

Análise de Risco de Colapso Cárstico na Zona Urbana e Periurbana de Lapão

Emerson S. M. dos Santos¹, Raymundo W. S. Silva², Edson E. S. Sampaio¹, Ernesto F. A. Silva², Mario D. Monteiro³,
¹IGEO/CPGG/UFBA, ²Companhia Baiana de Pesquisa Mineral, ³Galvani Indústria Comércio e Serviços S.A.I

Copyright 2009, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, August 24-28, 2009.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

The large extent of the underground dissolution of limestones in the Irecê Basin resulted in danger of collapse of coves in the urban and peri-urban area of the city of Lapão in the beginning of October /2008.

After a preliminary in the situ observation, gravity and electro-resistivity surveys were carried out in order to map the concealed curves and help to determine the level of groundwater within them the results provided useful information both for the immediate safety of the population and for subsequent hydrological and geotechnical work.

Introdução

O município de Lapão, posicionado na região centro-norte do estado da Bahia, tem seu substrato geológico constituído por rochas carbonáticas de idade neo-proterozoica, referenciadas na literatura geológica ao Grupo Una - Bambu (Monteiro, 1996). Este substrato é constituído por carbonato de cálcio e carbonato de magnésio, os quais apresentam níveis elevados de solubilidade à ação de águas pluviais. Isto resulta em um processo contínuo de carstificação e no desenvolvimento de solos com propriedades agrônômicas bastante realçadas, que favorece a atividade agrícola, principal atividade econômica da região.

Face à má distribuição e baixa pluviosidade ao longo do ano, a água demandada pela atividade agrícola é toda aduzida da subsuperfície através de perfuração de poços tubulares. Estima-se a adução de 120.000m³ de água por dia na região de Lapão. Estes volumes aduzidos atestam as grandes dimensões dos processos de dissolução e carstificação em subsuperfície, que resultaram em risco de colapso cárstico de cavernas no início de outubro 2008. As Figuras 1 e 2 ilustram o surgimento de rachaduras ao longo de ruas, casas e no solo, no perímetro urbano da cidade de Lapão.



Figura 1-Vista das rachaduras no calçamento da rua Sócrates de Meneses



Figura 2 – Desenvolvimento da rachadura na superfície do terreno na área do Sr. Gildásio S. Paiva.

O executivo municipal acionou, concomitantemente, o Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo (IPT/SP) e a Defesa Civil do Estado da Bahia com vistas a determinar a extensão e a dimensão do ocorrido, visando adotar medidas para prevenir e resguardar a população nas áreas de risco. O Relatório Técnico do IPT/SP (Azevedo, 2009) foi repassado à Companhia Baiana de Pesquisa Mineral (CBPM) pela prefeitura de Lapão. Como resultado de observações preliminares no campo e análise do referido relatório, a CBPM entendeu ser necessária a execução de levantamentos geofísicos terrestres para compreensão dos abatimentos ocorridos. Após contato com o Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia (IGEO-CPGG/UFBA) foi definida a realização de Levantamento Gravimétrico e de Eletroresistividade. Os trabalhos contaram também com a parceria da Galvani Indústria Comércio e Serviços S.A.

Realizamos os seguintes trabalhos: (1) mapeamento de rachaduras e trincas no terreno e em edificações na zona urbana de Lapão pelo IPT-SP; (2) levantamento geodésico por estação total para produção de dados cartográficos pela CBPM; (3) levantamento gravimétrico para caracterizar as cavidades, a partir da discriminação de diferenças entre as densidades de massa do calcário e das cavidades, executado pelo CPGG/UFBA e CBPM;

(4) levantamento de sondagem elétrica, para discriminar as diferenças de resistividades elétricas entre o calcário e os vazios preenchidos com água mais carbonatada, realçando as cavidades, bem como auxiliar na avaliação da profundidade do nível freático, executado pelo CPGG/UFBA e pela CBPM.

O presente manuscrito constitui uma síntese e análise dos trabalhos realizados no perímetro urbano da cidade de Lapão, que investigaram a ocorrência do colapso cárstico.

Geologia Regional e Local de Lapão

A região de Lapão insere-se no domínio geomorfológico da Chapada Diamantina Central, a leste do rio São Francisco, no contexto geológico da Bacia de Irecê (Souza, et al, 1991). Está posicionada em um extenso altiplano, com altitude média entre quinhentos e oitocentos metros acima do nível do mar. Essa bacia constitui um subdomínio tectônico de ocorrência de uma seqüência sedimentar de cobertura plataformal, predominantemente carbonática, dobrada, de baixo grau de metamorfismo e pertencente ao Grupo Una. O mesmo é correlacionável ao Grupo Bambuí de idade neoproterozoica e constituído por uma seqüência basal de sedimentos clásticos e pelíticos da Formação Bebedouro e, no topo, pela seqüência de sedimentos predominantemente carbonáticos com intercalações de pelitos marinhos da Formação Salitre (Figura 3).

A configuração da Bacia de Irecê reflete o arcabouço tectônico superimposto às rochas do Supergrupo Espinhaço. Predominam na região de Lapão, dobras com eixos E-W, com planos axiais, em geral, verticais ou com mergulhos fortes para norte ou para sul, sendo também comum, micro- e meso-estruturas de interferência dos dois sistemas, gerando padrões de interferência dos tipos *domos*, *bacias* e *eyed folds*, ocorrendo no perímetro urbano de Lapão, dobras bastante apertadas do tipo *chevron*.

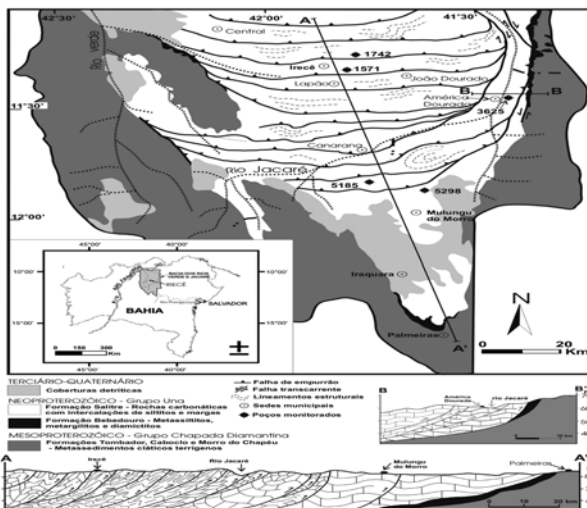


Figura 3- Esboço Geológico da Bacia de Irecê

A região de Lapão, constante da Região Irecê, SC-24-Y-C-I, é referenciada a um ciclo transgressivo de deposição e está inserida na seqüência carbonática da Formação Salitre. A característica marcante dos litotipos na região de Lapão é a intensa dolomitização. Ela é constituída por *fácies* intensamente neomorfizadas de calcários e dolomitos e, secundariamente, *fácies* margosas (Figura 4). Também ocorrem *fácies* de ritmito, constituídos por alternância de estratos de calcarenitos e de dolarenitos, ou níveis milimétricos de pelito de cor avermelhada (Figura 5).



Figura 4 - Dolomito cinza-claro fraturado



Figura 5 - Ritmitos neomorfizados, com processo de carstificação

No desenvolvimento da carstificação, a exposição do substrato às soluções aquosas inicia o processo de dissolução na superfície, com início de desenvolvimento de estruturas em *lâpis* (Figura 6), ou na subsuperfície, a partir de fraturamento, originando as cavidades. A intensidade e velocidade do processo aumentam quando conjugadas a fraturamentos, onde a solução aquosa penetra pela fratura alcançando grandes profundidades, solubilizando o carbonato e propiciando o surgimento de grandes cavidades.



Figura 6 - Dolomito fraturado, com desenvolvimento de estrutura em lâpis, carstificado

Ao longo do tempo, estas cavidades subterrâneas se avolumam em número e em tamanho, alcançam grandes dimensões e perdem a estabilidade sofrendo colapso. No terreno, são facilmente reconhecidas por causa das dolinas: regiões deprimidas circulares a alongadas. As aberturas, ao nível da superfície, constituem os sumidouros. Estes são os locais onde as águas pluviais adentram ao maciço rochoso, áreas de recarga natural do sistema de circulação subterrânea.

No município de Lapão, tanto na área urbana como nas áreas periurbana e rural, são reconhecidas diversas dolinas e sumidouros.

Estruturalmente, na região de Lapão, é observado um grande eixo de dobramento regional de direção E-W, com plano axial subvertical desenvolvendo intenso fraturamento naquela direção, com fortes mergulhos predominantemente para N. A conjugação destes componentes, deposicional e tectônico, vem favorecer o desenvolvimento das estruturas cársticas nesta região.

Gravimétrica e Perfilagem Elétrica

Empregamos um gravímetro CG-5 no levantamento gravimétrico e plotamos os dados na base cartográfica produzida pela CBPM, a partir de um levantamento geodésico com GPS diferencial de duas frequências e de Estação Total. Planejamos os dois levantamentos com base na imagem de satélite da cidade de Lapão (Figura 7).

A gravimetria constituiu três sublevantamentos (Figura 8). Microgravimétrico, (malha de 2m) com o objetivo de imagear em detalhe a subsuperfície da zona central da cidade, com registros de abalos, por se tratar da zona de maior risco de prejuízo material e danos pessoais (em negrito na Figura 7). Perfis estratégicos (malha de 25m) realizados com o objetivo de imagear a subsuperfície de uma dolina, e sua relação com duas fraturas de direção N-S e a relação com trincas em paredes de casas. Malha urbana e suburbana (malha de 50m) com objetivo de imagear a subsuperfície da cidade, de modo mais amplo, identificando zonas de maior ou menor risco de cavernas, e se estas se estendem para além da área do levantamento.

Processamos os dados gravimétricos em planilha Excel, em conformidade com as recomendações de Hinze et al (2005) e efetuamos a modelagem dos dados gravimétricos residuais com software próprio, com base em modelos 3-D (Plouff, 1976).

Empregamos um sistema SYSCAL Pro no levantamento de eletrorresistividade. Executamos o mesmo em perfis selecionados a partir do levantamento gravimétrico: linhas L2, L5, L7 e L8 - região da Praça da "Fonte de Lapão" e circunvizinhanças - com emprego de dipolos de 6 metros de tamanho; linhas L9, L11, L12, B e I, com dipolos de 25 metros de tamanho.

Processamos os dados das ER-SEH (sondagem elétrica horizontal de eletrorresistividade) e os representamos na forma de pseudoseções com o emprego do módulo IP do software *Oasis Montaj*TM. A modelagem inversa dos dados de resistividade aparente, com o emprego do software *Zonge 2-D Inversion for Interativ*TM IP, obedeceu os resultados de Wannamaker (1992).



Figura 7 - Imagem da região urbana e periurbana de Lapão com delimitação da área com levantamentos geofísicos

Resultados Obtidos na Área da Fonte de Lapão e circunvizinhanças:

O levantamento microgravimétrico na região central da Praça da "Fonte de Lapão" e circunvizinhanças (Linhas L1 a L9) produziu o mapa Bouguer da Figura 8, com intervalo de contorno de 0.050 mGal. Nele estão realçadas as partes solubilizadas e carstificadas em azul e as linhas levantadas com espaçamento de 2m em vermelho. A modelagem gravimétrica forneceu uma

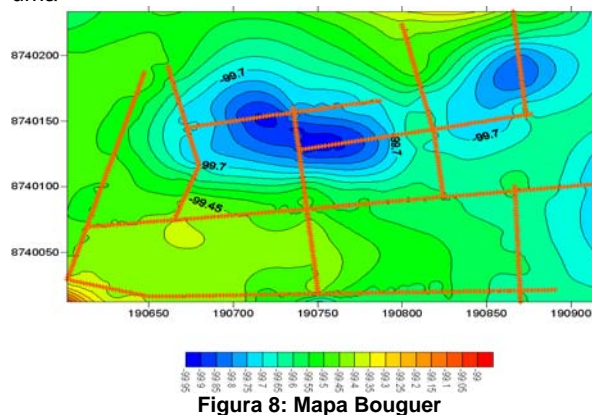


Figura 8: Mapa Bouguer

idéia aproximada das dimensões das principais cavernas, ressaltando seus limites laterais e as profundidades de seus topos. No primeiro caso, por tratar-se de dados menos sensível às massas, ou déficit delas, localizadas mais distantes - no caso as partes mais profundas das cavernas. No segundo caso, porque cada caverna pode conter em sua parte basal uma quantidade variável de água ou de material pouco agregado. De fato, se o

contraste negativo de densidade for menor em valor absoluto do que o preconizado pela modelagem, maior será a profundidade das bases. Considerando essas limitações, determinamos as características das três cavidades da área central. Núcleo ocidental – contraste de densidade de $-1,80 \text{ g/cm}^3$, topo a 4,0m, base a 10m, dimensões: 35m E-W por 40m N-S. Núcleo central – contraste de densidade de $-1,80 \text{ g/cm}^3$, topo a 4m, base a 10m, dimensão: 55m E-W por 15m N-S. Núcleo oriental – contraste de densidade de $-1,50 \text{ g/cm}^3$, topo a 6m, base a 12m, dimensão: 30m E-W por 15m N-S.

Na mesma região central, os perfis elétricos das Linhas L2, e L5 mapearam a parte da caverna saturada com água, contendo solução salina, proveniente da dissolução dos carbonatos. Na Figura 9 (Linha L2), está bem evidente a presença de uma zona de contato entre a rocha maciça e essa zona saturada com água, na coordenada 75. Esta zona de contato tem um mergulho aparente de aproximadamente 30° para norte. A análise da figura 10 (Linha L5) mostra que a rocha é maciça a partir da coordenada -110 para sul. Da coordenada -65 para o norte há uma zona condutora correspondente à mesma região da linha L2, com exceção de uma parte rasa eletricamente resistiva.

Como ilustrado na Figura 11, o levantamento gravimétrico constou da realização de perfis com direções N-S (L9) e WNW-ESE (L10 e L11) e de eletrorresistividade dos perfis L9, L11 e L12.



Figura 11 – Posicionamento dos sublevantamentos gravimétricos/eletrorresistivos na zona periurbana de Lapão.

A Figura 12 representa o perfil N-S de ER da Linha L9, onde se destaca, claramente, uma zona condutora, que se estende da coordenada -200 à coordenada -410. Esta zona se relaciona a um baixo gravimétrico e ambas as feições geofísicas refletem uma zona de dolina.

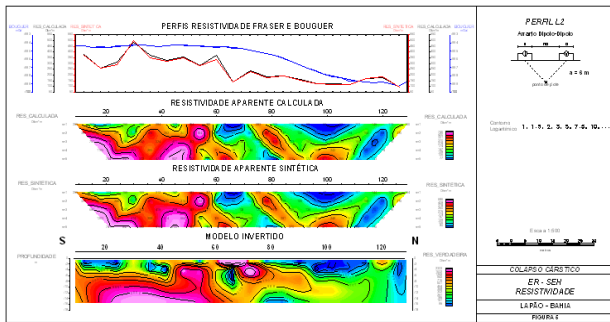


Figura 9: Perfis de resistividade aparente Linha L2

Isto implica numa maior espessura da capa de rocha maciça na linha L5, nesta parte do perfil, em comparação com a linha L2. Assim como na linha L2, o perfil de ER da linha L5 é compatível com o dado gravimétrico.

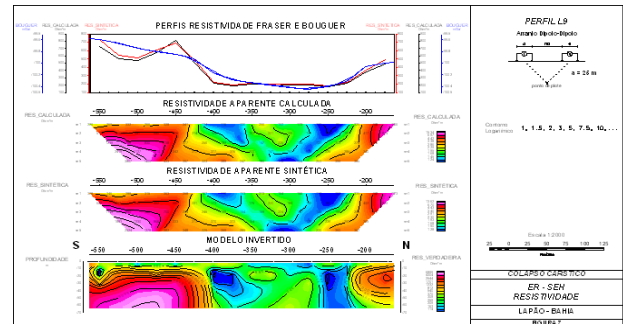


Figura 12: Perfis de resistividade aparente Linha 9

O perfil da linha L12, (Figura 13) mostra uma zona condutora entre as coordenadas 270 e 340, relacionada a um baixo gravimétrico. Esta feição é compatível com a observada na linha L9, correspondendo a uma zona de dolina. Nota-se que a zona condutora citada se prolonga em subsuperfície para sul, entre as coordenadas 170 e 240.

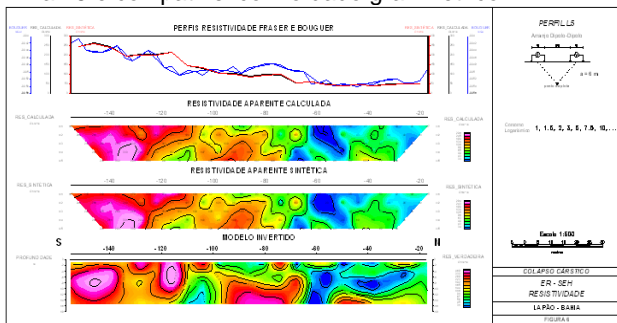
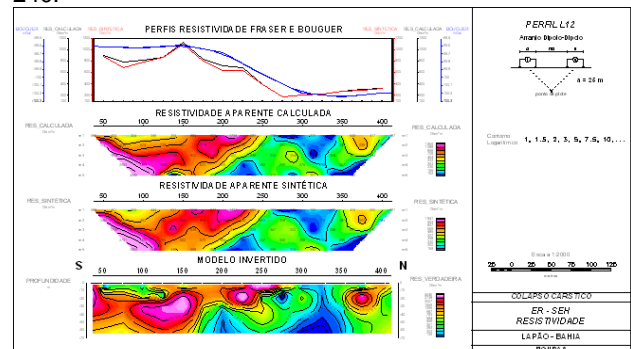


Figura 10: Perfis de resistividade aparente Linha L5



Resultados Obtidos na Zona Periurbana

Figura 13: Perfis de resistividade aparente Linha 12

Com o levantamento gravimétrico realizado, produzimos um Mapa Bouguer, mostrado na Figura 14 sendo realçadas em cores azuis, as dimensões da região solubilizada e carstificada na zona periurbana de Lapão. De maneira idêntica ao que interpretamos na zona urbana da cidade, descrevemos a seguir as principais feições das cavidades subterrâneas correspondentes à grande anomalia central do mapa Bouguer da Figura 14. Núcleo SW – contraste de densidade de $-2,60 \text{ g/cm}^3$, topo a 0,5m, base a 25m, dimensões: 40m E-W por 40m N-S na porção mais rasa e 170m N-S na porção mais profunda. Núcleo central – contraste de densidade de $-2,40 \text{ g/cm}^3$, topo a 2m, base a 12m, dimensão: 40m E-W por 50m N-S. Núcleo NW – contraste de densidade de $-1,00 \text{ g/cm}^3$, topo a 3m, base a 15m, dimensão: 150m E-W por 210m N-S.

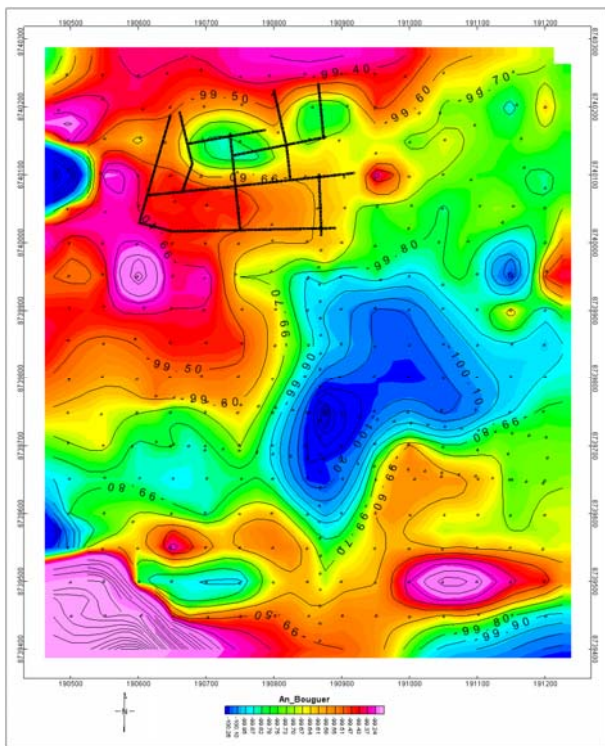


Figura 14: Mapa gravimétrico Bouguer da cidade de Lapão.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A integração dos dados dos levantamentos gravimétricos e de eletrorresistividade, realizados na área urbana e periurbana de Lapão, possibilitou o conhecimento espacial, em subsuperfície, da distribuição das cavidades originadas no processo de carstificação.

Na Figura 15, ilustrada a seguir com a construção de uma pseudo-imagem tridimensional, fica evidente a distribuição destas cavidades subterrâneas na região coberta por aqueles levantamentos.

Os dados de eletrorresistividade reforçaram a análise gravimétrica, principalmente no tocante à distribuição de água na subsuperfície. Assim, ao exame dos dados produzidos pelos levantamentos, consubstanciou-se a configuração das cavidades como apresentado no bloco-diagrama supra, ressaltando cinco áreas. Dentre elas, destacam-se as áreas 1 e 2 como de maiores amplitudes. Na figura 16, estão representadas as áreas de risco, sobre carta-imagem com a atual configuração urbanística da cidade de Lapão. A área 1 (2.500 m^2), está posicionada nas coordenadas $8.741.180 \text{ m N}$ (latitude) e 190.700 m E (longitude), correspondente à região da Fonte de Lapão. A área 2 (27.000 m^2) corresponde à área periurbana.

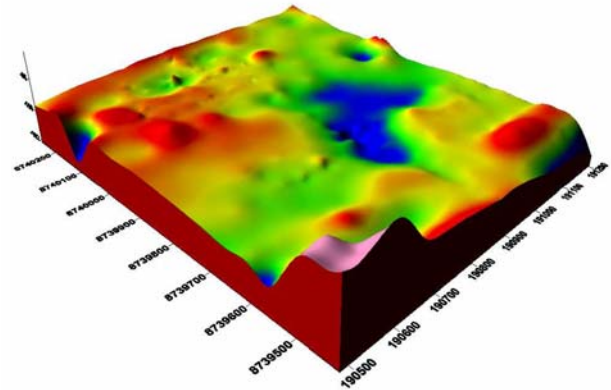


Figura 15- Bloco-diagrama, com base nos valores do mapa Bouguer da figura 14.



POSICIONAMENTO DAS ÁREAS DE RISCO

— Eletrorresistividade + Gravimetria
— Gravimetria

Figura 16: Posicionamento das áreas de risco.

A área 1, na região norte do levantamento e correspondente à Fonte de Lapão, mostra uma evolução do processo de carstificação na direção aproximada E-W, com extensão em torno de 300m. Conquanto o desenvolvimento do processo de carstificação na parte central da cidade seja de intensidade menor, é preciso tomar a devida precaução, principalmente porque o interior de construções pode estar sobre as cavernas. Observa-se que a extremidade W da área perfilada apresenta desenvolvimento cárstico de maior intensidade, necessitando de maiores atenções, com a complementação do levantamento geofísico. Convém registrar que não foram perfilados os interiores das construções.

Na área 2, correspondendo à região periurbana, a noroeste do Loteamento Ida Cardoso, há grande risco de colapso. Esta área, na região sul-sudeste do levantamento, é bastante expressiva quanto a suas dimensões, estando disposta segundo uma direção ENE-SSW, com o desenvolvimento de sua carstificação direcionada para SW, até a extremidade W da área perfilada.

Há um risco muito sério nas construções que ficam na parte noroeste do loteamento Ida Cardoso, bem como na plantação de cebolas dentro de uma dolina. Deve-se evitar o tráfego de veículos pesados, nesta parte da cidade, bem como analisar a possível necessidade de relocar moradores.

A partir de observações, tanto na circunvizinhança da Fonte do Lapão como na parte nordeste da Vila Ida Cardoso, há uma clara relação entre as rachaduras observadas na superfície do terreno com aquelas observadas nas edificações, indicando que estas são decorrentes do desenvolvimento das trincas na superfície do terreno.

Por fim, deve-se ressaltar que o fenômeno de carstificação em bacias carbonáticas é um processo natural, sempre resultando da solubilização de carbonato a partir das águas pluviais, sendo, deste modo, conveniente a execução de estudos geológicos, geofísicos e hidrogeológicos em domínios de terrenos calcários, focando inicialmente áreas urbanas com maior densidade populacional, como forma de prevenção ao risco de colapso cárstico, bem como buscando conhecimento do comportamento hidrodinâmico do aquífero subterrâneo.

Agradecimentos

Agradecemos ao técnico Ranilton Figueredo e ao engenheiro Thadeu Nogueira, ambos da CBPM, pela participação na aquisição e representação dos dados e ao Professor Olivar Lima pela cessão do equipamento de resistividade elétrica..

REFERÊNCIAS

Hinze, W., Aiken, C., Brozena, J., Coakley, B. Dater, D., Flanagan, G., Forsberg, R., Hildenbrand, T., Keller, G., Kellogg, J., Kucks, R., Li, X., Mainville, A., Morin, R., Pilkington, M., Plouff, D., Ravat, D., Roman, D., Fucugauchi, J., Véronneau, M., Webring, M. and Winester, D., 2005, New standards for reducing gravity data: The North American gravity database. *Geophysics*: vol.70, PJ25-J32.

IPT-SEÇÃO DE GEOTECNIA, 2009, Análise das causas das trincas e das rachaduras do terreno e em edificações na área urbana do município de Lapão.

Monteiro, M. D., 1996, Projeto fosfato supergênico, Salvador: CBPM, Relatório do Convênio SME-CBPM.

Plouff, D., 1976, Gravity and magnetic fields of polygonal prisms and application to magnetic terrain corrections: *Geophysics*, 41 p727-741.

Souza, S. L., de Brito, P. C. R., Fróes, R. J. B. e Silva, R. W. S., 1991, Projeto análise faciológica e metalogenética da Bacia de Irecê. Salvador: CBPM, Arquivos Abertos.

Wannamaker, P.E., 1992, IP2DI-v1.00: Finite element program for dipole-dipole resistivity/IP forward and parameterized inversion of two-dimensional earth resistivity structure: Univ. of Utah Research Inst. Rept. ESL-92002-TR.