



Interpretação geofísica com o uso do método CSAMT através da inversão 2-D na exploração de kimberlitos, Brasil

La Terra, Emanuele F.¹(*), Menezes, P.T.L.², Fontes, S. Luiz¹, Germano, Carlos, R.¹, ON/MCT¹, DGAP/FGEL/UERJ-Petrobras², Brasil

Copyright 2008, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no III Simpósio Brasileiro de Geofísica, Belém, 26 a 28 de novembro de 2008. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do III Simbórgo, mas não necessariamente representa a opinião da SBGF ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGF.

Abstract

Controlled-source audiofrequency magnetotelluric (CSAMT) survey was carried out at a known outcropping pipe in Minas Gerais State, Brazil. A total of 54 CSAMT sounding were taken with irregular grid spacing of 50 up to 100 m along two north-south and one west-east profiles. The purpose of the measurements is to delineate a detailed resistivity structure and location of electrical discontinuities that may reflect a pipe and volcanic crater. The CSAMT measurements were conducted at a distance of 3 km up to 5Km away from a transmitter using far-field mode. Applying two-dimensional (2-D) magnetotelluric (MT) inversions analysis of both TE and TM data. The interpretation results based on 2-D inversions show that there are some electrical discontinuities found in center of the area at each profile defined the existence of a low-resistivity body associated which correlate with the main pipe may exist. Our results drove the subsequent drilling program by the mining company.

Introdução

O diamante é um mineral raro com estrutura cristalina cúbica e composto por um único elemento químico, o carbono. Sua grande importância advém do fato de que o diamante pode ser aproveitado economicamente tanto na indústria quanto na joalheria. Os diamantes ocorrem na natureza em uma série de rochas tais como sedimentos consolidados ou inconsolidados, rochas metamórficas, meteoritos e naturalmente em kimberlitos e lamproitos. As ocorrências em rochas metamórficas e em meteoritos são raras e consideradas não econômicas. *Placers* sedimentares e *paleoplacers* são depósitos secundários e constituem as principais ocorrências brasileiras. Kimberlitos e lamproitos formam importantes jazidas primárias em todo o mundo, menos no Brasil.

Quando se tem o objetivo da exploração mineral para diamantes primários é na realidade um processo indireto, em que se busca identificar o corpo kimberlítico, isto porque, mesmo nos kimberlitos mais enriquecidos, os diamantes ocorrem imersos em um grande volume de massa da rocha, concentrações típicas podem chegar a cerca de 1ppm (Hausel et al., 1979).

A partir do final do século 20, devido a uma série de fatores tais como avanço tecnológico em diversas áreas; computadores, equipamentos e *softwares* houve uma crescente demanda pela utilização de métodos geofísicos na prospecção e exploração mineral (Nabighian e Asten, 2002), em artigo especialmente encomendado para a revista *Geophysics* da SEG (*Society of Exploration Geophysics*).

Tradicionalmente a prospecção mineral é realizada com o emprego de levantamentos geológicos, geofísicos e geoquímicos.

Estes últimos incluem a amostragem de sedimentos de correntes e concentrado de bateia (Pereira, 2003) visando à identificação de minerais satélites do diamante tais como a ilmenita magnésiana, cromo-pirolo, granada-pirolo, cromo-diopsídio, espinélio e zircão.

Os principais métodos geofísicos utilizados na exploração são o magnético (Keating e Sailhac, 2004), o eletromagnético (Smith et al., 1996) e o gravimétrico (Vasanthi e Mallick, 2005), em virtude do quase sempre verificado alto contraste de susceptibilidade magnética, resistividade e densidade entre os kimberlitos e suas encaixantes.

Os métodos eletromagnéticos são muito utilizados no "follow up" com destaque para os métodos TEM (Nabighian and Macnae, 1991) e HLEM (Spies and Frischknecht et al. 1991). Atualmente, o método CSAMT ainda é pouco utilizado devido a sua complexidade operacional, maior tempo na aquisição dos dados e processamento mais complexo, de modo que necessita maior preparo das equipes que irão utilizá-lo, mas tem a vantagem de prover a mais completa figura em subsuperfície com informações tridimensionais (3-D).

No presente trabalho foi aplicado o método CSAMT para estudar o corpo kimberlítico denominado de Régis que a fica no sudoeste do Estado de Minas Gerais, próximo a cidade de Carmo do Paranaíba. O kimberlito Régis possui uma cratera de cerca de 120 ha de superfície é conhecido desde a década de 70 em estudos realizados pela DeBeer.

Os estudos realizados pela SAMSUL Mineração Ltda, detentora dos direitos minerais do corpo, englobam a cartografia e levantamentos geológico, geoquímico e magnetométrico. Estes permitiram a diferenciação faciológica do kimberlito tendo como destaque uma zona de aproximadamente 20 hectares na região central da cratera e modelo o geológico proposto, mas não testado, de uma estrutura em diatrema.

A aplicação do método CSAMT no kimberlito Régis tem como objetivo investigar a estrutura desde a subsuperfície, até determinada profundidade e a

definição, ou não, do modelo geológico proposto anteriormente. Para tal, foram realizados três perfis cortando todo o kimberlito, sendo dois na direção Norte-Sul e um na direção Leste-Oeste. As estações CSAMT foram coletadas, na sua grande maioria, em intervalos de 50 a 100 m ao longo de cada perfil. A faixa de frequência utilizada foi de 10Hz a 100KHz, suficiente para investigações de 5 a 400 metros de profundidade. O presente trabalho deu subsídio para a locação de furos de sondagens que atingiram o conduto vulcânico principal.

Geologia das rochas kimberlíticas

O termo kimberlito foi proposto por Lewis em 1870 para descrever rochas vulcânicas ultrabásicas de um diatrema em Kimberley, África do Sul. O kimberlito é uma rocha híbrida de composição extremamente variada composta por magma de origem profunda. O controle da distribuição de kimberlitos em uma determinada região é baseado na reativação zonas de fraqueza da crosta pré-existentes (Dawson, 1980).

O magma kimberlítico é formado em profundidades médias de 150Km sob zonas cratônicas antigas. Tipicamente, os diamantes que são transportados pelo magma kimberlítico, se formam com pressões superiores a 40Kbars, a 1000°C e profundidade de 125Km.

O kimberlito é considerado apenas um veículo para transporte do material do manto, incluindo xenólitos de rochas ultrabásicas, eclogíticas e o diamante e ocorrem principalmente em diatremas ou pipes, diques e ocasionalmente em sills.

Os diatremas possuem forma característica em cenoura (cone vertical), como pode ser visto na figura 1.

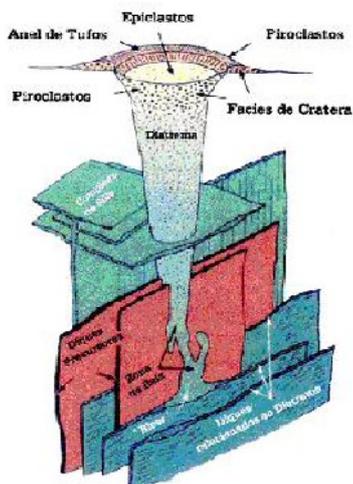


Figura 1 – Modelo de um diatrema kimberlítico, (Skinner, 1986).

Os Kimberlitos com ocorrências de diamantes encontram-se, normalmente, em áreas cratônicas

estáveis há mais de 1500Ma. Desses, somente 1% dos pipes conhecidos são economicamente mineralizados (Dawson, 1983).

Existem três ambientes geotectônicos de formação do diamante em kimberlitos e um em lamproítos de acordo com a Tabela 1 abaixo e a representação gráfica apresentada na figura 2.

TIPO DE CONDUTO	AMBIENTE GEOTECTÔNICO	MINERALIZAÇÃO	IDADE
K1	Cinturões móveis	Estéreis ou fracamente mineralizados	<1500Ma
K2	Borda de cráton	Mineralizados mais inferiores ao K3	>1500Ma
K3	Parte central do cráton	Mineralizados com altos teores	>1500Ma
L1	Cinturões móveis	Mineralizados com médios teores	>1500Ma

Tabela 1 – Ambientes geotectônicos com ocorrência de diamantes.

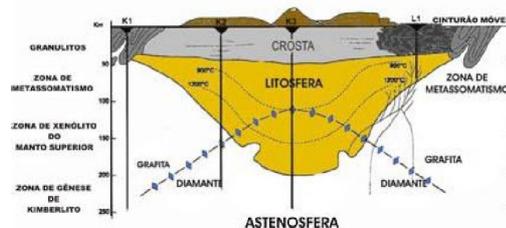


Figura 2 – Diagrama esquemático da astenosfera subcontinental, apresentando a relação da curva de estabilidade diamante/grafita com a litosfera. Os condutos K1, K2 e K3 são típicos para kimberlitos. L1 é para lamproítos (modelo simplificado de Haggerty, 1986).

De uma maneira geral, de todas as hipóteses que tentam justificar o controle da distribuição dos kimberlitos e lamproítos, como por exemplo: hot spots (Crough et al, 1980; Hastings & Sharp, 1979), extensão das fraturas oceânicas nos continentes (Willians & Willians, 1977; Haggerty, 1986), zona de subducção de placas oceânicas (Helmstaedt & Gurney, 1984), flexuramento intracratônico (Arsenyev, 1962), a que melhor explica é a de zonas preexistentes de fraqueza, que quando reativadas, servem como condutos para "eventos kimberlíticos e/ou lamproíticos" (Sykes, 1978; Mitchel, 1986; Almeida, 1986).

Contexto Geológico

A província alcalina do Brasil meridional tornou-se alvo

de diversos trabalhos científicos, devido não somente ao seu importante valor econômico, bem como, pela sua petrologia clássica. Levantamentos geológicos regionais mostram estruturas regionais de grandes proporções que formam pelo menos dois alinhamentos distintos um com direção NE e outro NW ambos associados a grandes fenômenos geológicos iniciados de separação do Gondwana no Jurássico Superior (Hertz, 1977) e (Asmus, 1978).

Ulbrich e Gomes (1981) definiram nove províncias petrográficas para rochas alcalinas do Brasil Meridional sendo que as mais importantes para este trabalho são as que estão associadas às intrusões kimberlíticas.

Uma dessas é a Província máfico-ultramáfica de Minas Gerais-Goiás, portadoras de carbonatitos com kimberlitos associados com rochas enriquecidas de Ti, Zr, Nb, P e poucos U e Th. Outra província com ocorrências de kimberlitos situa-se ao sul do Piauí, na região de Gilbués-Monte Alegre do Piauí que estão relacionados ao lineamento Transbrasiliano e apresenta direção N45E (Schobbenhaus et al., 1975).

Uma outra e sendo a mais importante província kimberlítica, contemporânea às intrusões alcalinas do oeste mineiro, situa-se no Triângulo Mineiro (arco do Alto Paranaíba, Ladeira et al., 1971) ocorrendo ao longo de um importante *Trend* tectônico regional de direção N55W também conhecido como 125AZ (azimute 125°) e podem estar associadas às falhas transformantes do Atlântico Sul que seguem pelo continente que limita a atual borda da bacia do Paraná (Bardet, 1977).

Levantamentos geofísicos aeromagnéticos do convênio Brasil e Alemanha, figura 3, promoveram importantes resultados que foram interpretados por Bosun et al., (1975) do lineamento magnético associado ao lineamento 125AZ.

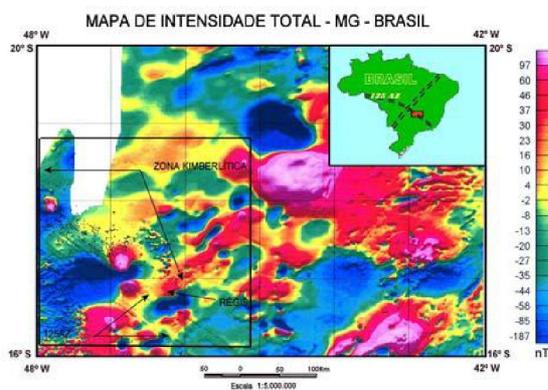


Figura 3 – Mapa aeromagnético de intensidade total (Convênio Brasil e Alemanha, 1975) com zona de ocorrências de kimberlitos no lineamento 125 AZ, com a indicação do alvo Régis, modificado (CPRM, 2004).

Segundo Svisero et al., (1979) e Berbert et al., (1981) estes lineamentos estão associados à falhas profundas

que controlaram as entradas dos materiais do manto. Foram estimados no mínimo 300 corpos kimberlíticos nas regiões de Coromandel, Estrela do Sul, Douradoquara, Patrocínio e Patos de Minas.

A formação desses kimberlitos ocorreu durante o Cretáceo Superior durante um período de intensos episódios magmáticos, com idades variando entre 79,2 a 87,0 Ma (Davis, 1977). A tectônica vertical gerou soerguimento ou levantamento do Alto Paranaíba e a reativação de antigas falhas proporcionaram essas intrusões (Hasui et al., 1976).

Características morfoestruturais e geológicas do Kimberlito Régis

O kimberlito Régis, figura 4, alvo deste estudo, fica situado nesta última província citada anteriormente. Este possui uma seção circular aflorante com diâmetro aproximado de 800m e corta as rochas Subgrupo Paraopeba Indiviso, do pré-cambriano, formadas por filitos (encaixante). Seu corpo possui cerca de 120 hectares e é formado basicamente por fácies que variam de brechas a brechas grosseiras, fácies tufáceas e tufos acamadados. O corpo encontra-se intemperizado formando um solo bastante argiloso de coloração, variando de tons de amarelo ao vermelho. Possui relevo suave em quase toda a área com grau de inclinação superficial menor que cinco graus, sendo que na borda norte esta inclinação é mais íngreme, maior que 30 graus, necessitando um maior espaçamento das estações CSAMT.

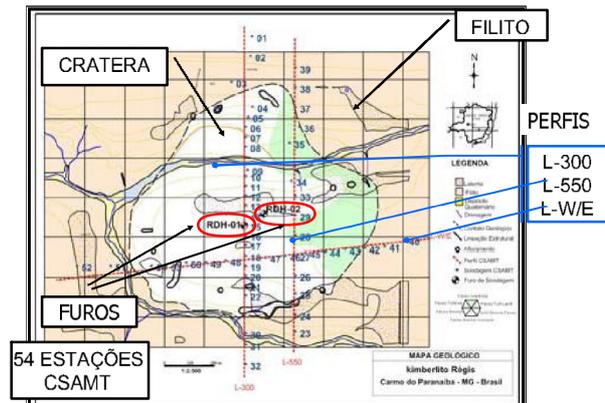


Figura 4 – Mapa geológico simplificado do Kimberlito Régis com a indicação das estações CSAMT e furos de sondagens.

O alvo está praticamente livre de ruídos gerados por altas tensões e cercas metálicas que podem afetar a qualidade dos dados. Algumas edificações encontram-se fora da área onde aflora o kimberlito, não influenciando na qualidade das medidas geofísicas. Um dique básico aflora na borda sudeste. Esparsos afloramentos de lateritas, colúvios e aluviões também são observados na área.

Aquisição e processamento de dados

Um total de 54 estações CSAMT foram coletadas com intervalos que variaram de 50 a 100m ao longo de três perfis lineares cruzando o corpo kimberlítico, figura 4.

Foi usado um equipamento comercial STRATAGEM-EH4 que permite uma alta resolução de imagem da condutividade elétrica da subsuperfície entre 5 e 400m. Os campos elétricos (*E*) e magnéticos (*H*) ortogonais registrados foram alinhados para norte (*Ex*, *Hy*) e leste (*Ey*, *Hx*).

Os canais telúricos (*Ex* e *Ey*) foram medidos com dipolos de 56m em configuração cruzada utilizando estacas de aço como eletrodos. Os campos magnéticos (*Hx*, *Hy*) foram registrados com o uso de bobinas de indução de alta sensibilidade. Os tempos típicos de medidas de cada estações não ultrapassaram 40 minutos em três bandas de frequências na faixa entre 10Hz a 100Hz. As duas bandas de frequências mais baixas utilizam somente fontes naturais de sinais. Entretanto, na banda de altas frequências foi usado um transmissor (TX) portátil de alta potência posicionado entre 3 a 5 *skin depth* de distância do receptor (RX). O uso do (TX) foi necessário para complementar os sinais naturais que na faixa de 1Khz são de baixa amplitude, a denominada, banda morta da faixa AMT. O objetivo de posicionar o (TX) de 3 a 5 *skin depth* do (RX) foi de operar no modo *far-field*. Este modo permitiu que fosse possível utilizar softwares convencionais de processamento MT que trabalham com ondas planas dos sinais eletromagnéticos.

Os elementos do tensor impedância *Z* são calculados no domínio da frequência a partir da relação entre as componentes horizontais dos campos incidentes e induzidos.

$$Z=E/H$$

O tensor impedância é usualmente representado através de dois parâmetros: resistividade aparente (*ρa*) e fase (*φ*).

Para uma terra bidimensional (2-D) os campos eletromagnéticos se decompõem em dois modos distintos de propagação de onda: o modo *TE* (*transversal electric*), no qual o campo elétrico (*E*) possui componente somente na direção (*x*) paralela ao *strike* (*Ex*, 0, 0) e o campo magnético (*H*) associado tenha as componentes na direção (*y*) e *z* (0, *Hx*, *H_z*), e o modo *TM* (*transversal magnetic*), onde o campo elétrico possui componentes na direção (*y*) (ortogonal ao *strike*) e *z* (0, *Ey*, *Ez*), e o campo magnético (*H*) somente na direção *x* (*Hx*, 0, 0).

No presente trabalho os elementos dos tensores foram rotacionados para o *strike* geológico regional N55W definido pelo lineamento geológico conhecido como azimuth 125 ou AZ125 .

Estimativa da resistividade por Inversão 2-D

Os modelos geoelétricos finais foram estimados a partir da análise de inversão 2-D. Esta análise de inversão se baseia na minimização Euclidiana da primeira derivada do vetor de parâmetros (método de regularização de primeira ordem de Tikhonov, 1950). Este método impõe

variações suaves para a distribuição da resistividade (Rodi e Mackie, 2001).

Foram simultaneamente invertidos os dados nos modos TE e TM (Rodi & Mackie, 2001) no intervalo de frequências de 10Hz a 100KHz. Vários modelos iniciais foram testados (resistividades 10, 100 e 1000 Ohm.m) e todos tenderam para modelos finais muito semelhantes, figura 5.

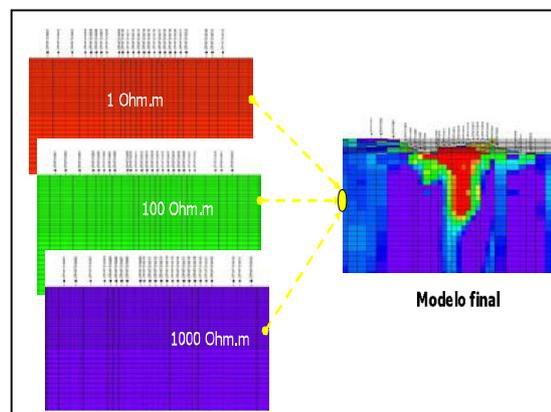


Figura 5 – Modelos de meio-espaço de partida com 10, 100 e 1000 Ohm.m, resultando modelo final semelhantes.

Os ajustes dos dados observados com os estimados para os modos TE e TM apresentaram erros menores que 1,5 RMS para os três perfis.

O modelo geofísico final 2-D suavizado, partindo de um meio-espaço de 10 Ohm.m para o perfil L-300 é mostrado na figura 6.

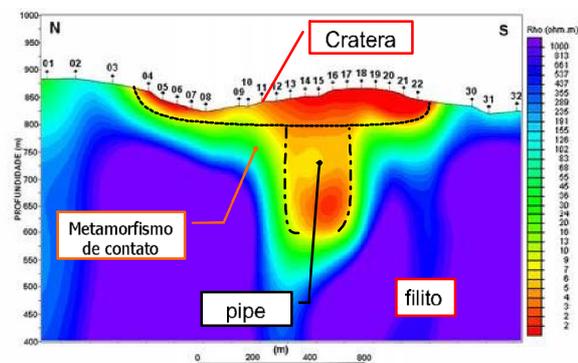


Figura 6 – Modelo geofísico final para o perfil L300.

Interpretação dos resultados

Apesar de terem sido realizados três perfis geofísicos, neste trabalho apenas apresentaremos os resultados alcançados para o perfil L-300.

Todos os resultados mostraram as mesmas características com a presença de um condutor

subvertical com largura de 150m que está associado ao conduto vulcânico. Apresentam também camadas condutoras com até 100m de espessura referente a fácies cratera.

O modelo final da inversão 2-D para este perfil, mostrado na figura 6, com direção N/S, que pode ser visto a sua posição na figura 4, apresentam resistividades que variam de 2 a 50 Ohm.m na suas partes centrais, compatíveis com as rochas kimberlíticas e zonas de metamorfismo de contato. Nesta área em estudos realizados com geoquímica de solo pela SAMSUL Mineração, mostrou uma grande concentração de minerais índices como a granada-piropo e a ilmenita-magnésiana, reforçando a interpretação geofísica.

Junto estação CSAMT 15 houve a perfuração de um furo de sonda (RDH-01). A decisão da sua localização foi baseada na interpretação dos resultados da geofísica, indicado na figura 4 e 7. Este furo atingiu a profundidade de 317m.

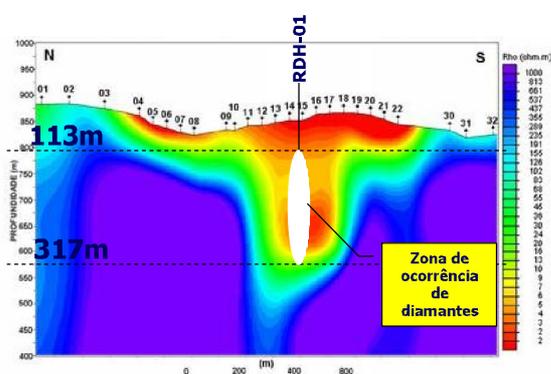


Figura 7 – Indicação do furo de sondagem RDH-01, junto à estação CSAMT 15 e mostrando os limites perfurados.

Nos resultados geofísicos os primeiros metros, mostrou ser compatível de uma cratera vulcânica que apresenta sua distribuição litológica mais estratificada e acamadada, com espessura de aproximadamente 50m na parte norte e 100m na parte sul. Nas amostras de calha interpretada do furo mostrou sendo de uma zona de ressedimentados até a profundidade de 113m.

Esta profundidade apresentada pela cratera no furo está bem próximo dos resultados interpretados pela geofísica.

Na parte central do corpo vulcânico, interpretado como o conduto vulcânico (*pipe*), apresenta resistividades variando de 2 a 20 Ohm.m, próximas às estações 13 e 17. A profundidade deste conduto pode ser visualizada com o método CSAMT e vão desde 100m até 325m.

No intervalo de 113 a 317m do furo de sondagem RDH-01 foram recuperados 129 microdiamantes de 0,075 a 0,5mm, nas amostras de calhas (Brazilian Diamonds Journal, 2006). A presença dos diamantes nessas profundidades mostra o razoável acerto na interpretação geofísica realizada.

A rocha encaixante do kimberlito de idade Pré-Cambriana do Subgrupo Paraopeba Indiviso, representada pelo Filito, apresentou resistividades que variam de 150 a 1000 Ohm.m. No perfil geofísico L-300, mostrado na figura 6, esta rocha pode ser identificada nas regiões compreendidas com os tons de colorações azuladas.

Um segundo furo de sondagem, RDH-02 foi realizado na distância de 100m para oeste da estação CSAMT 15 entre as estações CSAMT 29 e 33, figuras 4 e 8.

A profundidade máxima alcançada pelo furo foi de 251m e a parte interpretada da cratera tem espessura aproximada de 80m na parte norte e 50m na parte sul. A parte central do corpo vulcânico formado pelo *pipe* localiza-se entre as estações 29 e 33 com profundidades que podem ser visualizadas com o método CSAMT que variam desde a superfície até 250m. As resistividades que variam de 150 a 1000 Ohm.m estão associadas aos filitos encaixantes.

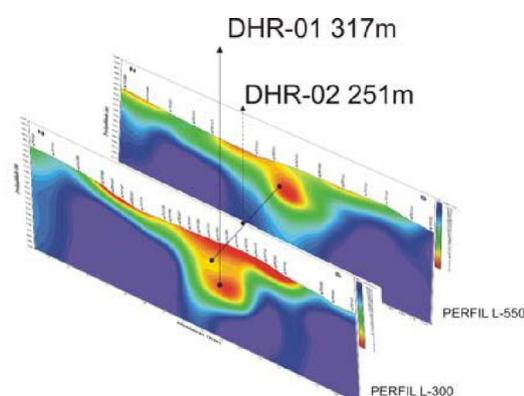


Figura 8 – Indicação para o furo de sondagem RDH-02.

Na interpretação das amostras de calhas realizada no furo RDH-02, foram recuperados 20 microdiamantes. A recuperação se deu nos intervalos de 229,6m a 243,9m em 32,5Kg e os microdiamantes variaram de 0,075mm a 0,212mm.

Conclusão

Com este estudo conseguimos determinar através dos resultados CSAMT que o modelo geológico para o Kimberlito Régis é de geometria clássica de um diatrama kimberlítico, assim como exemplificado na figura 1 e interpretado dos resultados geofísicos sendo mostrado na figura 9. Os furos de sondagens RDH-01 e RDH-02 realizados no local confirmaram a presente interpretação.

Os resultados geofísicos mostram que o *pipe* tem a largura de aproximada de 200m no perfil L-300, afinando para leste apresentando 100m e possui a largura aproximada 200m para sul, evidenciado no perfil LW/E. Isto mostra uma geometria irregular em subsuperfície do *pipe*.

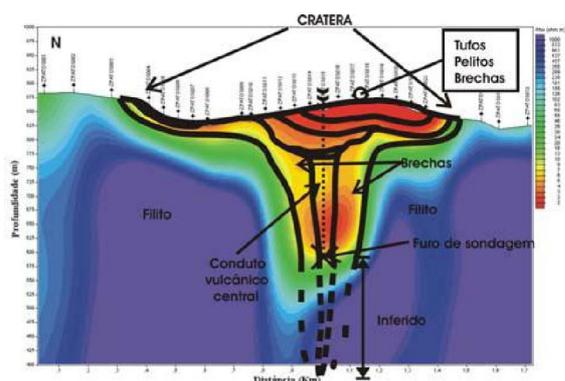


Figura 9 - Modelo geológico proposto para o Kimberlito Régis, interpretado a partir dos resultados geofísicos como sendo de um diatrema kimberlítico.

Agradecimentos

À UERJ e a Faculdade de Geologia pela liberação de recursos e infra-estrutura computacional.

Ao Observatório Nacional pela liberação de equipamentos, veículo, infra-estrutura computacional e técnico de apoio ao campo.

À diretoria do Grupo Brazilian Diamonds e a empresa SAMSUL Mineração pela liberação da área para pesquisa, apoio logístico, financeiros, veículo, técnico de mineração e auxiliares de campo.

Aos técnicos Ronaldo M. Carvalho (Observatório Nacional) e Hilton G. (SAMSUL Mineração) pela excelência na condução dos trabalhos de campo.

Referências Bibliográficas

- ALMEIDA, F.F. M. 1986. Distribuição regional do magmatismo pós-paleozóico no Brasil – Revista Brasileira de Geociências, 16, 325-349.
- ALMEIDA, F.F.A., HASUI, Y., BRITO NEVES, B.B., and FUCK, R.A., 1981, Brazilian structural provinces: an introduction: Earth-Sci. Reviews, 17, 1-21.
- ASMUS, H. E., 1978, Hipóteses sobre a origem dos sistemas de zonas de fraturas oceânicas/alinhamentos continentais que ocorreram nas regiões sudeste e sul do Brasil, In: Projeto REMAC, no.4, Petrobrás, Rio de Janeiro, p. 39-75.
- ARSENEY, A. A. 1962. The laws of distribution in kimberlites in the eastern part of the Siberian Platform. Doklady Earth Science Section, 137, 355-357.
- BARDET, M. G., 1977, Géologie du Diamant. Troisième partie: Gisements de Diamants d'Asie, d'Amérique, d'Europe et d'Austrasie. Memories du B. R. G. M. no. 83, 169p.
- BERBERT, C.O.; SVISERO, D.P.; SIAL, A.N.; MEYER, H.O.A. 1981. Upper mantle material in the Brazilian Shield. Earth Sci. Rev. 17:109- 133.

BOSUM, W. & MOLLAT, H., 1975, Interpretação do levantamento aerogeofísico sistemático de Minas Gerais e Espírito Santo. Fundamentos teóricos, Belo Horizonte, DNPM/CBGA/CPRM, Vo.1.

BRAZILIAN DIAMONDS NEWS, 17 out 2006, Significant Micro-Diamond Counts Received from Large Regis Kimberlite Drilling, www.braziliandiamonds.com.

BIZZI, L.A., SMITH, C.B., MEYER, H.O.A., ARMSTRONG, R., and De Wit, M.J., 1991, Mesozoic kimberlites and related rocks in southwestern São Francisco craton, Brazil: a case for local mantle reservoirs and their interaction: 5th Int. Kimberlite Conference, Araxá. Extended Abstr., p. 17.

BRITO NEVES, B.B., CAMPOS NETO, M.C., and FUCK, R., 1999, From Rodinia to Western Gondwana: An approach to the Brasiliano–Pan African cycle and orogenic collage: Episodes, 22, 155–199. 15

CPRM, 2004, Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, CPRM Serviço Geológico do Brasil, vo. SE23.

CROUGH, S. T.; Morgan, W. J. & Hargraves, R. B. 1980. Kimberlites: Their relation to mantle hotspots. Earth and Planetary Science Letters, 50, 260-274.

DAVIS, G. L. 1977, The age and uranium contents of zircons from kimberlites and associated rocks (abstract), International kimberlite Conference, Santa-Fe, New México.

DAWSON, J. B. 1980. Kimberlites and their xenoliths. Springer-Verlag, New York, 250 p.

DAWSON, J. B. 1986. New developments in diamond geology. Naturwissenschaften, 70, 586-583.

GARCIA, M. D. MELLO, 2004, Prospecção Mineral para Kimberlito: Estudo de Caso na Serra da Canastra – Ênfase em Magnetometria, Tese de Mestrado, UERJ.

HAGGERTY, S.E. 1975. Diamond genesis in a multiply-constrained model. Nature, 320, 34-38.

HASUI et al., 1976, Contexto Tectônico do Carbonatitos do Oeste de Minas Gerais. In: Simpósio Internacional de Carbonatitos, 1, Poços de Caldas.

HASTINGS, D. A. & Sharp, W. E. 1979. An alternative hypothesis for the origin of West African Kimberlites. Nature, 227, 152-153.

HERTZ, N., 1977, Timing of Spreading in the South Atlantic: Information from Brazilian Alkaline rock, Geol. Soc. Am. Bull., 86(1), 101-112.

HELMSTAEDT, H. & Gurney, J. J. 1984. Kimberlites of Southern Africa are they related to subduction processes? In: J. Kornprobst, editor. Kimberlites I: Kimberlites and related rocks. Developments in Petrology IIA, Elsevier Science Publishers, 4250434.

KEATING, P., SAILHAC, P., 2004, Use of the analtic signal to identify magnetic anomalies due to kimberlite pipes., Geophysics, 69, 180- 190.

- LADEIRA, E. A., et al., 1971, O Cretáceo em Minas Gerais, Congresso Brasileiro de Geologia, 25, São Paulo, Anais do Congresso, vo.1, p.15-31.
- MITCHEL, R. H. 1986. Kimberlites; Mineralogy, Geochemistry and Petrology, Plenum Press, 437 p.
- NABIGIHIAN, M. N., ASTEN, M. 2002, Metalliferous Mining geophysics-State of art in the last decade of the 20 Th century in the begging of the new millennium. Geophysics, 67, 964-978.
- NABIGHIAN, NISAC N. AND MACNAE, JAMES C., 1991, Time Domain Electromagnetic Prospecting Methods, Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, Vol 2, Application, Parta A and B, Chapter 5, Society of exploration Geophysicists, 427-519.
- PEREIRA, R. M., 2003, Fundamentos de Prospecção Mineral, Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2003. 167p.
- RODI, W. L., MACKIE, R. L., 2001, Nonlinear Conjugate Gradients Algorithm for 2-D Magnetotelluric Inversion, Geophysics, 40, 1035-1045.
- SCHOBENHAUS, C. E CAMPOS, D. DE A., 1984, A Evolução da Plataforma Sul-Americana no Brasil e suas Principais Concentrações Minerais. Geologia do Brasil, DNPM, Brasília, 9-53.
- SGARBI, P.B.A., CLAYTON, R.N., MAYEDA, T.K., GASAR, J.C., 1998, Oxygen isotope thermometry of Brazilian potassic volcanic rocks of kamafugitic affinities: Chemical Geology, 136, 115-126.
- SCHOBENHAUS, C. e Campos, D. de A. 1984. A evolução da Plataforma Sul-Americana no Brasil e suas principais concentrações minerais. Geologia do Brasil, DNPM, Brasília, 9-53.
- SKINNER, E. M. W. 2000. The Testing of the Canastra-1 (407/411/015) Kimberlite, Minas Gerais. Mineração do Sul. Relatório Interno, 55p.
- SMITH, R.S., PETER ANNAM, A., LEMIEUX, J., and PEDERSEN, R.N., 1996, Application of a modified GEOTEM system to reconnaissance exploration for kimberlites in the Point Lake area, NWT, Canada: Geophysics, 61, 82-92.
- SPIES, B. R. and FRISCHKNECHT F. C., 1991, Electromagnetic Sounding, Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, Vol 2, Application, Parta A and B, Chapter 5, Society of exploration Geophysicists, p. 285-425.
- SVISERO, D. P. Hasui. Y., Drumond., D., 1979, Geologia de Kimberlitos do Alto Paranaíba, Minas Gerais, Min. e Metal, 406, 34-38.
- SYKES, L. R. 1978. Intraplate seismicity, reactivation of preexisting zones of weakness, alkaline magmatism, and others tectonism postdating continental fragmentation. Review Geophysics and Space Physics, 16, 621-688.
- TIKHONOV, A. , 1950, Ob opredelnii elektricheskikh glubokikh sloev zemnoi kory. (about the computation of the electrical characteristic of the layers of the earth), Dokl, Akad. Nauk SSRR, 73:295-297.
- TRAVASSOS, J.M, and MENEZES, P.T.L., 1999, Geoelectric structure beneath limestones of the São Francisco Basin, Brazil: Earth Planets Space, 51, 1047-1058.
- ULBRICH, H. H. G. J. & GOMES C. B., 1981, Alkaline rocks from continental Brazil. Earth Sci Rev, 17: 145-154.
- VARSANTHI, A. and MALLINCK, K., Bouguer gravity anomalies and occurrence patterns of kimberlite pipes in Narayanpet-Maddur regions, Andhra Pradesh, India: Geophysics, 70, j13-j24.
- WILLIAMS, H. R. & Williams, R. A. 1977. Kimberlites and plate tectonics in west Africa. Nature, 270, 507-508.