anomalia Bouguer um filtro polinomial do segundo grau, a partir do qual se obteve o mapa da anomalia residual (Figura 6).

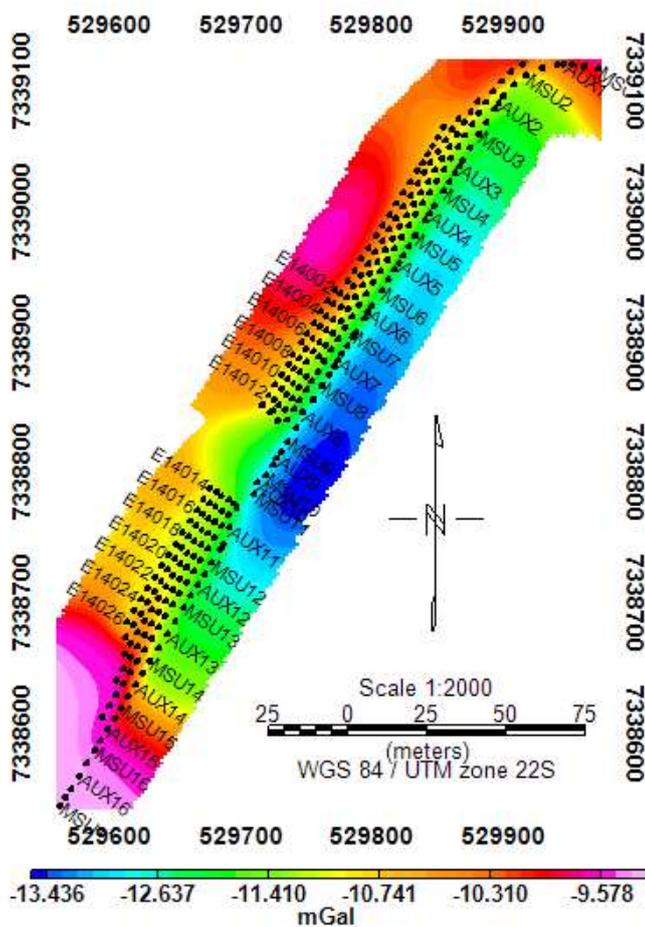


Fig. 5 - Mapa da anomalia Bouguer.

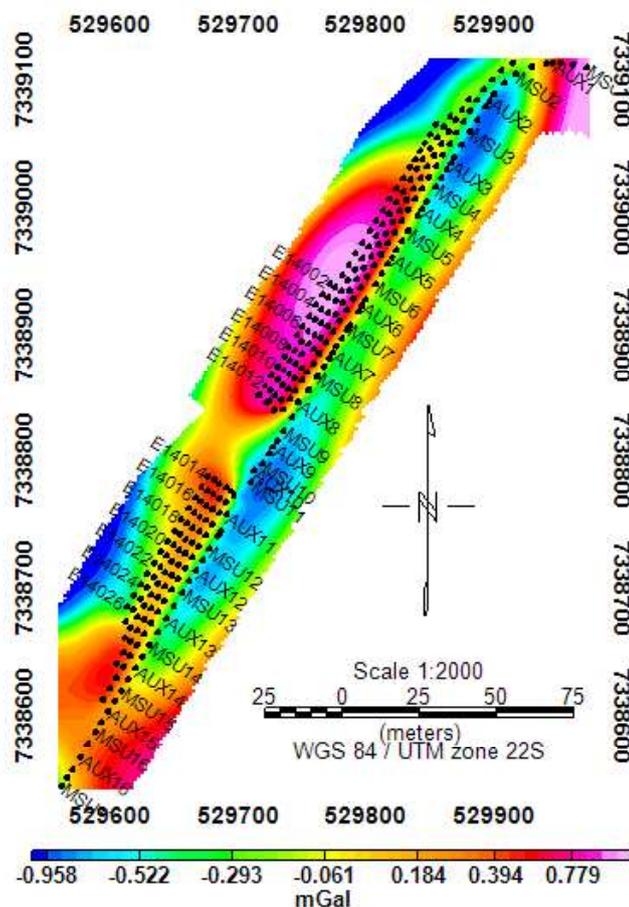


Fig. 6 - Mapa da anomalia residual.

O mapa da anomalia residual apresentado na Figura 6 mostra várias anomalias negativas. As principais estão situadas na ombreira direita (região NE) e no vertedouro (região central), enquanto as menos expressivas se localizam na ombreira esquerda (região SW). Embora o concreto CCR seja um material heterogêneo, com densidade que varia de aproximadamente 2,3 a 2,6 g/cm³ (Andriolo, 1989), valores que pressupõem o aparecimento somente de anomalias residuais

positivas, tal fato não se verificou, possivelmente pela variação da densidade do CCR em função da umidade do mesmo.

Este cenário remete os resultados a uma análise perfil a perfil sobre a barragem, buscando identificar com maior precisão o posicionamento das anomalias.

Assim, a Figura 7 mostra os perfis de anomalias residuais da rodovia e de todos os degraus.

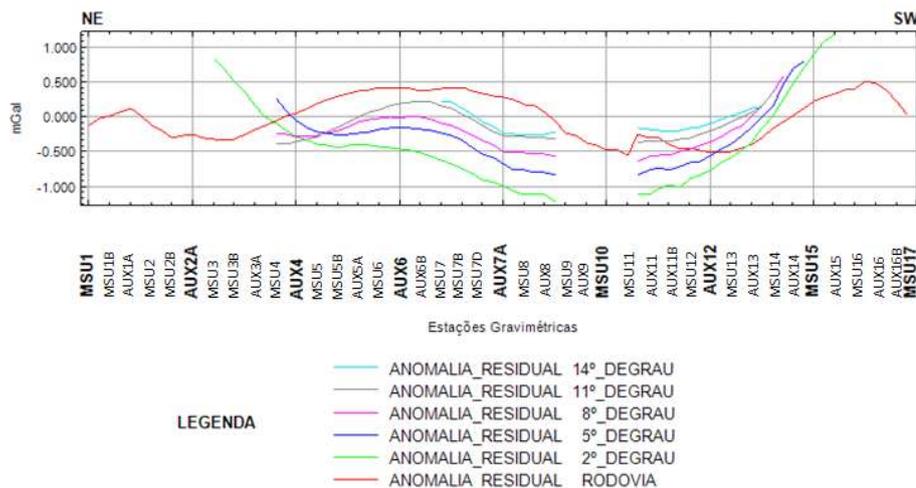


Fig. 7 - Perfis de anomalias residuais sobre a rodovia e degraus a jusante da barragem.

Para os perfis dos degraus, a anomalia regional foi determinada pela aplicação de um filtro polinomial do 1º grau, com exceção dos perfis do décimo primeiro degrau e da crista da barragem (rodovia) onde foi empregado um filtro do 2º grau. Finalmente, a anomalia residual foi obtida pela subtração entre a anomalia Bouguer e a anomalia regional.

Na Figura 7 observa-se que o perfil da crista da barragem (rodovia, com altitude de 637,80m) apresenta duas anomalias negativas, nomeadamente na ombreira direita (região NE) entre as estações AUX1A e MSU4 e na ombreira esquerda (região SW) entre as estações AUX8 e AUX14.

No perfil do 2º degrau (com altitude de 624,93m) nota-se uma tendência de anomalias negativas na ombreira direita (região NE), entre as estações AUX3A e MSU5B em correspondência a comportamento semelhante, entre as estações MSU4 e MSU5B do 5º degrau (altitude de 617,73m).

Na região central nota-se, em todos os degraus, uma tendência de anomalias negativas a partir da estação AUX7A, passando pelo vertedouro

(sem amostragem entre as estações AUX8 e AUX11) até a estação MSU15 (região SW).

Por outro lado, observa-se em todos os degraus, entre as estações MSU5 e AUX7A (região NE), um alto gravimétrico, o qual é mais representativo nos degraus 11º, 8º e 5º (Figura 7), com altitudes de 603,32m, 610,52m e 617,73m, respectivamente.

As anomalias negativas na ombreira direita (região NE) configuram um baixo gravimétrico que pode estar associado ao canal de adução aberto para o desvio do rio na época da construção da barragem. Este canal foi posteriormente fechado com concreto convencional, cuja densidade, em torno de 2,4 g/cm³, é inferior a do material envolvente (CCR), com densidade próxima de 2,5 g/cm³. As anomalias negativas na região central configuram baixos gravimétricos que podem ser explicados pela presença d'água no vertedouro, em adição ao incremento da saturação do CCR, como decorrência do maior acúmulo de água no reservatório. Já o alto gravimétrico da ombreira direita (região NE) pode refletir o CCR menos saturado, ou mesmo estar associado aos diques de diabásio (densidade

média de 2,78 g/cm³), que são comuns em toda a área de estudo (CASTRO *et al.*, 2008).

4. CONCLUSÕES

Tendo em consideração a densidade do CCR, as anomalias negativas na ombreira direita (região NE) sobre a barragem da Usina Hidrelétrica de Mauá podem configurar indícios de saturação do concreto convencional utilizado no fechamento do canal de adução.

Na região central, os baixos gravimétricos devem refletir principalmente a presença de água no vertedouro e, secundariamente, o concreto saturado.

Por fim, os altos gravimétricos da ombreira direita (região NE) podem ser explicados pelo concreto menos saturado, ou pelos diques de diabásio associados ao Arco de Ponta Grossa.

Para compreender melhor os possíveis efeitos de saturação do CCR, sugere-se a realização de outras campanhas em épocas diferentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRIOLO, F. R. **The Use of Roller Compacted Concrete**. São Paulo: Oficina de Textos. 584p, 1998.

BATISTA, E. L.; GRAÇA, N. G.; FARIAS, L. A., Bittencourt, R. M. Porosity studies for roller compacted concrete = roller compacted concrete dams, - **Fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete (Rcc) Dams: MADRID**, 2003.

CASACA, J.; HENRIQUES, M. The Geodetic Surveying Methods in Monitoring of Large Dams in Portugal. **FIG XXII International congress**: Wahington D.C. USA. 12p, 2002.

CASTRO, L. G.; FERREIRA, F. J. F.; ANGULO, R. J. Modelo Gravimétrico-Magnético do Gráben de Paranaguá – PR, Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**, 26(3): p. 273-292, 2008.

COSTA, W. D. **Geologia de Barragens**. São Paulo: Oficina de textos. 352p, 2012.

DA CRUZ, W. **Integração de dados de Monitoramento de Estruturas Antrópicas. Estudo de caso: UHE de Mauá**. Tese de Doutorado. Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná. 145p, 2015.

FIGUEIRA, I. F. R., RIVAS, R. S. Z., SOARES, M. A. Geological mapping and foundation geomechanics characterization for the identification places for detailed monitoring in plants maintenance. In: **Second International Dam World Conference. Proceedings**. LISBOA: LNEC. v. 01. p. 669-676, 2015.

GRAÇA, N. L. S. S. **Validação da Determinação de Deslocamentos Relativos em Obras de Engenharia Obtidos com Técnica Geodésica e Medidores Triortogonais de Juntas**. Dissertação de Mestrado – Curitiba, 2014.

GEMAEL, C. **Introdução à Geodésia Física**. Curitiba, Editora da UFPR. 389p, 2012.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; IAN, H. **Geofísica de Exploração**. Michael Brooks, Ian Hill; Tradução Maria Cristina Moreira Coelho. São Paulo: Oficina de Textos. 438p, 2009.

KNODEL, K.; LANGE, G.; VOIGT, H. J. **Environmental Geology. Handbook of Field Methods and Case Studies**. Hannover, Springer, 1358p, 2007.

KOUMETIO, F.; NJOMO, D.; TATCHUM, C. N.; TOKAM, A. P. K.; TABOD, C. T.; DICOUM, E. M. Interpretation of Gravity Anomalies by Multi-Scale Evaluation of Maxima of Gradients and 3D Modelling in Bipindi Region (South-West Cameroon). **International Journal of Geosciences**. p. 1415-1425, 2014.

LACERDA, D.; CABRAL, D.; MATHIAS, H.; LEMOS, M.; RIVELINO, R. **Fatores que determinaram o CCR – Concreto compactado com rolo como material para o projeto estrutural da Barragem da UHE Peixe Angical**. Trabalho final de graduação, Universidade católica de Goiás. 32p, 2006.

LOWRIE, W. **Fundamentals of Geophysics**. Cambridge University Press, New York. 381p, 2007.

MILSOM, J. **Field Geophysics**. The Geological Field Guide Series. Wiley, 3^a edição. 232p, 2003.

NABIGHIAN, M. N.; ANDER, M. E.; GRAUCH, V. J. S.; HANSEN, R. O.; LAFEHR, T. R.; LI, Y.; PEARSON, W. C.; PEIRCE, J. W.; PHILLIPS, J. D.; RUDER, M. E. **Historical Development of the Gravity Method in Exploration**. Society of Exploration Geophysicists, 70.6, p. 33-61, 2005.

- PATERSON, N. R.; REEVES, C. V. **Applications of Gravity and Magnetic Surveys**. Society of Exploration Geophysicists, v. 50, p. 2558-2594, 1985.
- PCA. **Bonding Roller Compacted Concrete Layers**. Concrete Information. Skokie, USA: Portland Cement Association, p. 33-45, 1987.
- SILVA, R. N. F.. **Avaliação do método de nivelamento, técnica Leap-Frog, na determinação de recalque em grandes estruturas: Estudo de caso para a UHE de Mauá**. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná. 112p, 2012.
- TORGE, W. **Gravimetry**. Walter de Gruyter: Berlin and New Work. 465p, 1989.
- TORGE, W. **Geodesy**. Walter de Gruyter: Berlin and New Work. 264p, 1991.
- WENDLER, A. P. **Estudo Experimental do Concreto Compactado a Rolo Enriquecido com Calda de Cimento para Face de Barragens de Concreto**. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Construção Civil, Setor de Tecnologias. Universidade Federal do Paraná. 115p, 2010.