

Dissertação de Mestrado

**AVALIAÇÃO DAS RELAÇÕES LITO-ESTRUTURAIS
EM CAVIDADES FERRÍFERAS, COM BASE EM
MÉTODOS GEOFÍSICOS – ESTUDO DE CASO:
CAVIDADE FERRÍFERA DA PROVÍNCIA
CARAJÁS/PA.**

NUGEO

AUTOR: GUILHERME AUGUSTO SILVA PROSDOCIMI

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Marco Antônio Braga (UFRJ)
COORIENTADOR: Dr. Marcelo Roberto Barbosa (Vale S.A.)**

ESCOLA DE MINAS / UFOP

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA DA UFOP

OURO PRETO - MAIO DE 2019

P966a

Prosdocimi, Guilherme Augusto Silva.

Avaliação das relações lito-estruturais em cavidades ferríferas, com base em métodos geofísicos - estudo de caso [manuscrito]: cavidade ferrífera da Província Carajás/PA / Guilherme Augusto Silva Prosdocimi. - 2019.
xviii,154f.: il.: color; tabs; mapas.

Orientador: Prof. Dr. Marco Antônio da Silva Braga.
Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Roberto Barbosa.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia.
Área de Concentração: Engenharia Geotécnica.

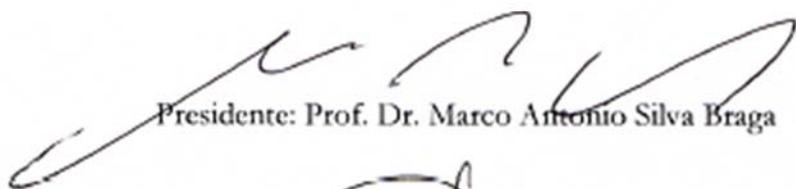
1. Geofísica. 2. Cavidades. 3. Carajás. I. Braga, Marco Antônio da Silva. II. Barbosa, Marcelo Roberto. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 624.13

AVALIAÇÃO DAS RELAÇÕES LITO- ESTRUTURAIS EM CAVIDADES FERRÍFERAS, COM BASE EM MÉTODOS GEOFÍSICOS - ESTUDO DE CASO: CAVIDADE FERRÍFERA DA PROVÍNCIA CARAJÁS/PA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Geotecnia**.

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 06 de maio de 2019 pela Banca Examinadora composta pelos membros:



Presidente: Prof. Dr. Marco Antonio Silva Braga



Membro: Prof. Dr. Romero Cesar Gomes



Membro: Dr. Iuri Viana Brandi

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, pelo encorajamento e carinho em todos os momentos.

Ao orientador, professor Dr. Marco Antônio da Silva Braga, pela confiança, incentivo e apoio durante toda a dissertação.

Ao coorientador, Dr. Marcelo Roberto Barbosa, pelas inúmeras discussões e por sempre acreditar na geofísica rasa como ferramenta relevante aos estudos da Geofísica Espeleológica.

À Vale S.A., por tornar possível a realização desta pesquisa e fomentar o estudo geofísico e espeleológico nas cavidades naturais em geossistemas ferruginosos. Agradeço ao Raul Valentim, à Georgete Dutra e ao Iuri Brandi, por todo auxílio ao longo das etapas de desenvolvimento desta dissertação.

À Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e ao Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas (NUGEO), pelos ensinamentos primordiais e colaboração na construção do conhecimento técnico-científico.

À Neogeo Geotecnologia LTDA., pelas grandes oportunidades de crescimento pessoal e profissional. Aos diretores, Juliano Vitorino e Fábio Miranda, que incentivaram e compreenderam a importância desta caminhada. Aos colaboradores de campo que realizaram as aquisições geofísicas com tanto esforço e dedicação. Aos amigos de trabalho que, conjuntamente, contribuíram para a realização deste trabalho: Franciele Neri, Maurício Viegas, Ingrid Cruz, Thiago Ferreira, Fabrício de Jesus e Andréa Lima. Em especial ao geólogo Vinícius Dias, pela contribuição no modelamento numérico.

Ao geólogo Jorge Roncato, pela grande ajuda e por ter compartilhado seu tempo, divertidos momentos e profundos conhecimentos.

Aos meus amigos, o meu muito obrigado pelo companheirismo e por tornarem mais leve este percurso.

RESUMO

Desde a década de 1970, a região de Carajás/PA ganhou destaque na pesquisa sobre a gênese de cavidades naturais em ambientes de rochas ferríferas. No estudo desenvolvido, métodos geofísicos rasos, utilizando Eletrorresistividade e GPR, foram aplicados à cavidade de máxima relevância N4E-0022, localizada no extremo norte da Mina N4EN do Complexo Carajás. Tais estudos serviram de embasamento técnico para definir assinaturas geofísicas relacionadas às feições cársticas ferríferas, às estruturas geológicas presentes e ao perfil laterítico local. A Eletrorresistividade, por meio da técnica de campo do Caminhamento Elétrico, apresentou parâmetros e resultados que evidenciaram a ocorrência de três horizontes intempéricos bem definidos. No topo, constatou-se a presença de uma camada caracterizada pela heterogeneidade de valores com predomínio de alta resistividade aparente (valores maiores que 2.718 ohm.m) em detrimento a porções de resistividade intermediária, confirmando a característica da crosta laterítica ferruginosa. Abaixo desta camada, o pacote geofísico intermediário apresentou redução nos valores de resistividade aparente, associando-se ao horizonte de transição, fonte potencial de formação e desenvolvimento de cavidades naturais. Neste horizonte, foram detectadas anomalias de resistividade aparente entre 760 e 2.718 ohm.m. O pacote geofísico basal é caracterizado por altos valores de resistividade aparente (> 8.000 ohm.m), comumente associado à formação ferrífera. Para o método GPR, após testes com variação de antenas, os dados com as melhores respostas foram aqueles adquiridos com a de frequência central de 250 MHz. O método eletromagnético possibilitou o mapeamento de descontinuidades estruturais em radargramas que se apresentaram como interrupções nos refletores e se destacaram dentre as reflexões associadas ao acamamento natural. Tais descontinuidades concentram-se nas porções próximas ao teto das cavidades e apresentam diferentes direções de mergulho, algumas delas na forma de feições em cunha. Além disso, foram identificadas possíveis superfícies de abatimento, que constituem parte do processo de gênese de cavidades em locais cujo mapeamento estrutural direto é difícil. A integração dos métodos da geofísica rasa, metodologia adotada nesta pesquisa, demonstrou excelente aplicação à elucidação de questões espeleológicas associadas a ambientes ferruginosos.

Palavras-chave: Geofísica rasa; Cavidade Ferrífera; Minério de Ferro; Carajás.

ABSTRACT

Since the 1970s, the region of Carajás/PA has gained prominence within the research field of the genesis of natural cavities in ferruginous rocks environments. In this study, near surface geophysical testes using Electrical Resistivity and GPR were performed in the N4E-0022 cavity, located at the northern portion of the N4EN Mine, Carajás Complex, in the northern region of Brazil. These studies served as a technical basis for the definition of geophysical signatures related to ferruginous karstic features, geological structures and lateritic profile. The Electrical Resistivity, through the resistivity profile, presented parameters and arrangements that showed 3 well defined horizons. At the top, a layer characterized by the heterogeneity of values with predominance of high resistivity (>2.718 ohm.m) was discovered, confirming the characteristic of a ferruginous laterite crust. Below this layer, the intermediate geophysical horizon presented a reduction in resistivity values, associating with the transition horizon, where natural cavities preferentially occur. In this layer, anomalies of apparent resistivity from 760 to 2,718 ohm.m were detected. The basal geophysical horizon is characterized by high resistivity values ($> 8,000$ ohm.m) and is associated with the iron formation. For the GPR method, after tests with antenna variation, the data with the most adequate response were those obtained with the central frequency of 250 MHz. The electromagnetic method allowed the mapping of structural discontinuities in the radargram. They were presented as interruptions in the reflectors and stood out between the reflections associated with natural bedding. Such discontinuities are concentrated in the portions near the ceiling of the cavities and present different diving directions, some of them in the form of wedge features. In addition, they evidence possible abatement surfaces, which are part of the cavity genesis process at sites whose direct structural mapping is difficult. Therefore, the methodology adopted in this research, through the integration of near surface geophysical methods, demonstrated excellent application to the elucidation of speleological issues in a ferruginous environment.

Key-words: Near Surface Geophysics; Iron Cave; Iron Ore; Carajás Mineral Province.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - (A): Visão da Mina N4EN – Complexo Carajás/PA; (B): Área localizada no entorno da cavidade N4E-0022.	6
Figura 2.1 - Evolução do número de cavidades cadastradas (CECAV, 2018).....	9
Figura 2.2 - Principais unidades cavernícolas pertencentes ao Geossistema Ferruginoso Carajás/PA.....	10
Figura 2.3 - Principais unidades cavernícolas pertencentes ao Geossistema Ferruginoso Quadrilátero Ferrífero/MG.	11
Figura 2.4 - Mapa Geológico Regional Simplificado (CPRM, 2008).....	12
Figura 2.5 - Perfil Geológico esquemático para o Complexo Carajás (grid em coordenadas locais). Nota-se as rochas mineralizadas pertencentes à Formação Carajás em contato inferior e superior com as rochas máficas da Formação Parauapebas (modificado de FIGUEIREDO E SILVA, 2009).....	14
Figura 2.6 - Perfil laterítico esquemático da região de N4EN, Complexo Carajás (adaptado de GONÇALVES <i>et al.</i> , 2016).....	17
Figura 2.7 - Perfil laterítico a partir da inspeção visual de taludes da região de N4EN, Complexo Carajás (adaptado de GONÇALVES <i>et al.</i> , 2016).	19
Figura 2.8 - Evolução da zona de baixa densidade na interface crosta-saprólito (modificado de MAURITY & KOTSCHOUBEY, 1995).....	20
Figura 2.9 - Instabilidades no teto de cavidades (SZUNYOGH, 2010).....	22
Figura 2.10 - Padrões de cavidades em litologias de ferro. (A): padrão do tipo linear; (B): padrão do tipo irregular; C: padrão do tipo misto (DUTRA, 2013).....	23
Figura 2.11 - Perfil síntese de uma caverna ferrífera com as principais feições morfológicas (PILÓ <i>et al.</i> , 2015).....	23
Figura 3.1 - Localização da cavidade N4E-0022 e sua projeção horizontal.	24
Figura 3.2 - Localização da área (Mina N4EN – Complexo Carajás) e vias de acesso. ...	25
Figura 3.3 - (A): Paredão de acesso à cavidade N4E-0022; (B): Visão do escarpamento que abriga a entrada da cavidade.....	26
Figura 3.4 - (A): Vista da entrada da cavidade N4E-0022; (B): Conduto de acesso à cavidade.....	26
Figura 3.5 - Planta topográfica da cavidade N4E-0022 (Vale S.A.).	27
Figura 3.6 - Perfis esquemáticos da cavidade N4E-0022 (Vale S.A.).....	27
Figura 3.7 - Mapa litoestrutural da cavidade N4E-0022 (Vale S.A.).....	29
Figura 3.8 - Diagrama de rosetas exibindo a orientação das estruturas mapeadas na cavidade N4E-0022. Foram plotados 43 planos de fratura, com ângulos de caimento variando entre 40° e 90° (Vale S.A.).....	30

Figura 3.9 - Mapa de Classificação Geomecânica (RMR) da cavidade N4E-0022 (Vale S.A.).....	34
Figura 3.10 - Mapa de Classificação segundo o Índice Geotécnico de Cavernas (IGC) da cavidade N4E-0022 (adaptado de BRANDI, 2018).	37
Figura 3.11 - Localização do perfil de detalhe mapeado para caracterização dos litotipos e definição de parâmetros geomecânicos <i>in situ</i>	38
Figura 3.12 - Monitoramento contínuo e periódico de pontos de interesse (<i>e.g.</i> fraturas subverticais localizadas na parede) no interior da cavidade N4E-0022 (Vale S.A.).....	42
Figura 3.13 - Estações de alimentação dos equipamentos de monitoramento sistemático da cavidade N4E-0022.	43
Figura 3.14 - Mapa de isopropundidades da cavidade N4E-0022 (Vale S.A.).....	43
Figura 4.1 - Técnica de caminhamento elétrico (Neogeo Geotecnologia LTDA.).	45
Figura 4.2 - Influência da direção das camadas nos valores de resistividade (adaptado de OLDENBURG & JONES, 2007).	47
Figura 4.3 - Fundamentos da Lei de Ohm a partir de um condutor metálico.....	48
Figura 4.4 - Fluxo de corrente radial a partir dos eletrodos de corrente A e B (Neogeo Geotecnologia LTDA.).....	49
Figura 4.5 - Arranjo Dipolo-Dipolo (Neogeo Geotecnologia LTDA.).	53
Figura 4.6 - Arranjo Schlumberger (Neogeo Geotecnologia LTDA.).	54
Figura 4.7 - Arranjo Wenner (Neogeo Geotecnologia LTDA.).	55
Figura 4.8 - Arranjo Gradiente (Neogeo Geotecnologia LTDA.).	55
Figura 4.9 - (A): Esquema para o modelamento direto; (B): Esquema para a inversão de dados.....	56
Figura 4.10 - Exemplo de dado de Eletrorresistividade e a rotina de inversão. (A): Dado medido; (B): Dado calculado; (C): Dado invertido.	58
Figura 4.11 - Esquema ilustrativo para a rotina de inversão. Os números (1 a 6) representam as etapas sumarizadas acima.....	59
Figura 4.12 - Arranjo dos blocos discretizados e pontos de medida da correspondente pseudo-seção. O número de blocos é 724, com 721 pontos de medidas em um perfil de 90 m de extensão, aproximadamente.....	59
Figura 4.13 - Variação da constante dielétrica (K) em função do conteúdo de água para os materiais geológicos (adaptado de TOPP <i>et al.</i> 1980).	64
Figura 4.14 - Esquema da reflexão das ondas (Neogeo Geotecnologia LTDA.).	65
Figura 4.15 - Levantamento GPR por meio da técnica <i>Common Offset</i> e respectivo registro de traços obtidos (adaptado de DAVIS & ANNAN, 1989).	66
Figura 4.16 - Sondagem CMP para determinação da velocidade no meio (adaptado de BORGES, 2002).	67

Figura 4.17 - Sondagem WARR para determinação da velocidade no meio (adaptado de BORGES, 2002).	67
Figura 4.18 - Arranjo de antenas de GPR (adaptado de ANNAN, 1992).	68
Figura 4.19 - Radargrama com variação de contraste dos refletores em uma seção ilustrativa de GPR (Neogeo Geotecnologia LTDA.).	71
Figura 5.1 - Controle de qualidade por meio da análise de <i>datum points</i> do dado bruto de Eletrorresistividade.	75
Figura 5.2 - Controle de qualidade por meio da análise do espectro de frequência central do dado de GPR.	75
Figura 5.3 - Operação do resistivímetro em campo, cavidade N4E-0022. (A): Equipamento composto por unidade de controle, unidade seletora e bateria; (B): Eletrodos metálicos cravados na superfície e cabos.	76
Figura 5.4 - Teste Arranjo Dipolo-Dipolo (DDP). (A): Dado medido; (B): Dado calculado; (C): Dado invertido.	78
Figura 5.5 - Teste Arranjo Schlumberger (DDP). (A): Dado medido; (B): Dado calculado; (C): Dado invertido.	79
Figura 5.6 - Teste Arranjo Wenner (WEN). (A): Dado medido; (B): Dado calculado; (C): Dado invertido.	79
Figura 5.7 - Escala cromática (<i>range</i>) de resistividade aparente.	80
Figura 5.8 - Localização das seções de CE na cavidade N4E-0022.	81
Figura 5.9 - Operação do método GPR em campo, cavidade N4E-0022. (A): Equipamento PulseEKKO Pro com antena de 250 MHz; (B): Equipamento SIR3000 com antena MLF de 80 MHz.	82
Figura 5.10 - Localização das seções de GPR (PulseEKKO Pro), demarcadas em azul, na cavidade N4E-0022.	87
Figura 5.11 - Localização das seções de GPR (SIR3000, Antena MLF), demarcadas em azul, na cavidade N4E-0022.	88
Figura 6.1 - Escala cromática com a segmentação em ZBR (Zonas de Baixa Resistividade aparente), ZIR (Zonas de Resistividade aparente Intermediárias) e ZAR (Zonas de Alta Resistividade aparente).	89
Figura 6.2 - Seção CE-N22E-L05 com destaque para zonas geofísicas interpretadas a partir da magnitude dos valores de resistividade aparente em: Zonas de Alta resistividade aparente (ZAR), Zonas de Baixa Resistividade aparente (ZBR) e Zonas e Resistividade Intermediária (ZIR).	90
Figura 6.3 - Assinaturas geométricas (CE-N22E-L01) e perfil de laterização na cavidade N4E-0022.	93
Figura 6.4 - Assinaturas geométricas (CE-N22E-L02) e perfil de laterização na cavidade N4E-0022.	94

Figura 6.5 - Assinaturas geolétricas (CE-N22E-L03) e perfil de laterização na cavidade N4E-0022.	95
Figura 6.6 - Assinaturas geolétricas (CE-N22E-L04) e perfil de laterização na cavidade N4E-0022.	96
Figura 6.7 - Assinaturas geolétricas (CE-N22E-L05) e perfil de laterização na cavidade N4E-0022.	97
Figura 6.8 - Processo de modelamento implícito dos dados geolétricos adquiridos na cavidade N4E-0022. (A): Seções elétricas 2D; (B): Delimitação explícita dos contatos geofísicos coincidente com os horizontes lateríticos; (C): Modelamento da superfície inferior referente ao contato Zona de Transição – Saprolito; (D): Modelamento da superfície superior referente ao contato Canga – Zona de Transição; (E): Modelo referente ao Saprolito (HF); (F): Modelo referente à Zona de Transição; (G): Modelo referente à Crosta Laterítica; (H): Modelo implícito para o perfil de laterização da região de N4E-0022 a partir de dados geofísicos.	99
Figura 6.9 - Correlações entre dados diretos (sondagem rotativa, perfilagem gama-gama/densidade, perfil de intemperismo) e assinaturas geofísicas. O perfil de intemperismo mostra as espessuras médias obtidas no mapeamento de detalhe em bancada.	100
Figura 6.10 - (A): Modelamento direto para simulação de cavidade preenchida por ar; (B): Seção Invertida do Modelamento Direto (Neogeo Geotecnologia LTDA.).....	102
Figura 6.11 - (A): Modelamento direto para simulação de cavidade preenchida por ar e presença de camada condutiva subjacente; (B): Seção Invertida do Modelamento Direto (Neogeo Geotecnologia LTDA.)	103
Figura 6.12 - (A): Cavidade N4E-0022 obtida por meio de <i>Laser Scan</i> ; (B): Seções geolétricas adquiridas no contexto da cavidade N4E-0022.	104
Figura 6.13 - (A): Anomalias de Alta Resistividade associadas à cavidade N4E-0022 e próximas à entrada; (B): Anomalias de Baixa Resistividade Aparente associadas à cavidade N4E-0022 e afastadas da entrada.....	105
Figura 6.14 - Anomalias de Contraste Angular associadas à cavidade N4E-0022, evidenciadas por linhas pretas pontilhadas.....	106
Figura 6.15 - Anomalias de Contraste Baixo Resistivo associadas à cavidade N4E-0022, evidenciadas por linhas pretas pontilhadas.....	107
Figura 6.16 - Processo de modelamento implícito dos dados geolétricos relacionados a zonas de instabilizações do teto da cavidade N4E-0022. (A): Nuvem de pontos contendo os atributos de coordenadas X, Y, Z e resistividade aparente associada; (B): Categorização de pontos relacionados a zonas com maior propensão à instabilização; (C): Individualização dos pontos categorizados; (D): Modelamento das superfícies de maior instabilidade a partir dos pontos categorizados.	108
Figura 6.17 - Mapa de pontos/zonas indicativas de instabilizações de teto da cavidade N4E-0022, por meio de dados geolétricos.	109

Figura 6.18 - Coincidência entre um dos pontos de fragilidade identificados pelo mapeamento geoestrutural e anomalia geofísica.	110
Figura 6.19 - Mapa comparativo entre a classificação geomecânica RMR da cavidade N4E-0022 (Vale S.A.) e o mapa de pontos/zonas indicativas de instabilizações de teto da mesma cavidade, por meio de dados geoeletricos.	111
Figura 6.20 - Seção CE-N22E-L01. Interpretação dos litotipos pertencentes ao horizonte de intemperismo através da correlação de assinaturas geofísicas.	113
Figura 6.21 - Seção CE-N22E-L02. Interpretação dos litotipos pertencentes ao horizonte de intemperismo através da correlação de assinaturas geofísicas.	114
Figura 6.22 - Seção CE-N22E-L03. Interpretação dos litotipos pertencentes ao horizonte de intemperismo através da correlação de assinaturas geofísicas.	115
Figura 6.23 - Seção CE-N22E-L04. Interpretação dos litotipos pertencentes ao horizonte de intemperismo através da correlação de assinaturas geofísicas.	116
Figura 6.24 - Seção CE-N22E-L05. Interpretação dos litotipos pertencentes ao horizonte de intemperismo através da correlação de assinaturas geofísicas.	117
Figura 6.25 - Evolução do processo interpretativo para associação entre caracterização litogeomecânica dos litotipos e assinaturas geoeletricas obtidas na cavidade N4E-0022. (A): Seções de Eletrorresistividade (CE) invertidas; (B): Pontos contendo informações de coordenadas e resistividade aparente; (C): Categorização de pontos em virtude das correlações entre assinaturas geofísicas e litotipos de laterização; (D): Bloco diagrama como resultado do modelamento implícito realizado.	118
Figura 6.26 - Mapa de caracterização litogeomecânica dos litotipos existentes através do mapeamento geofísico indireto da cavidade N4E-0022. *Os valores de compressão uniaxial foram fornecidos pela Vale S.A. a partir de dados obtidos por martelo de Schmidt <i>in situ</i>	120
Figura 6.27 - Mapa de caracterização litogeomecânica na região compreendida entre o teto da cavidade N4E-0022 e a subsuperfície do terreno (2,25 metros).	121
Figura 6.28 - Comparação entre as classificações geomecânicas RMR e IGC da cavidade N4E-0022 com o mapa de caracterização litogeomecânica dos litotipos existentes através do mapeamento geofísico indireto da cavidade. (A): Mapa de caracterização geomecânica com base no levantamento geofísico; (B): Mapa de Classificação Geomecânica IGC (BRANDI, 2018); (C): Mapa de Classificação Geomecânica RMR (Vale S.A.).	123
Figura 6.29 - Atenuação do sinal Eletromagnético associado à previsibilidade de zonas com indicativos de instabilidade geotécnica no teto da cavidade N4E-0022. Seção de GPR adquirida com antena de 250 MHz (PulseEKKO Pro). (A): Dado sem interpretação; (B): Dado com interpretação. É importante ressaltar que, em virtude do terreno exacerbadamente acidentado e impossibilidades operacionais, os trechos mais críticos (taludes íngremes) das seções de GPR tiveram sua aquisição de dados interrompida por questões de segurança.	126

Figura 6.30 - Correspondência entre assinaturas geofísicas em uma mesma seção adquirida com os diferentes métodos geofísicos. (A): Seção de Eletrorresistividade (CE) sem interpretação; (B): Seção de GPR sem interpretação; (C): Seção de Eletrorresistividade (CE) com interpretação; (D): Seção de GPR com interpretação.	127
Figura 6.31 - (A): Identificação de descontinuidades em radargrama parcial da seção GPR-N22E-L01; (B): Detalhe com interpretação de descontinuidades; (C): Detalhe sem interpretação.	128
Figura 6.32 - (A): Seções de GPR com antena central de 250 MHz em ambiente tridimensional; (B): Descontinuidades interpretadas pela análise dos radargramas; (C): Visualização com identificação da cavidade N4E-0022.	129
Figura 6.33 - (A): Planos representativos nas direções gerais NW-SE, para as seções N22E-L01 a N22E-L03; (B): Planos representativos nas direções gerais NE-SW, para as seções N22E-L04 a N22E-L05; (C): Planos representativos para todas as seções geofísicas mapeadas, destaque para possíveis feições em cunha.	130
Figura 6.34 - (A): Modo de visualização dos planos interpretados pelo GPR; (B): Modo de visualização dos pontos polares (N = 311 pólos).; (C): Modo de visualização dos contornos; (D): Modo de visualização tridimensional da rede de Schmidt do contexto da cavidade N4E-0022.	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Registros espeleométricos da cavidade N4E-0022 (Vale S.A.).	28
Tabela 3.2 - Pesos atribuídos à Classificação Geomecânica de Bieniawski (1989) - Rock Mass Rating (RMR).	31
Tabela 3.3 - Classificação Geomecânica de Bieniawski (1989) - Rock Mass Rating (RMR).	32
Tabela 3.4 - Grau de Resistência (adaptado de BROWN, 1981).	33
Tabela 3.5 - Pesos atribuídos ao Índice Geotécnico de Cavernas (adaptado de BRANDI, 2018).	36
Tabela 3.6 - Classes de susceptibilidade consideradas para o IGC, Índice Geotécnico de Cavernas (adaptado de BRANDI, 2018).	36
Tabela 3.7 - Litotipos associados a horizontes de intemperismo (Vale S.A.).	39
Tabela 3.8 - Litotipos pertencentes ao perfil de intemperismo típico da região de Carajás/PA, medidas do Coeficiente de Velocidade (Q) e Resistência Geomecânica convertida (adaptado de BARBOSA, 2018).	40
Tabela 3.9 - Testes de laboratório realizados em litotipos do Complexo Carajás.	41
Tabela 4.1 - Arranjos de eletrodos e avaliação das resoluções vertical e horizontal (adaptado de WARD, 1990). Legenda: 1 – muito bom; 2 – bom; 3 – regular; 4 – ruim; 5 – muito ruim.	52
Tabela 4.2 - Variação da frequência central das antenas de GPR e respectivas profundidades (adaptado de PORSANI, 1999).	69
Tabela 5.1 - Inventário das aquisições de Eletrorresistividade (CE).	77
Tabela 5.2 - Informações das aquisições de Eletrorresistividade (CE).	77
Tabela 5.3 - Inventário das aquisições de GPR.	83
Tabela 5.4 - Informações das aquisições de GPR na cavidade N4E-0022.	84
Tabela 6.1 - Assinaturas geolétricas e condições de contorno da cavidade.	105
Tabela 6.2 - Assinaturas geolétricas dos litotipos de horizontes intempéricos e correlações com resistência à compressão uniaxial.	119

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIações

\vec{D}	Correntes por deslocamento/polarização;
\vec{E}	Campo elétrico;
ϵ_0	Permissividade dielétrica no vácuo (8.854×10^{-12} F/m);
\vec{J}	Densidade de corrente por condução, em ampère/metro quadrado (A/m^2);
ρ_a	Resistividade aparente;
ΔV	Diferença de potencial entre dois terminais quaisquer (Volts);
∇	Operador diferencial;
A e B	Eletrodos de corrente;
A	Área da seção;
A	Distância que separa os eletrodos M e N;
Al	Alumínio;
c	Velocidade da luz = $2,997 \times 10^8$ m/s \cong 0,3 m/ns;
CANIE	Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas;
CE	Caminhamento Elétrico;
CECAV	Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas;
CLD	Crosta Laterítica Detrítica;
CLF	Crosta Laterítica Ferruginosa;
CMP	<i>Common Midpoint</i> ;
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente;
DDP	Arranjo Dipolo-Dipolo;
DOU	Diário Oficial da União;
ϵ	Permissividade dielétrica;
EM	Campo Eletromagnético;
Fe	Ferro;
FFL	Formação Ferrífera Laterítica;
g/cm^3	Grama por centímetro cúbico, unidade de densidade;
GEM	Grupo Espeleológico de Marabá;
GPR	<i>Ground Penetrating Radar</i> ;
GRD	Arranjo Gradiente;
HF	Hematita Friável;
ICMBio	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade;

I.N.	Instrução Normativa;
I:	Intensidade da corrente elétrica (Ampères);
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis;
IE	Índice Esclerométrico;
IGC	Índice Geotécnico de Cavernas;
ISRM	<i>Internacional Society for Rock Mechanics</i> ;
K	Constante dielétrica dos materiais;
K	Fator geométrico;
L	Comprimento;
LFA	Laterita Ferro-Aluminosa;
m	Metro;
M e N	Eletrodos de Potencial;
mA	Miliampère, unidade de corrente;
MHz	Mega Hertz, unidade de frequência;
MLF	<i>Multi Low Frequency</i> ;
MPa	Mega pascal, unidade de pressão;
ns	Nano segundos;
o	Centro do arranjo de eletrodos;
Ohm/m	Medida de resistividade aparente;
PEN	Patrimônio Espeleológico Nacional;
PLT	<i>Poin Load Test</i> ;
Q	Coefficiente de velocidade;
Q	Sistema de Classificação proposto por Barton <i>et al.</i> ;
R.V.	Realidade virtual;
R	Número de Ricochete;
r	Raio;
R	Resistência do material à passagem da corrente elétrica (ohms);
RMR	<i>Rock Mass Rating</i> ;
RMS	<i>Root Mean Squared</i> ;
RQD	<i>Rock Quality Designation</i> ;
Rx	Antena Receptora;
SAPRF	Saprolito de Formação Ferrífera;
SCH	Arranjo Schlumberger;

SEV	Sondagem Elétrica Vertical;
SGY	Formato de arquivo;
Si	Silício;
SiO ₂	Sílica;
Tx	Antena transmissora;
UCS	<i>Uniaxial Compressive Strenght</i> ;
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto;
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro;
USGS	<i>United States Geological Survey</i> ;
UTM	<i>Universal Transversa de Mercator</i> ;
WARR	<i>Wide Angle Reflection and Refraction</i> ;
WEN	Arranjo Wenner;
X	Distância entre eletrodos;
ZAR	Zona de Alta Resistividade aparente;
ZBR	Zona de Baixa Resistividade aparente;
ZIR	Zona de Resistividade Intermediária;
α	Atenuação;
θ_v	Conteúdo volumétrico de água;
σ	Condutividade elétrica.

LISTA DE ANEXOS

I.	SEÇÕES DE ELETORRESISTIVIDADE (CE).....	I
II.	SEÇÕES DE GPR.....	VII
III.	SONDAGENS ROTATIVAS, PERFILAGEM GEOFÍSICA E PERFIL DE INTEMPERISMO MAPEADO EM BANCADA.....	XIII

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Contextualização do Tema	1
1.2. Legislação em Espeleologia no Brasil.....	4
1.3. Justificativas e Objetivos	6
1.4. Organização da Dissertação	8
2. CAVIDADES FERRÍFERAS DO GEOSSISTEMA CARAJÁS	9
2.1. Introdução.....	9
2.2. Província Carajás.....	11
2.3. Aspectos Estruturais	15
2.4. Perfil de Laterização da Formação Ferrífera	16
2.5. Gênese das Cavidades Ferríferas.....	19
2.6. Espeleometria e Morfologia das Cavidades Ferríferas.....	22
3. CARACTERIZAÇÃO DA CAVIDADE N4E-0022 DA MINA N4EN.....	24
3.1. Localização e Vias de Acesso	24
3.2. Levantamento Topográfico e Registros Espeleométricos	26
3.3. Mapeamento Litoestrutural e Geomecânica da Caverna	29
3.4. Ensaios <i>in situ</i> e Laboratoriais.....	38
3.5. Monitoramento e Escaneamento 3D	42
4. MÉTODOS GEOFÍSICOS APLICADOS ÀS CAVIDADES FERRÍFERAS... 44	44
4.1. Métodos Elétricos.....	44
4.1.1. Eletroresistividade (Caminhamento Elétrico).....	44
4.2. Métodos Eletromagnéticos	60
4.2.1. <i>Ground Penetrating Radar</i> (GPR)	60
5. CAVIDADE N4E-0022: AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS GEOFÍSICOS	73
5.1. Metodologias e Etapas dos Estudos	73
5.2. Eletroresistividade (Caminhamento Elétrico).....	76
5.3. <i>Ground Penetrating Radar</i> (GPR)	82
6. CAVIDADE N4E-0022: APRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS	89
6.1. Eletroresistividade (Caminhamento Elétrico).....	89
6.1.1. Definição do Perfil de Laterização	91
6.1.2. Caracterização e Detalhamento do Horizonte de Transição	102

6.1.3.	Análises de Instabilização do Teto de Cavidades Ferríferas.....	106
6.1.4.	Avaliação da Resistência à Compressão Uniaxial	111
6.2.	<i>Ground Penetrating Radar</i> (GPR)	124
6.2.1.	Análises de Instabilizações do Teto	125
6.2.2.	Identificação de Planos de Descontinuidades	127
7.	CONCLUSÕES E PROPOSIÇÕES COMPLEMENTARES.....	132
7.1.	Principais Conclusões.....	132
7.2.	Sugestões de Pesquisas Complementares.....	135
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	136

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

O estudo de cavidades naturais em ambiente de rochas com origem ferrífera mostra-se como um crescente campo de pesquisa no contexto espeleológico brasileiro. Até o início do século passado, a maior parte dos estudos espeleológicos, amplamente difundidos no Brasil, remetiam exclusivamente às cavidades de ocorrência em rochas carbonáticas, por exemplo, calcários e dolomitos.

Cavernas naturais em terrenos ferríferos têm sido catalogadas na literatura espeleológica desde o século XIX, principalmente na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Uma das primeiras citações de cavernas em formação ferrífera no Brasil remonta o ano de 1818, realizada por Sainte Hilaire (Hilaire, 1974). O francês Aimé Pissis (1842) e o inglês William Henwood (1871) também apresentaram os primeiros registros voltados para esta temática. Tassini (1947) relatou uma cavidade em litologia ferrífera presente na Serra do Curral, em Belo Horizonte, Minas Gerais. No entanto, tais informações eram obtidas de modo pontual por meio de poucos estudos e ainda se configuravam incipientes no cenário mundial.

A partir do século XX, diante da atuação dos geólogos do *United States Geological Survey* (USGS) no Quadrilátero Ferrífero, os primeiros trabalhos de cunho científico mais aprofundados em cavernas ferríferas puderam ser desenvolvidos e ganharam projeção no contexto geoespeleológico. Guild (1957), por meio do estudo de recursos minerais no distrito de Congonhas/MG, citou e descreveu algumas cavidades em ambiente ferruginoso. Outro geólogo americano pertencente à USGS, George Simmons, dedicou trabalhos pioneiros relacionados à gênese de cavidades ferruginosas (SIMMONS, 1963)

e às constituições fosfáticas de espeleotemas encontradas em cavernas do Quadrilátero Ferrífero (SIMMONS, 1964).

Após a descoberta de jazidas de ferro e do seu patrimônio espeleológico, a Província Carajás tornou-se um importante local para a pesquisa sobre a gênese de cavernas em ambientes de rochas ferríferas, antes restrita apenas ao Quadrilátero Ferrífero. As primeiras referências são do início da década de 1970, por meio dos trabalhos de Tolbert *et al.* (1971), nos quais os autores caracterizam a existência de grandes cavernas sob a crosta de canga nas jazidas recém descobertas de Carajás.

Na década de 1980, estudos realizados por diversos autores como Pinheiro *et al.* (1985), Pinheiro *et al.* (1988) e Pinheiro & Maurity (1988) ampliaram os conceitos espeleogenéticos bem como geoquímicos e mineralógicos associados ao ambiente cavernoso. Maurity & Kotschoubey (1994 e 1995) produziram um detalhado estudo relacionado a alterações intempéricas, caracterização e evolução de feições pseudocársticas assim como mineralogia de espeleotemas. Tais estudos configuraram-se como importante embasamento técnico a diversos trabalhos posteriores na região.

A partir do ano 2000, uma série de levantamentos espeleológicos relevantes foram realizados em virtude da conjuntura do mercado econômico ligado ao minério de ferro e maior rigor dos órgãos de licenciamento ambiental. Esses fatos acarretaram na necessidade de ampliação das áreas de lavra, assim como maior enfoque ao cadastramento e estudo do patrimônio espeleológico associado. O Grupo Espeleológico de Marabá (GEM), por exemplo, realizou prospecções nas serras Norte, Sul, Leste, do Tarzan e da Bocaina, todas no estado do Pará. Tais excursões resultaram na descoberta de diversas cavidades na região.

O número de cavernas em minério de ferro, antes limitado a algumas dezenas, passou a crescer exponencialmente. Esse grande conjunto de cavidades tem incentivado diversos estudos geoespeleológicos a trazer novas revelações para o contexto atual da espeleologia (e.g. PILÓ & AULER, 2005; PILÓ & AULER, 2009; COELHO *et al.* 2010; PILÓ & AULER, 2011; CARMO *et al.* 2011; PEREIRA, 2012; CALUX, 2013; PARKER *et al.* 2013 e AULER *et al.* 2014).

Outros trabalhos de cunho acadêmico estão sendo recentemente desenvolvidos em parcerias com universidades federais por meio de convênios público-privados a fim de aprimorar e desenvolver o conhecimento científico em diversos âmbitos da espeleologia: zoneamento geotécnico (NOCE, 2016), mapeamento geomecânico e geotecnologias em cavernas (VALENTIM, 2016; ARAÚJO, 2016), monitoramento geotécnico instrumentado em cavidade (BRANDI *et al.* 2016), susceptibilidade geotécnica de cavidades ferríferas (DUTRA, 2017), modelamento numérico (SANTOS JÚNIOR, 2017), capacidade de armazenamento e transmissão de água em canga (SOUZA, 2018). Brandi (2018) desenvolveu, de forma pioneira, uma metodologia de classificação geotécnica aplicada a cavidades ferríferas com base em um Índice Geotécnico de Cavernas (IGC).

No que tange à geofísica, estudos realizados em geossistemas ferruginosos estão amplamente direcionados à petrofísica de minérios (*e.g.* LIMA *et al.* 2013), perfilagem geofísica de poço (*e.g.* FONSECA, 2016; PEREIRA, 2017), sismografia (*e.g.* DIAS *et al.*, 2014; AMORIN *et al.* 2016; LOPES *et al.* 2018; PEREIRA, 2018) e a aerolevantamentos gravimétricos e magnetométricos (*e.g.* DALSTRA & FLIS, 2008; FLIS, 2008; BRAGA, 2009), grande parte associados à geofísica exploratória, tanto no Quadrilátero Ferrífero/MG como em Carajás/PA. Costa (2007) utilizou métodos geofísicos rasos (Eletrorresistividade e Polarização Induzida), até então pouco utilizados, para a prospecção de minérios em rochas ferríferas do Quadrilátero Ferrífero. Melo *et al.* (2015) e Nogueira *et al.* (2016) também fizeram uso de métodos geofísicos rasos (Eletrorresistividades, Sísmica de Refração Rasa e Magnetometria) para caracterização de depósitos ferríferos, na região de Carajás.

A utilização de ferramentas geofísicas rasas, por meio dos diversos métodos conhecidos, é extensivamente reconhecida na literatura espeleológica. No entanto, a maioria dos trabalhos geofísicos restringe-se a aquisições em feições cársticas relacionadas a rochas carbonáticas (*e.g.* MORGAN *et al.* 1999; FRANCSIK *et al.* 1999; PELLERIN, 2002; MANNEY *et al.* 2005). Já em relação a feições cavernícolas localizadas em litotipos ferruginosos, os estudos de assinaturas geofísicas ainda se encontram incipientes no cenário científico. Como exemplo de aplicabilidade, Cardoso (2016) utilizou-se de métodos geofísicos rasos (Eletrorresistividade, Magnetometria e Radiometria) como

ferramenta na prospecção de cavernas na região do Quadrilátero Ferrífero. Barbosa *et al.* (2016a), Barbosa *et al.* (2016b), Barbosa *et al.* (2017), Prosdocimi *et al.* (2018) e Gama *et al.* (2018) evidenciaram importantes aspectos lito-estruturais de cavidades em ambiente ferrífero por meio da integração de métodos geofísicos rasos. Recentemente, Barbosa (2018) desenvolveu uma metodologia denominada Geofísica Espeleológica, definindo contrastes elétricos específicos aplicados à investigação de instabilidade lito-estrutural em cavidades ferríferas, por meio da Eletrorresistividade.

1.2. LEGISLAÇÃO EM ESPELEOLOGIA NO BRASIL

Ao longo dos anos, as cavidades naturais têm-se destacado no contexto científico como grandes impulsionadoras do conhecimento. Necessitam, portanto, de subsídios técnicos e legais que garantam sua estabilidade estrutural e sua segurança patrimonial e física, principalmente por apresentarem uma dinâmica de constante evolução e modificação do espaço.

Em 1986 foi publicada uma das primeiras manifestações legais sobre o interesse do poder público na proteção e conservação de cavernas. Tal resolução criou a Comissão Especial para a preservação do Patrimônio Espeleológico Nacional (PEN). Além disso, a Constituição Federal de 1988 determinou que as cavidades naturais são bens da união. Dois anos depois, em 1990, criou-se o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e, em 1997, foi inaugurado o Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV), unidade descentralizada do ICMBio (Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade) e referência para estudo, proteção e manejo dessas estruturas.

Em 2004, foi promulgada pelo CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) a primeira menção de valor ou relevância de atributos para a formação do conceito de patrimônio espeleológico (CONAMA nº 347/2004). No entanto, muitas dúvidas relacionadas à preservação de cavernas surgiram em virtude de dificuldades na interpretação da legislação, que se mostrava ambígua.

No ano de 2008, em um contexto econômico de intensa atividade exploratória do setor

minerário, o Decreto Federal nº 6.640/2008 possibilitou a supressão de cavidades conforme o grau de relevância e, entre outras questões, as formas de compensação e os estudos necessários para a classificação do seu grau de relevância. Desta forma, por meio da resolução CONAMA nº 347/2004 e pelo Decreto Federal nº 6.640/2008, ficou estabelecida a preservação de uma área de influência sobre o patrimônio espeleológico, configurada pela projeção horizontal da caverna acrescida de um entorno de 250 metros, em forma de poligonal convexa. Os textos esclarecem que tal área poderá ser revista por meio de estudos específicos que confirmem a real área de influência da cavidade. O Artigo 3º do Decreto Federal nº 6.640/2008 estabelece o seguinte parecer sobre cavidades naturais de máxima relevância associada:

"[...] Art. 3º A cavidade natural subterrânea com grau de relevância máximo e sua área de influência não podem ser objeto de impactos negativos irreversíveis, sendo que sua utilização deve fazer-se somente dentro de condições que assegurem sua integridade física e a manutenção do seu equilíbrio ecológico." DECRETO FEDERAL nº 6.640, DE 07 NOVEMBRO DE 2008.

Em 2009, a Instrução Normativa nº 02/2009 estabeleceu a metodologia para a classificação dos graus de relevâncias, de baixo a alto. Nos anos seguintes, o CECAV publicou um documento com orientações básicas para realização de estudos espeleológicos sobre áreas de influência de cavidades, com o objetivo de direcionar e facilitar o licenciamento ambiental. Em agosto de 2016, foi publicado o Decreto Estadual (Minas Gerais) nº 47.041/2016, que tratou dos critérios para compensação e indenização dos impactos causados a cavidades. Recentemente, em 2017, o Governo Federal publicou duas Instruções Normativas (I.N.): a primeira estabeleceu procedimentos para definição de outras formas de compensação para supressão de cavidade de alta relevância (I.N. 001/2017); a segunda redefiniu os procedimentos para classificação de relevância de cavidades naturais subterrâneas (I.N. 002/2017).

Neste contexto de intensa fomentação técnica e legal, diversos estudos multidisciplinares relacionados a mecânica de rochas, hidrogeologia, sismologia, modelamento numérico, geofísica, análise de risco e etc. tiveram uma crescente demanda como forma de atender às questões espeleológicas restritivas e outorgadas ao longo dos anos. Para a indústria, o desafio foi desenvolver, por meio de tais estudos, metodologias que assegurem a integridade física da cavidade durante suas operações e, conseqüentemente, pleitear a

liberação de áreas anteriormente impedidas. Neste trabalho, o aprofundamento do conhecimento geofísico e geotécnico de uma cavidade natural de máxima relevância hospedada em ambiente de rochas ferríferas integra o conjunto de esforços desenvolvidos no intuito de testar ferramentas complementares, ágeis e eficientes aos estudos espeleológicos convencionais. São etapas fundamentais e pertencentes a esta dissertação: mapeamento geofísico em subsuperfície (planejamento adequado das seções, parametrização de aquisição, controle de qualidade de dados, processamento e interpretação de dados geofísicos) e a posterior correlação com o perfil laterítico associado a cavidades naturais em terrenos ferríferos.

A pesquisa foi desenvolvida na cavidade N4E-0022, localizada na Mina N4EN (Complexo Minerador de Carajás), em atividade e operada pela Vale S.A (Figura 1.1). A iniciativa deu-se por meio do convênio entre a Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e a Vale S.A., no âmbito do projeto intitulado Estudos Geoespeleológicos.



Figura 1.1 - (A): Visão da Mina N4EN – Complexo Carajás/PA; (B): Área localizada no entorno da cavidade N4E-0022.

1.3. JUSTIFICATIVAS E OBJETIVOS

Compreender a dinâmica, a resistência e as fragilidades das cavidades associadas às litologias ferríferas impulsionaram uma série de estudos que visam atender às normas de segurança estabelecidas, às questões econômicas de interesse e às exigências definidas pela legislação vigente. Os perigos mais comuns atribuídos à segurança de cavernas estão comumente associados à queda de blocos, aos soterramentos e ao colapso do teto (DUTRA, 2017). Tais processos podem ocasionar diversos impactos materiais ao

patrimônio espeleológico e a todo geossistema associado, assim como a equipamentos instalados em seus interiores e danos físicos àqueles que se incursionam por longos períodos de tempo, a fim de avançar nos estudos espeleológicos. Além do caráter relacionado à proteção da integridade física das cavidades, outro importante motivador para o aprofundamento de estudos relacionados a cavidades ferríferas está associado ao viés econômico. Grandes áreas bloqueadas levam a reduções de áreas potenciais a serem lavradas assim como a diversas consequências econômicas e sociais aos empreendimentos (AULER, 2015).

Desta forma, o entendimento da heterogeneidade dos horizontes lateríticos, que hospedam as cavidades naturais em terrenos ferríferos, faz-se necessário a partir do momento que a gênese e desenvolvimento das mesmas estão diretamente associados aos diferentes contatos lito-estruturais existentes (BRAGA *et al.* 2017), justamente em porções onde não é possível ocorrer o mapeamento geológico convencional. A geofísica, portanto, configura-se como uma ferramenta indireta e não invasiva que pode contribuir para a elucidação de zonas estruturalmente frágeis, principalmente associadas ao teto, mais susceptíveis a instabilizações. As assinaturas geofísicas obtidas com a utilização de métodos geofísicos rasos, integrados (Elétrico e Eletromagnético), serão associadas às características geológicas e geomecânicas dos diferentes horizontes lateríticos ferríferos existentes (crosta laterítica, zona de transição e saprolito de formação ferrífera, segundo GONÇALVES *et al.* 2016). Quando possível, poderão auxiliar na previsibilidade de alterações físicas (*e.g.* deslocamentos, intemperismo, fraturas) localizadas nas paredes que comumente evoluem para processos de colapsos e demais instabilizações. Os estudos irão compor uma série de trabalhos desenvolvidos com o intuito de subsidiar o entendimento das operações nas áreas de influência de cavidades de máxima relevância associada. Como objetivos específicos desta dissertação, pretende-se:

- Imagear feições pseudocársticas com o intuito de delimitar as estruturas/descontinuidades associadas;
- Estimar a espessura correspondente ao teto da cavidade;
- Definir os *ranges* de resistividades aparentes, no método da Eletroresistividade (CE), para os diferentes pacotes associados ao perfil de laterização de rochas ferríferas, incluindo-se a zona de maior potencialidade para formação de feições cavernícolas;

- Identificar regiões saturadas e delimitar zonas com maior susceptibilidade a instabilizações geotécnicas e, dessa forma, contribuir para as questões de previsibilidade de impactos físicos em cavidades;
- Estabelecer uma relação comparativa e balizada com dados obtidos de forma convencional, ou seja, através de ensaios *in situ* (esclerômetro de Schmidt), ensaios laboratoriais de compressão uniaxial (UCS), mapeamento geomecânico da cavidade, dados de termohigrômetros, furos de sondagem próximos e perfilagem geofísica. Todos os dados diretos foram fornecidos pela Vale S.A. e serão utilizados para comparação e validação dos métodos geofísicos.

1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em 7 capítulos. Nos capítulos iniciais (Capítulos 1 a 3) estão apresentados: introdução contendo a evolução da legislação direcionada aos estudos espeleológicos no país, a localização da área, objetivos e justificativas do trabalho, contextualização do tema, além da caracterização de cavidades ferríferas do geossistema Carajás e a caracterização local da cavidade em estudo.

Os Capítulos 4 e 5 apresentam a base teórica das metodologias geofísicas que foram utilizadas para os levantamentos. Descrevem, também, os tópicos pertinentes à aquisição de campo dos dados geofísicos, assim como aspectos operacionais específicos a cada metodologia proposta.

O Capítulo 6 aprofunda nas discussões obtidas pela interpretação dos dados geofísicos adquiridos. De forma integrada, as análises realizadas buscaram elucidar resultados notáveis alcançados pelo mapeamento geofísico. Em seguida, as discussões obtidas foram balizadas com outros dados disponibilizados.

O capítulo final da dissertação (Capítulo 7) apresenta as considerações finais do trabalho, além das proposições sugeridas para próximas pesquisas. As seções geofísicas e os dados de sondagem e perfilagem utilizados como balizamento da pesquisa podem ser consultados nos Anexos.

2. CAVIDADES FERRÍFERAS DO GEOSSISTEMA CARAJÁS/PA

2.1. INTRODUÇÃO

De acordo com a resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 347, de 10 de setembro de 2004, cavidade natural subterrânea é definida como:

[...] todo e qualquer espaço subterrâneo penetrável pelo ser humano, com ou sem abertura identificada, popularmente conhecido como caverna, gruta, lapa, toca, abismo, fuma e buraco, incluindo seu ambiente, seu conteúdo mineral e hídrico, as comunidades bióticas ali encontradas e o corpo rochoso onde as mesmas se inserem, desde que a sua formação tenha sido por processos naturais, independentemente de suas dimensões ou do tipo de rocha encaixante. (RESOLUÇÃO CONAMA nº 347, DE 10 DE SETEMBRO DE 2004. Publicada no DOU nº 176, em 13/09/2004, págs. 54-55).

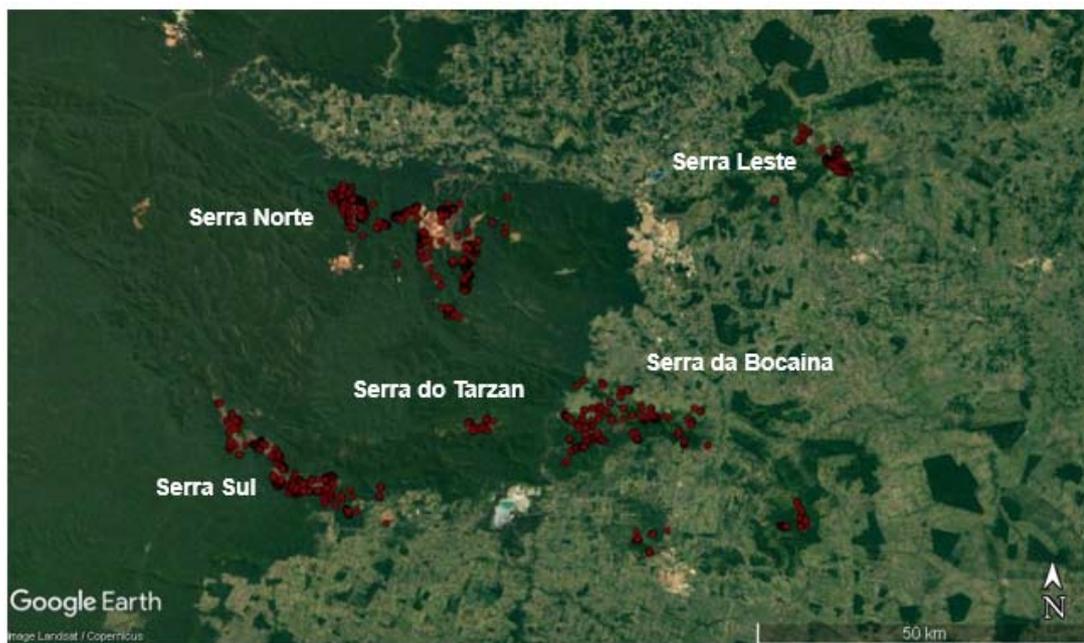
Segundo dados do Anuário Estatístico do Patrimônio Espeleológico Brasileiro, disponibilizados pelo CECAV em 2018, o número de cavernas prospectadas e registradas no Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE) ultrapassa 18.350 unidades (Figura 2.1). No entanto, grande parte dessas cavernas encontram-se hospedadas em formações carbonáticas (51,9%) e, aproximadamente, 13,7% estão em formação ferrífera (CECAV, 2018).



Figura 2.1 - Evolução do número de cavidades cadastradas (CECAV, 2018).

Cavidades em formações ferríferas ocorrem nos chamados geossistemas ferruginosos: unidades espaciais cujo substrato litológico é constituído por rochas ferríferas como jaspilitos, itabiritos, cangas, metadiamicritos ferruginosos, filitos ferruginosos, entre outras (SOUZA & CARMO, 2015). No Brasil, destaca-se a ocorrência de seis geossistemas ferruginosos: Quadrilátero Ferrífero/MG, Morraria do Urucum/MS, Serra dos Carajás/PA, Vale do Rio Peixe Bravo/MG, Bacia do Rio Santo Antônio/MG e Caetité/BA.

O número de unidades cavernícolas em formações ferríferas apresentou um significativo acréscimo entre os anos de 2005 e 2014 nos estados de Minas Gerais e Pará em virtude de estudos relacionadas ao licenciamento ambiental. Tais estudos foram impulsionados pela expansão da mineração de ferro nesses estados e, atualmente, estima-se que o cenário seja de, aproximadamente, 3.000 unidades cavernícolas sendo, aproximadamente, 1.700 em Carajás/PA (Figura 2.2) e 1.300 no Quadrilátero Ferrífero/MG (Figura 2.3), segundo dados de 2018 do Instituto Pristino.



● Cavidades Naturais

Fonte: Instituto Pristino (2018).

Figura 2.2 - Principais unidades cavernícolas pertencentes ao Geossistema Ferruginoso Carajás/PA.

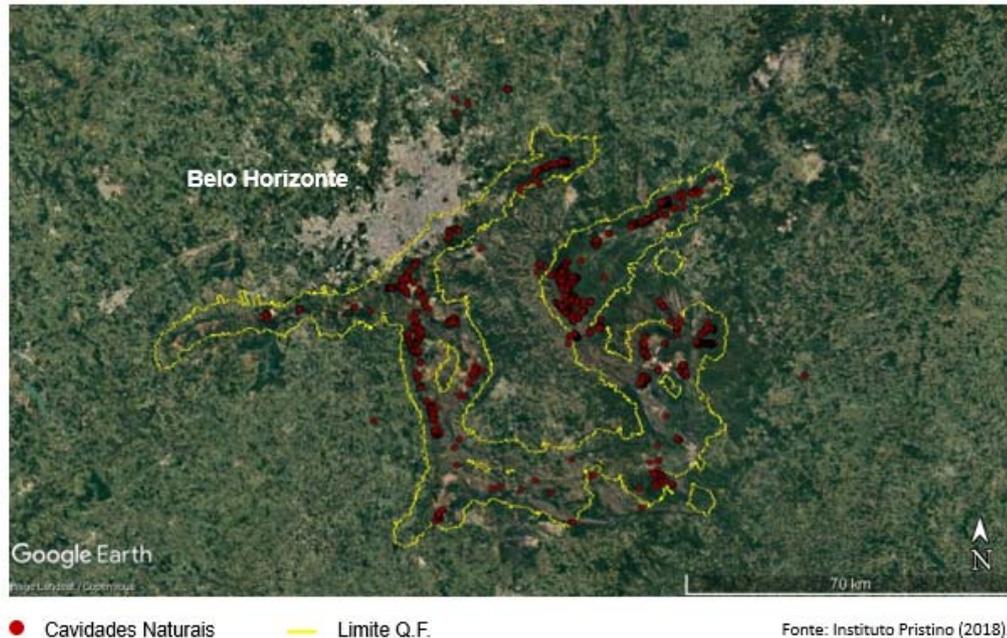


Figura 2.3 - Principais unidades cavernícolas pertencentes ao Geossistema Ferruginoso Quadrilátero Ferrífero/MG.

2.2. PROVÍNCIA CARAJÁS

A Província Carajás representa a porção crustal mais antiga e melhor preservada do Cráton Amazônico (VASQUEZ & ROSA-COSTA, 2008). Localizada na sua borda sul-oriental, no sudeste do estado do Pará, constitui uma das maiores províncias minerais do planeta. Originalmente, essa província integrava a Província Amazônia Central (AMARAL, 1974), relacionada ao Ciclo Transamazônico.

Nesta dissertação, adotou-se a proposta de Santos (2003) que dividiu a Província Carajás nos domínios Rio Maria, a sul, e Carajás, a norte. O limite entre os dois domínios, segundo o autor, foi definido com base em anomalias magnetométricas, não coincidentes com contatos geológicos.

O Domínio Rio Maria é caracterizado por uma crosta juvenil mesoarqueana, com sequências de *greenstone belts* e granitoides do tipo TTG. A área de trabalho, segundo a divisão do mapa geológico (Figura 2.4) proposto por Vasquez & Rosa-Costa, (2008), encontra-se no Domínio Carajás.

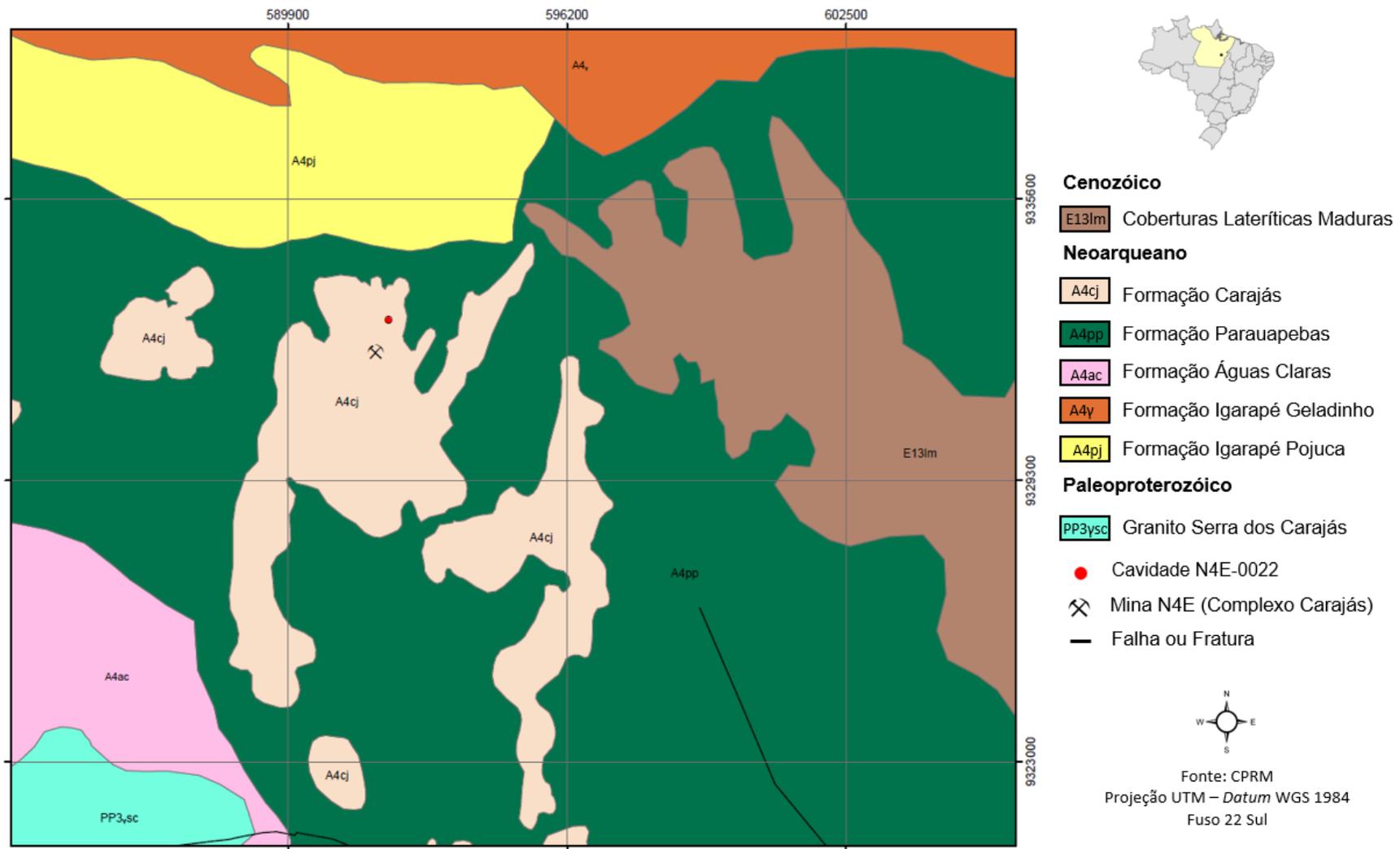


Figura 2.4 - Mapa Geológico Regional Simplificado (CPRM, 2008).

O Domínio Carajás é constituído por uma associação de alto grau metamórfico que representa o embasamento mesoarqueano de sequências metavulcano-sedimentares (*greenstone belts, sensu lato*), neoarqueanas e complexos máfico-ultramáficos associados. Associações de granitos neoarqueanos, em geral evoluídos composicionalmente, são contemporâneos às sequências metavulcano-sedimentares. Uma cobertura sedimentar de plataforma continental Neoarqueana recobre os *greenstone belts*. Neste domínio, as associações tectônicas do Paleoproterozóico são corpos máfico-ultramáficos siderianos e granitos tipo A orosirianos.

A sequência metavulcano-sedimentar de Carajás, denominada de Supergrupo Itacaiúnas (DOCEGEO, 1988), engloba os grupos Grão-Pará, Igarapé-Salobo, Igarapé-Pojuca, Igarapé-Bahia e Buritirama. Tais sequências, de natureza vulcano-sedimentar, dispõem-se na direção E-W, paralelas à estruturação regional.

O Grupo Grão-Pará ($\pm 2,76$ Ba, MACHADO *et al.* 1991), unidade regional de maior expressão e relevância no contexto deste trabalho, é constituído por uma espessa sequência de rochas vulcânicas de topo e base (Formação Parauapebas) e jaspilitos com minério de ferro (Formação Carajás) que ocorrem nos flancos norte e sul da Serra dos Carajás (MEIRELES *et al.* 1984). Este grupo é descrito como repousando, discordantemente, sobre os gnaisses do embasamento denominado Complexo Xingu (SILVA *et al.* 1974; MACHADO *et al.* 1991).

- **Formação Parauapebas**

Esta unidade corresponde às rochas vulcânicas máficas que ocorrem na base e topo da Formação Carajás (minério), representando derrames basálticos, além de rochas vulcânicas félsicas subordinadas e intrusões máficas (Figura 2.5). O termo Formação Parauapebas foi citado inicialmente por Meireles *et al.* (1984) apenas para a unidade basáltica inferior e, posteriormente, adotado para toda a sequência vulcânica do Grupo Grão-Pará, a exemplo de Araújo & Maia (1991) e Pinheiro (1997).

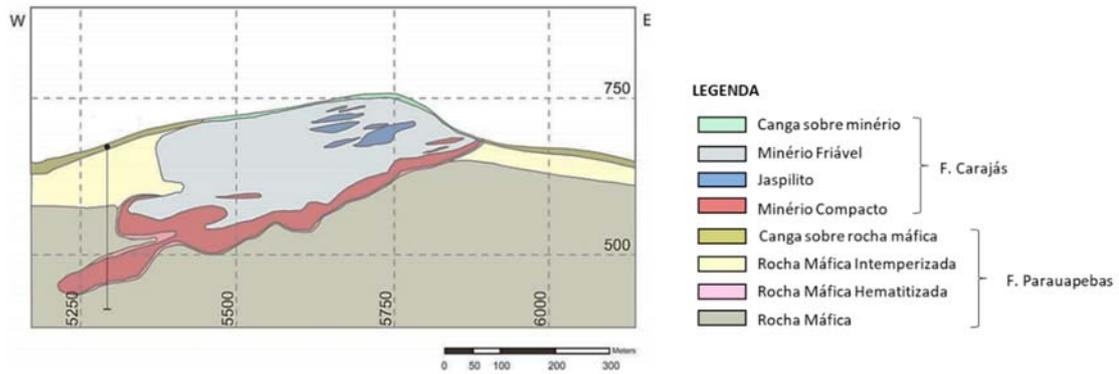


Figura 2.5 - Perfil Geológico esquemático para o Complexo Carajás (grid em coordenadas locais). Nota-se as rochas mineralizadas pertencentes à Formação Carajás em contato inferior e superior com as rochas máficas da Formação Parauapebas (modificado de FIGUEIREDO E SILVA, 2009).

De modo geral, as rochas máficas da Formação Parauapebas são descritas como corpos estratiformes sob a Formação Carajás, com contatos concordantes que refletem uma contemporaneidade entre essas duas formações (BEISIEGEL *et al.* 1973; GIBBS & WIRTH, 1990; MACAMBIRA, 2003). As rochas máficas incluem os derrames basálticos e rochas intrusivas como *sills* e diques, que receberam variadas classificações: basaltos, basaltos andesíticos, andesitos, andesitos basálticos, traquiandesitos, dacitos, quartzo dioritos, dioritos e gabros (GIBBS *et al.* 1986; OLSZEWSKI *et al.* 1989; ARAÚJO *et al.* 1991; LINDENMAYER *et al.* 1994; TEIXEIRA *et al.* 1997; HUHN *et al.* 1999b; MEIRELLES & DARDENNE, 1991; MACAMBIRA, 2003; SILVA *et al.* 2005; ZUCCHETTI, 2007).

Ocorrem também associados aos derrames basálticos inferiores, níveis pouco espessos de rochas piroclásticas básicas a intermediárias, além de derrames e tufos félsicos descritos como riolitos, lapilli tufos, tufos vítreos e de cristais (GIBBS *et al.* 1986; MEIRELLES & DARDENNE, 1991). A sequência basáltica superior, descrita por Gibbs *et al.* (1986), caracteriza-se por apresentar um percentual menor de derrames basálticos, tufos finos, siltitos tufáceos, filitos, cherts e grauvas associados.

- **Formação Carajás**

Esta unidade contém o protominério das jazidas de ferro de Carajás, descoberto em 1967 pelos geólogos da Companhia Meridional de Mineração. Constitui os topos de vários platôs da Serra dos Carajás, localmente conhecidos como serras Norte e Sul. Sua espessura é estimada em torno de 200 a 300 metros e os contatos inferior e superior com a Formação Parauapebas são descritos como concordantes por CVRD/CMM (1972) e Beisiegel *et al.* (1973). No entanto, Meirelles & Dardenne (1991) admitem que tais relações podem ser mais estruturais do que estratigráficas.

A Formação Carajás é descrita como constituída por jaspilitos com bandamento definido pela alternância de micro e mesobandas de óxidos de ferro (hematita, magnetita e martita), jaspe (*chert* impregnado por hematita fina) e/ou *chert* branco, além de carbonatos subordinados. A ocorrência de jaspilitos em ampla área possibilitou o desenvolvimento de regiões ricas em minério de ferro de alto teor (> 65% Fe). Desta forma, a Província Mineral de Carajás tornou-se uma das mais importantes reservas minerais do Brasil e do mundo, além de uma das áreas mais estudadas do Cráton Amazônico.

2.3. ASPECTOS ESTRUTURAIS

A estrutura dominante da Serra dos Carajás é definida por Beisiegel *et al.* (1973) como um sinclínório falhado e eixo WNW-ESE. Araújo & Maia (1991) definem como principal estrutura da Província Mineral de Carajás o Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas, de orientação E-W. Tal Cinturão é formado pelos subdomínios transcorrentes Carajás e Cinzento. A Falha Carajás representa a principal estrutura do Sistema Transcorrente de mesmo nome e cuja direção principal é NW-SE. A continuidade regional das diferentes sequências vulcano-sedimentares na Província Carajás apresenta uma estruturação aproximadamente NE-SW, dobrada com o desenvolvimento de um sistema de eixo com caimento moderado, aproximadamente para WNW, intersectado por diversas falhas de orientação geral E-W, subparalelas ao plano axial. Fotolineamentos interpretados na região apresentaram estruturas com *trend* regional de direções principais NW-SE e E-W. Tais lineamentos puderam ser comprovados pela fusão de dados altimétricos e

aeromagnetométricos que identificaram os principais lineamentos com expressão regional na Província Mineral de Carajás (CARNEIRO, 2005).

Tais informações estruturais coletadas de forma preliminar são de extrema importância para as etapas a serem executadas posteriormente. As fases de revisão bibliográfica, contextualização do tema, descrição dos aspectos pertinentes ao local do trabalho e fotointerpretação com identificação de informações estruturais prévias também constituem etapas fundamentais para as aquisições geofísicas, uma vez que norteiam o planejamento das seções geofísicas e auxiliam nas análises e interpretações subsequentes.

2.4. PERFIL DE LATERIZAÇÃO DA FORMAÇÃO FERRÍFERA

O perfil de intemperismo de rochas ferríferas constitui tema abordado por diferentes autores na literatura técnica como Dorr (1964), Eichler (1967), Chemale Jr. *et al.* (1987), Rosière & Chemale (2001), Costa (2007), entre outros. Segundo Rosière & Chemale (2001), o perfil laterítico varia de alguns metros até dezenas de metros e protege as formações ferríferas subjacentes da oxidação e hidratação, permitindo maior efetividade da lixiviação de SiO₂.

Por meio de estudos focados no perfil laterítico na região de N4EN, Complexo Carajás, Gonçalves *et al.* (2016) apresentaram, conforme descrito abaixo, a esquematização do perfil laterítico composto, do topo para a base, por uma Crosta Laterítica, seguida por uma Zona de Transição e, por fim, um horizonte Saprolítico basal que grada para a formação ferrífera sã, em profundidade (Figura 2.6).



Figura 2.6 - Perfil laterítico esquemático da região de N4EN, Complexo Carajás (adaptado de GONÇALVES *et al.*, 2016).

A Crosta Laterítica, ou couraça ferruginosa (*duricrust*), compreende a formação superficial endurecida resultante de processos ligados à evolução da paisagem e do relevo, ou seja, diretamente ligada ao intemperismo e pedogênese policíclicos. Tal porção superficial, também conhecida como canga, apresenta denominações diversas em virtude do grau de resistência e alteração acometida. A canga detrítica, de alta resistência, é formada por quantidade variável de fragmentos detríticos compostos por clastos de hematita sub-angular a angular, cimentados por óxidos/hidróxidos de alumínio e/ou ferro. Já a canga estruturada, de média resistência, compreende o estágio avançado de alteração pela hidratação dos minerais de ferro, lixiviação da sílica e presença de estruturas da rocha são ainda preservadas. A canga química, produto de alteração de rochas máficas, é um termo aplicado para a canga com poucos fragmentos detríticos e muita limonita. Geralmente, é muito aluminosa e mais frequente em encostas suaves. Estudos recentes revelam que os poros existentes na couraça, na maioria das vezes, não estão conectados, o que dificulta a transmissão de água no sistema pelos poros. Desta forma, as discontinuidades existentes e demais caminhos preferenciais acabam por contribuir para uma maior infiltração da água no sistema (CASTRO, 2008).

O Horizonte de Transição, localizado entre o Horizonte Saprolítico e a Crosta Laterítica, apresenta espessura irregular, baixa condição geotécnica, alta porosidade e permeabilidade, além de fraqueza estrutural/textural. Tais características acarretariam uma rápida erosão desse horizonte, caso o mesmo não fosse protegido pela crosta endurecida superficial (MAURITY & KOTSCHOUBEY, 1995). Tal fato também está em consonância com o exposto por Rosière & Chemale (2001). A presença de poros e textura cavernosa dá, a esse horizonte, uma condição de baixa densidade (MAURITY & KOTSCHOUBEY, 1995), que acaba por transformá-lo no principal horizonte de gênese e desenvolvimento de cavidades em ambiente ferrífero. O contato entre o Horizonte de Transição e a Crosta Laterítica é irregular e, por vezes, sem definição.

Entre o *bedrock* e o Horizonte de Transição encontra-se um espesso pacote saprolítico com baixa resistência geotécnica. Tal horizonte pode alcançar até 400 metros de profundidade e apresenta porções de rocha parcialmente intemperizada, com preservação da textura original (GONÇALVES *et al.* 2016). Normalmente, apresenta coloração amarelada e esbranquiçada, constituição argilosa, caulínica com contribuição de alumínio e/ou óxidos e hidróxidos de ferro. O contato com o Horizonte de Transição apresenta-se normalmente abrupto ou ligeiramente irregular. A Figura 2.7 apresenta uma fotografia de talude com face exposta na Mina N4EN na qual se pode visualizar os diferentes horizontes intempéricos descritos acima.



Figura 2.7 - Perfil laterítico a partir da inspeção visual de taludes da região de N4EN, Complexo Carajás (adaptado de GONÇALVES *et al.*, 2016).

2.5. GÊNESE DAS CAVIDADES FERRÍFERAS

Diversos autores contribuíram para o entendimento da gênese de cavidades em ambientes de formação ferrífera, resultando em um avanço significativo da temática nos últimos anos. Os trabalhos pioneiros sobre a origem de cavidades ferríferas foram inicialmente realizados por Pinheiro *et al.* (1985), que elaboraram um modelo genético geral para as cavernas situadas na Serra dos Carajás.

Tais trabalhos foram, posteriormente, detalhados por Pinheiro & Maurity (1988) que propuseram a formação de cavidades nas porções superficiais do perfil de laterização por meio da ação conjunta de processos químicos (formação de complexos alumino-ferrosos e remoção de argilo-minerais instáveis de Fe, Al e Si) e posterior ação erosiva de processos físicos em ambiente freático. Processos hidrológicos de vertentes, predominantes na zona vadosa, acelerariam a erosão, resultando em abatimentos e acomodações mecânicas.

Posteriormente, Maurity & Kotschoubey (1995) resumiram a formação de cavidades e demais feições em ambientes ferríferos, definidas pelos autores como pseudocársticas, em virtude de fatores estruturais e pela existência de zonas de baixa densidade. A gênese e evolução estariam condicionadas a três estágios principais (Figura 2.8).

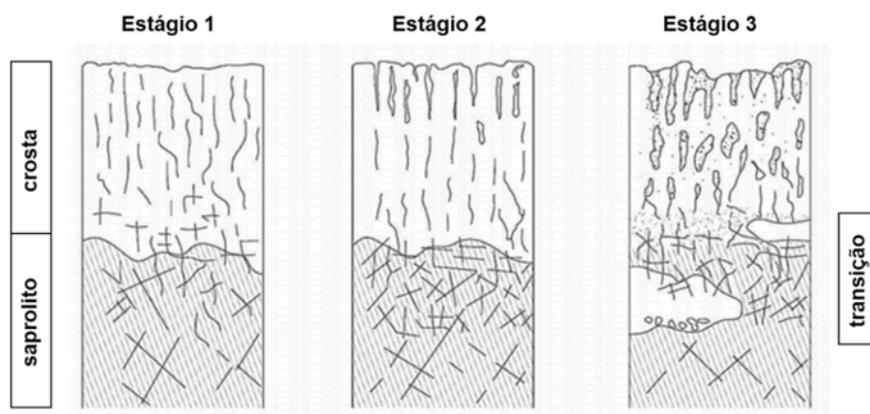


Figura 2.8 - Evolução da zona de baixa densidade na interface crosta-saprolito (modificado de MAURITY & KOTSCHOUBEY, 1995).

No primeiro momento, enquanto a maior parte da sílica é lixiviada para fora do perfil, parte dos elementos Fe e Al, oriundos da dissolução da canga endurecida, redepõem em poros e vacúolos da própria couraça laterítica, contribuindo para a sucessão cíclica de formação e destruição de canga. Outra parte dos elementos Fe e Al migram na forma de soluções coloidais para zonas mais profundas do manto de alteração. Em um segundo momento, a desestabilização de complexos solúveis em Fe e Al, em profundidade, acabam por impulsionar a precipitação de goethita, hematita e gibbissita em fraturas e fissuras no topo da zona saprolítica. Conjuntamente, a dissolução da matriz argilosa do manto saprolítico de formação ferrífera, predominantemente caulínico, resulta na formação de alumina remanescente que evolui para um produto gibbissítico poroso e friável, altamente susceptível a processos intempéricos.

O terceiro momento é marcado pela ação dos fatores mecânicos, em que os processos erosivos atuam sobre as rochas que já se encontram fragilizadas pelo ataque químico da etapa anterior. O aumento da porosidade e permeabilidade do meio, conjuntamente com a remoção de parte fina das partículas de gibbissita, propiciam o aparecimento de vazios, cada vez mais abundantes, e, conseqüentemente, a formação de cavidades. Essas se localizam, principalmente, na interface irregular entre a canga e a zona de alteração do

minério de ferro (saprolito). Dessa forma, individualizaram-se zonas caracterizadas pela baixa densidade.

A existência de cavidades inteiramente inseridas em canga também foi abordada por Maurity & Kotschoubey (1995). Com a redistribuição de Fe e Al e a matriz argilosa da canga dessilicificada, ocorre a formação de um cimento hematítico e/ou gibbsítico envolvendo fragmentos lateríticos e hematíticos do conglomerado. Maurity & Kotschoubey (1995) consideram que esse cimento, apesar de apresentar alta porosidade e susceptibilidade erosiva, é mais estável quimicamente que os fragmentos ou seixos hematíticos da canga já existentes. Tais clastos seriam, portanto, preferencialmente atacados, gerando uma porosidade macrocelular sustentada pelo cimento recém transformado.

Outros autores, como McFarlane & Twidale (1987), acreditam que a dissolução do óxido de ferro é essencial na formação de cavidades em minério de ferro. No entanto, devido ao caráter pouco solúvel dos óxidos de ferro, esses autores evocam a atuação de agentes microbiológicos na contribuição da dissolução do ferro.

Piló & Auler (2009) referem-se às primeiras cavernas geradas em profundidade na formação ferrífera como “minerogênicas”, por estarem intimamente associadas à mineralização da formação ferrífera. Por meio de reações químicas no interior da massa rochosa, incluindo processos de enriquecimento hipogênicos e supergênicos, são geradas zonas de alta porosidade que se expandem e acabam por desenvolver cavidades.

Para Dutra (2013), a maioria das cavidades ocorrem em canga e no contato canga/rocha. Erosão/dissolução constituem processos predominantes para a formação de feições cavernícolas e os processos de abatimentos mostram-se responsáveis pela evolução das mesmas. Fatores como a oscilação do nível de lagoas e cursos de água em regiões de baixa vertente, assim como erosões associadas aos escoamentos pluviais e processos fluviais (*e.g.* erosão em cabeceira de drenagem, remontante) também são importantes contribuintes para a gênese e evolução de cavidades em litologias associadas ao ferro. Estudos estruturais recentes (BRAGA *et al.* 2017) demonstraram o forte controle estrutural de cavernas em formações ferríferas, sejam por falhas, fraturas ou direção dos

planos de bandamento. Dessa forma, o seu desenvolvimento e ampliação estariam intimamente atrelados a alguma descontinuidade que facilite a percolação de fluidos e/ou cause o deslocamento de blocos (Figura 2.9).

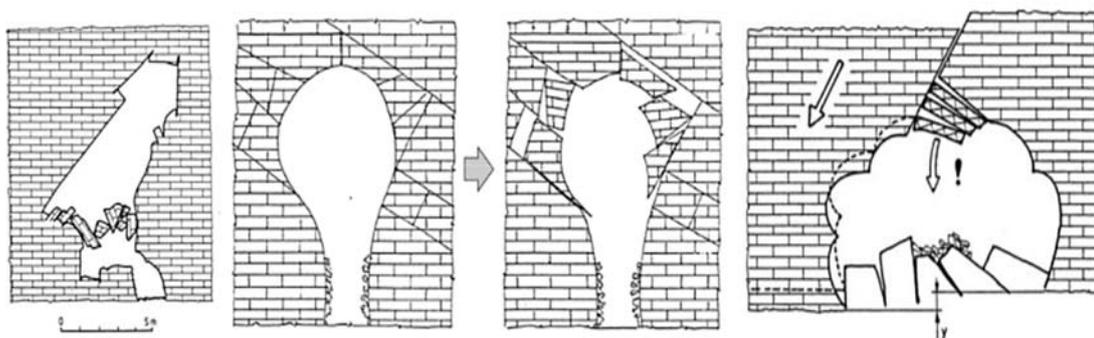


Figura 2.9 - Instabilidades no teto de cavidades (SZUNYOGH, 2010).

Piló *et al.* (2013) destacam processos de bioerosão na formação ou ampliação de cavernas em brechas ferríferas. Paleotocas são exemplos de bioerosão e configuram-se como uma rede de passagem em rochas alteradas na forma de túneis escavados em seções elípticas ou circulares. Essas cavidades, provavelmente, foram utilizadas por grandes mamíferos (particularmente tatus) extintos, que habitavam a região de Carajás durante o Terciário e o Quaternário. Estudos feitos por Parker *et al.* (2013), na região de Carajás, também atribuem a gênese de algumas cavidades a comunidades microbianas.

2.6. ESPELEOMETRIA E MORFOLOGIA DAS CAVIDADES FERRÍFERAS

As cavernas em terrenos ferríferos da região de Carajás/PA estão situadas em cotas altimétricas que variam entre 600 e 700 metros e podem posicionar-se, segundo Piló & Auler (2009), nas bordas de lagoas, cabeceiras e bordas de drenagens e nas bordas dos platôs, incluindo alta, média e baixa vertente. As cavidades podem apresentar padrão de desenvolvimento do tipo linear (uma direção principal de desenvolvimento), câmara irregular (caracterizado por salões interconectados, por passagens estreitas e padrão planimétrico mais globular) ou a mistura de ambos (PILÓ & AULER, 2009), conforme pode ser observado na Figura 2.10.



Figura 2.10 - Padrões de cavidades em litologias de ferro. (A): padrão do tipo linear; (B): padrão do tipo irregular; C: padrão do tipo misto (DUTRA, 2013).

Em razão das pequenas dimensões da grande maioria das cavernas na região da Serra dos Carajás, o padrão morfológico encontra-se inibido. Apresentam entradas estreitas, pequenos salões únicos, com apêndices que se afunilam em pequenos canais e média de projeção horizontal de 33 metros, aproximadamente. As seções transversais e longitudinais demonstram irregularidades, com presença de pilares, pendentes, canalículos e claraboias (Figura 2.11). As paredes e tetos apresentam, muitas vezes, textura do tipo *spongework* (esponjosa), definida por Palmer (2009).

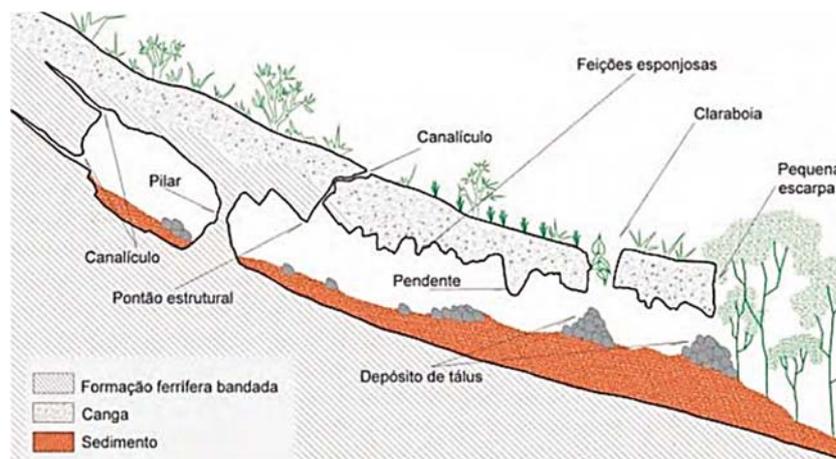


Figura 2.11 - Perfil síntese de uma caverna ferrífera com as principais feições morfológicas (PILÓ *et al.*, 2015).

A grande maioria das cavidades na região de Carajás/PA encontram-se secas, tendo a presença de empoçamentos e gotejamentos, mais frequentes em períodos chuvos, decorrentes de águas pluviais infiltradas via pequenos condutos e descontinuidades geológicas. A maioria das cavernas encontram-se próximas à superfície e conectadas ao sistema hidrológico das atuais vertentes.

3. CARACTERIZAÇÃO DA CAVIDADE N4E-0022 DA MINA N4EN

3.1. LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

A área foco deste estudo localiza-se no entorno da cavidade situada na Mina N4EN. Tal cavidade, denominada N4E-0022, apresenta, respectivamente, coordenadas 592.183 m E e 9.332.896 m S, zona 22M, *datum* WGS-84, e encontra-se no setor setentrional do Complexo Minerador de Carajás (Figura 3.1).

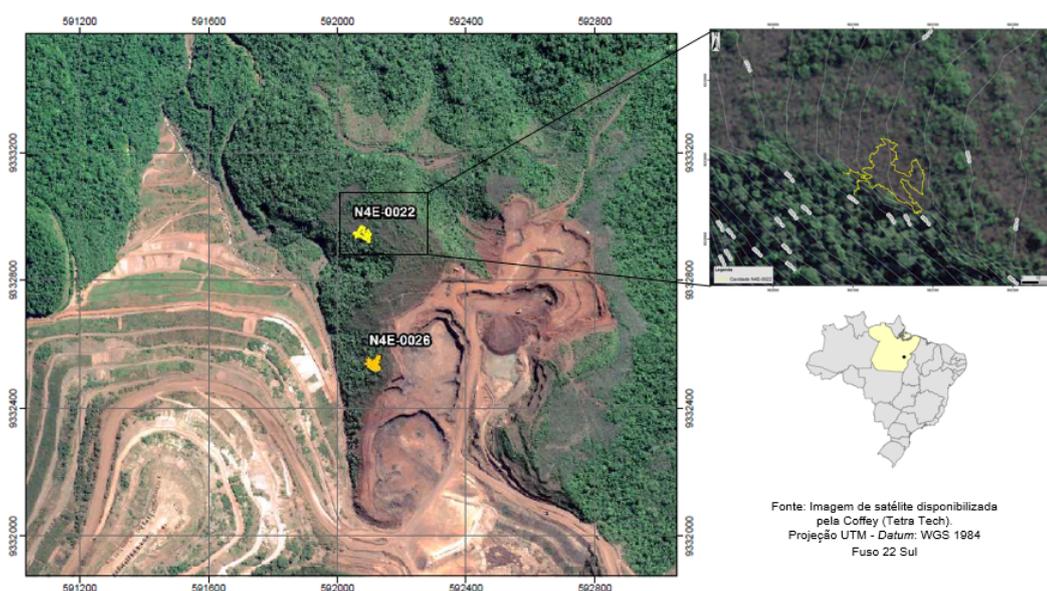


Figura 3.1 – Localização da cavidade N4E-0022 e sua projeção horizontal.

A Mina N4EN, em atividade e operada pela Vale S.A., está situada a 860 km de Belém/PA e a, aproximadamente, 30 km de Parauapebas/PA. A principal via de acesso, a partir do município de Parauapebas, é a PA-275 até a portaria da Floresta Nacional de Carajás, localizada no mesmo município. Deste ponto, segue-se pela Estrada Raymundo Mascarenhas passando pelo Complexo Minerador de Ferro de Carajás até a Mina N4EN (Figura 3.2).

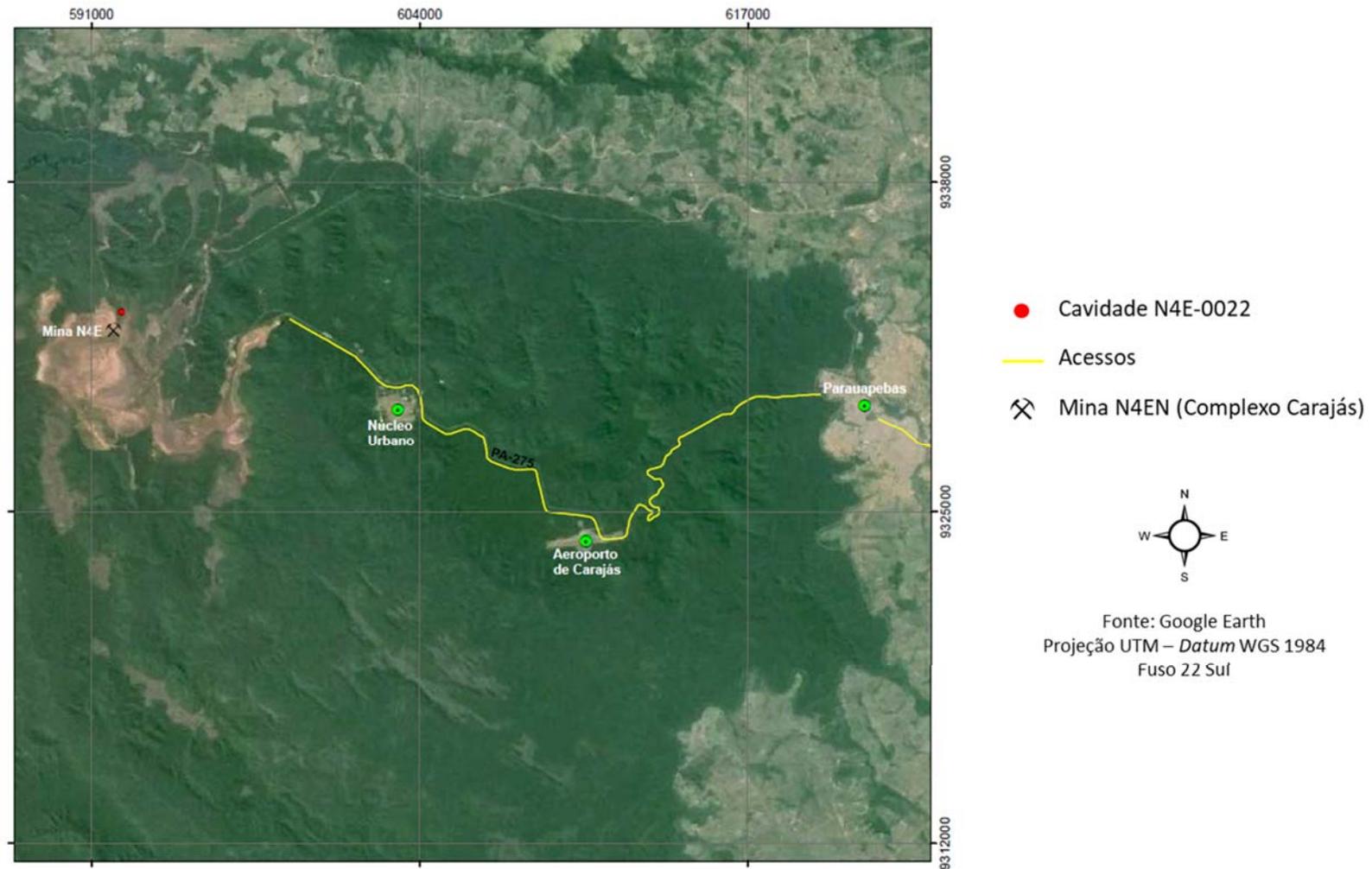


Figura 3.2 - Localização da área (Mina N4EN – Complexo Carajás) e vias de acesso.

A cavidade está inserida em região de alta vertente, com escarpamento de 9 metros de altura, aproximadamente. Tal feição geomorfológica apresenta direção N50W, com diminuição de altura lateralmente à entrada da cavidade (Figura 3.3). O paredão de acesso à caverna encontra-se recuado na forma de um discreto anfiteatro, que abriga um piso plano e úmido, típico das cavidades pertencentes ao Complexo Carajás (Figura 3.4).



Figura 3.3 - (A): Paredão de acesso à cavidade N4E-0022; (B): Visão do escarpamento que abriga a entrada da cavidade.



Figura 3.4 - (A): Vista da entrada da cavidade N4E-0022; (B): Conduto de acesso à cavidade.

3.2. LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO E REGISTROS ESPELEOMÉTRICOS

A cavidade N4E-0022 apresenta 3 (três) salões principais (Figura 3.5): um salão norte em que há registros de empoçamento; salão leste com presença de canga de seixos e calhaus no teto e paredes; e um grande salão principal, alongado segundo a direção NW-SE. As conexões entre as galerias ocorrem por estreitamentos. Os tetos e paredes da cavidade mostram-se irregulares; há registros de gotejamentos associados a pequenos

empoçamentos e o piso, em geral, condiciona levemente um padrão de escoamento para fora da gruta (CARSTE, 2013).

A seguir, são apresentados a planta da cavidade N4E-0022 (Figura 3.5), executada por meio de técnica de topografia subterrânea, e os respectivos perfis (Figura 3.6) elaborados a partir de seções-tipo. A estrada e os salões estão identificados e também podem ser visualizados na planta.

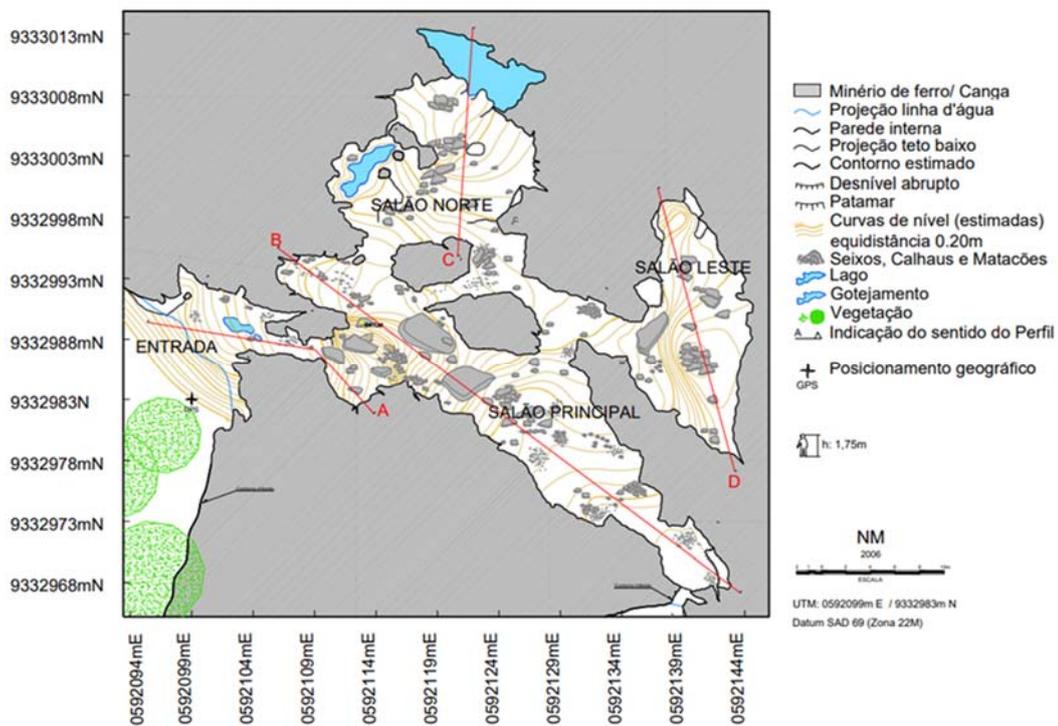


Figura 3.5 - Planta topográfica da cavidade N4E-0022 (Vale S.A.).

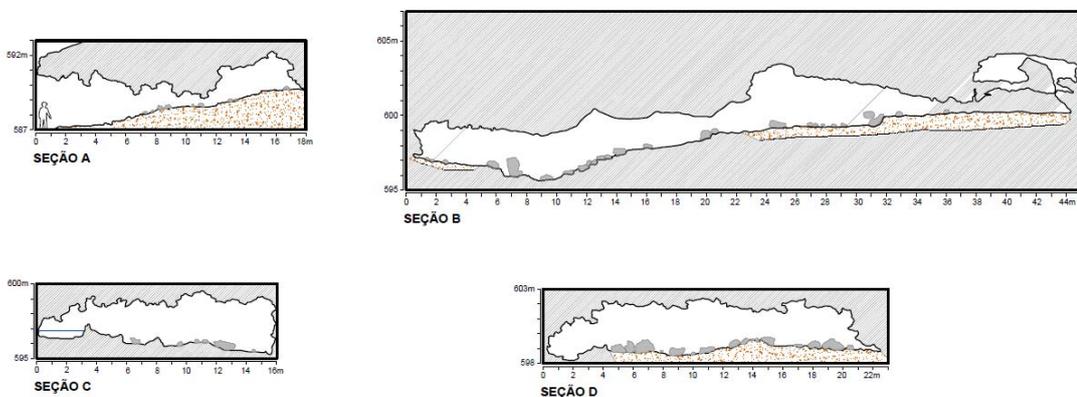


Figura 3.6 - Perfis esquemáticos da cavidade N4E-0022 (Vale S.A.).

A Tabela 3.1 apresenta alguns registros espeleométricos da cavidade, executados a partir de estudos espeleológicos regulares para a execução da planta topográfica.

Tabela 3.1 - Registros espeleométricos da cavidade N4E-0022 (Vale S.A.).

Registros	Características
Nome da Cavidade	N4E-0022
Coordenadas UTM	592099 m E e 9332983 m N
<i>Datum</i>	SAD-69
Altitude (m)	586
Projeção Horizontal (m)	175
Desnível (m)	12.4
Área (m ²)	715
Volume (m ³)	1550
Padrão de Desenvolvimento	Misto

Com base nos atributos espeleométricos e biológicos, a cavidade N4E-0022 foi classificada como de máxima relevância. A determinação desse grau de relevância das cavernas é realizada através de parâmetros definidos pelo Decreto Federal nº 6640, em 07 de novembro de 2008. Em relação aos atributos físicos, foram considerados com dimensões notáveis em extensão, área ou volume; já em relação aos atributos biológicos, constatou-se a presença de troglóbio¹ raro, com baixa frequência de registro.

A cavidade N4E-0022 é um exemplo de caverna desenvolvida através de setores ou galerias independentes, com posterior conexão (CARSTE, 2013). Os maiores salões estão em níveis topográficos superiores, cuja remoção dos contribuintes frente ao intemperismo acaba por favorecer uma expansão mais rápida dos condutos.

Em relação aos espeleotemas, o grande destaque desta caverna são as crostas de material ferruginoso, que recobrem amplas superfícies, principalmente nas áreas mais úmidas. Em algumas porções é possível observar a injeção de solutos e formação de crostas mais resistentes que o meio circundante do tipo *boxwork*. Tais feições, em alto relevo, projetam das paredes, do teto ou de pisos argilosos, na forma de lâminas ou placas em estrutura

¹ Os troglóbios são animais cuja distribuição restringe-se, exclusivamente, ao meio subterrâneo e podem apresentar diversos tipos de especializações morfológicas, fisiológicas, e comportamentais que provavelmente evoluíram em resposta às pressões seletivas presentes em cavernas. A maioria dos troglóbios abrange artrópodes como aranhas, centopeias, pseudoescorpiões e insetos (REBOLEIRA, 2012).

reticulada (HILL & FORTI, 1997). Crostas brancas também foram registradas na cavidade N4E-0022 e sua mineralogia, conforme análises realizadas em outras cavernas, compreende minerais do grupo dos sulfatos e fosfatos (PILÓ & AULER, 2011).

3.3. MAPEAMENTO LITOESTRUTURAL E GEOMECÂNICA DA CAVIDADE

Litologicamente, a cavidade encontra-se no contato entre a Formação Ferrífera Bandada (FFB) e a Canga Detrítica (Figura 3.7). A rocha ferrífera, em geral, apresenta-se muito fragmentada, com setores alterados e bandamento com medidas N30W/68NE, N40W/subvertical, N70W/65NE, N30W/subvertical, N-S/subvertical, N70W/subvertical. Há presença de sedimentos terrígenos avermelhados e amarelados e blocos abatidos nos eixos principais, em decorrência de frequentes setores alterados no teto da caverna (CARSTE, 2013).

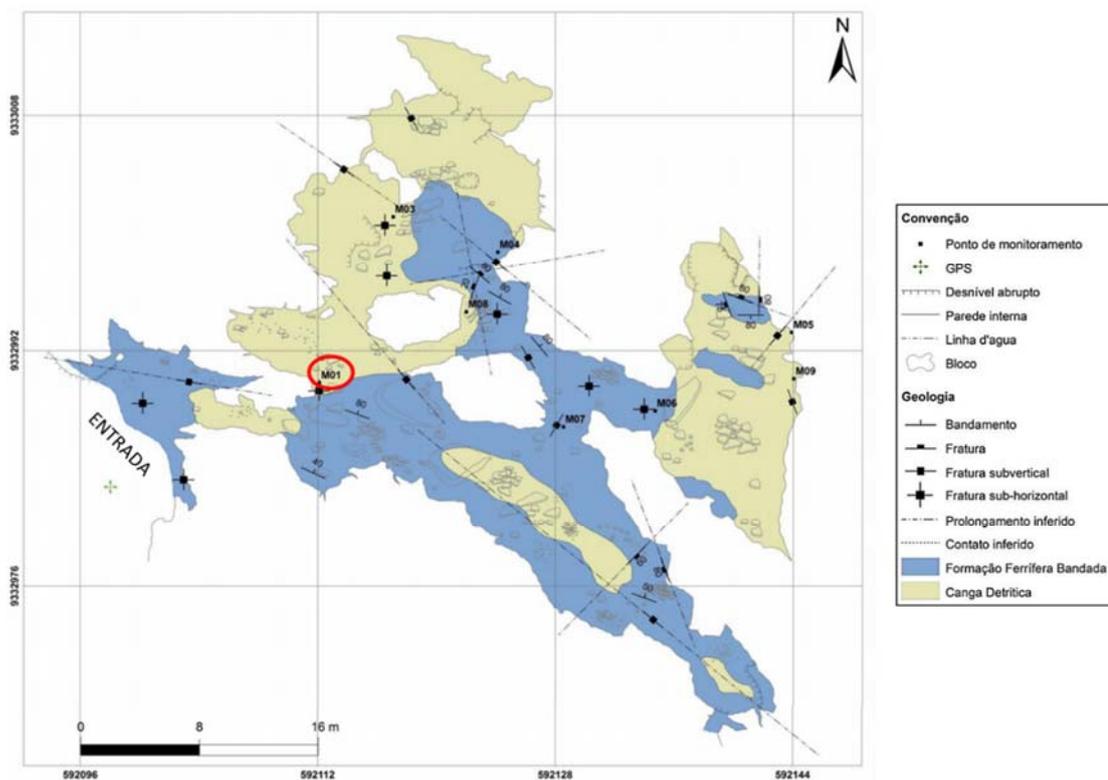


Figura 3.7 - Mapa litosteóstrutural da cavidade N4E-0022 (Vale S.A.).

Estruturalmente, apresenta fraturas nas seguintes direções principais: N50W/subvertical; N-S/subvertical, muito penetrativa e aberta; N60W/subvertical; N40E/65SE e N70W/subvertical, preenchida com crosta (CARSTE, 2013), como pode ser observado no Diagrama de Rosetas da Figura 3.8.

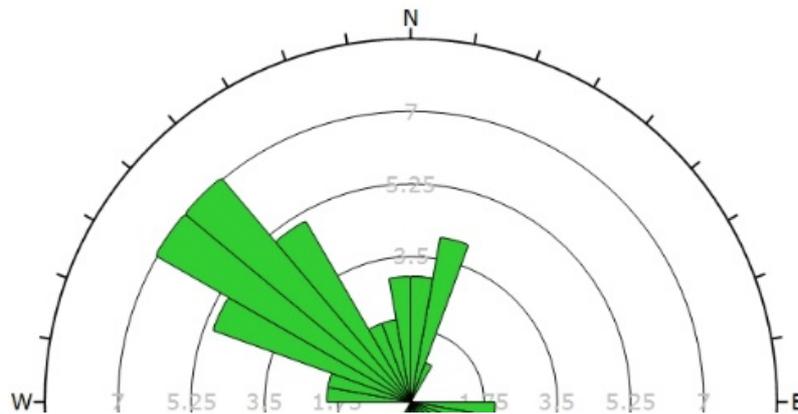


Figura 3.8 - Diagrama de rosetas exibindo a orientação das estruturas mapeadas na cavidade N4E-0022. Foram plotados 43 planos de fratura, com ângulos de caimento variando entre 40° e 90° (Vale S.A.).

O mapeamento geomecânico em cavidades é considerado uma ferramenta de extrema importância para compreender seu comportamento físico frente à aproximação da lavra. A classificação geomecânica, portanto, compreende uma metodologia simples e objetiva para se classificar os maciços rochosos por meio de suas propriedades geológico-geotécnicas, zoneando-os em domínios geomecânicos.

Para a realização do mapeamento geomecânico da cavidade N4E-0022, foram realizadas análises de resistência à compressão uniaxial, RQD (*Rock Quality Designation*), análise do espaçamento, orientação e condições das descontinuidades existentes além da condição hídrica da caverna. Tais características foram atribuídas aos parâmetros de classificação do maciço segundo Bieniawski (1989), conhecido como RMR (Tabela 3.2). Todos os parâmetros do sistema são correlacionados a uma pontuação, utilizada no cálculo final das classes de maciço (Tabela 3.3).

Tabela 3.2 - Pesos atribuídos à Classificação Geomecânica de Bieniawski (1989) - Rock Mass Rating (RMR).

Classificação Geomecânica									
Parâmetros			Intervalo de Valores						
1	Resistência da Rocha Intacta (MPa)	Índice de Carga Pontual (PLT)	> 10	4-10	2-4	1-2	Para estes valores menores, recomenda-se teste de compressão uniaxial		
		Resistência à Compressão Uniaxial	> 250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	< 1
	Valor		15	12	7	4	2	1	0
2	Designação da qualidade da rocha (RQD %)		90-100	75-90	50-75	25-50	< 25		
	Valor		20	17	13	8	3		
3	Espaçamento das Descontinuidades (cm)		> 200	200-60	60-20	20-6	< 6		
	Valor		20	15	10	8	5		
4	Condição das Descontinuidades		Superfícies muito rugosas, não contínuas, sem separação, paredes de rocha não alteradas.	Superfícies pouco rugosas, separação < 1 mm, paredes da rocha pouco intemperizadas.	Superfícies pouco rugosas, separação < 1 mm, paredes da rocha muito intemperizada.	Superfícies estriadas ou preenchimento < 5 mm (espessura) ou separação 1 - 5 mm (contínua)	Preenchimento mole > 5 mm (espessura) ou separação > 5 mm (espessura)		
	Valor		30	25	20	10	0		
5	Água Subterrânea	Canal por 10 m de comprimento do túnel	Nenhum	< 10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	> 125 l/min		
		Relação pressão da água vs tensão principal máxima	0	< 0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	> 0.5		
		Condições Gerais	Completamente Seco	Água Intersticial	Úmido	Gotejamento	Fluxo Abundante		
	Valor		30	25	20	10	0		

Tabela 3.3 - Classificação Geomecânica de Bieniawski (1989) - Rock Mass Rating (RMR).

Classificação do Maciço Rochoso					
Peso Global	100-81	81-60	60-41	40-20	< 21
Classe	I	II	III	IV	V
Descrição	Muito bom	Bom	Regular	Ruim	Muito ruim

A obtenção dos parâmetros de resistência para o sistema RMR pode ser feita em investigação *in situ* ou por meio de testemunhos (corpos-de-prova), de acordo com as restrições do local. Para a estimativa da resistência à compressão uniaxial na cavidade N4E-0022 foi utilizada, pela Vale S.A., a apreciação táctil-visual. Elaborou-se, assim, uma escala de níveis variáveis de acordo com a resposta da rocha às diversas solicitações dessas ferramentas. A ISRM (*Internacional Society for Rock Mechanics*) propõe diversos testes expeditos de campo e correlações empíricas para estimar o valor da resistência à compressão uniaxial, baseando-se, usualmente, em tabelas (*e.g.* BROWN, 1981), conforme Tabela 3.4.

Tais testes foram priorizados para a elaboração do mapa de classificação geomecânica da cavidade em relação a outros métodos comumente utilizados (*e.g.* martelo de Schmidt) devido a sua relevância associada e impedimentos quanto ao uso de técnicas com maior intervenção à estrutura cavernícola.

Tabela 3.4 - Grau de Resistência (adaptado de BROWN, 1981).

Símbolos	Designação	Resistência à Compressão Simples (MPa)	Identificação em Campo
R0	Extremamente macia	0,25 a 1	Penetrável pelo polegar. Marcado com a unha.
R1	Macia	1 a 5	Sulcos profundos ao ser penetrável por lâmina; desagregável manualmente. Esfarela ao golpe do martelo.
R2	Média a macia	5 a 25	Facilmente penetrável por lâmina; quebra-se facilmente a um golpe do martelo. Somente as bordas do fragmento podem ser quebradas pela pressão dos dedos.
R3	Média	25 a 50	Quebra com relativa facilidade ao golpe do martelo; as bordas do fragmento não podem ser quebradas pela pressão dos dedos. A lâmina de aço provoca sulcos rasos na superfície.
R4	Média a dura	50 a 100	A lâmina de aço dificilmente provoca sulcos na superfície. Quebra-se a um golpe de martelo.
R5	Dura	100 a 250	Quebra-se com vários golpes de martelo. Não risca pela lâmina de aço.
R6	Extremamente dura	> 250	São impenetráveis por lâminas de aço. Os fragmentos possuem bordas ásperas e cortantes. Quebra-se com dificuldade a vários golpes do martelo.

O mapa de Classificação Geomecânica da cavidade N4E-0022, realizado e fornecido pela Vale S.A., foi elaborado com base no sistema RMR de Bieniawski, (1989) e pode ser visualizado na Figura 3.9. Tal mapa será utilizado para futuras correlações com os resultados obtidos pelo mapeamento geofísico indireto.

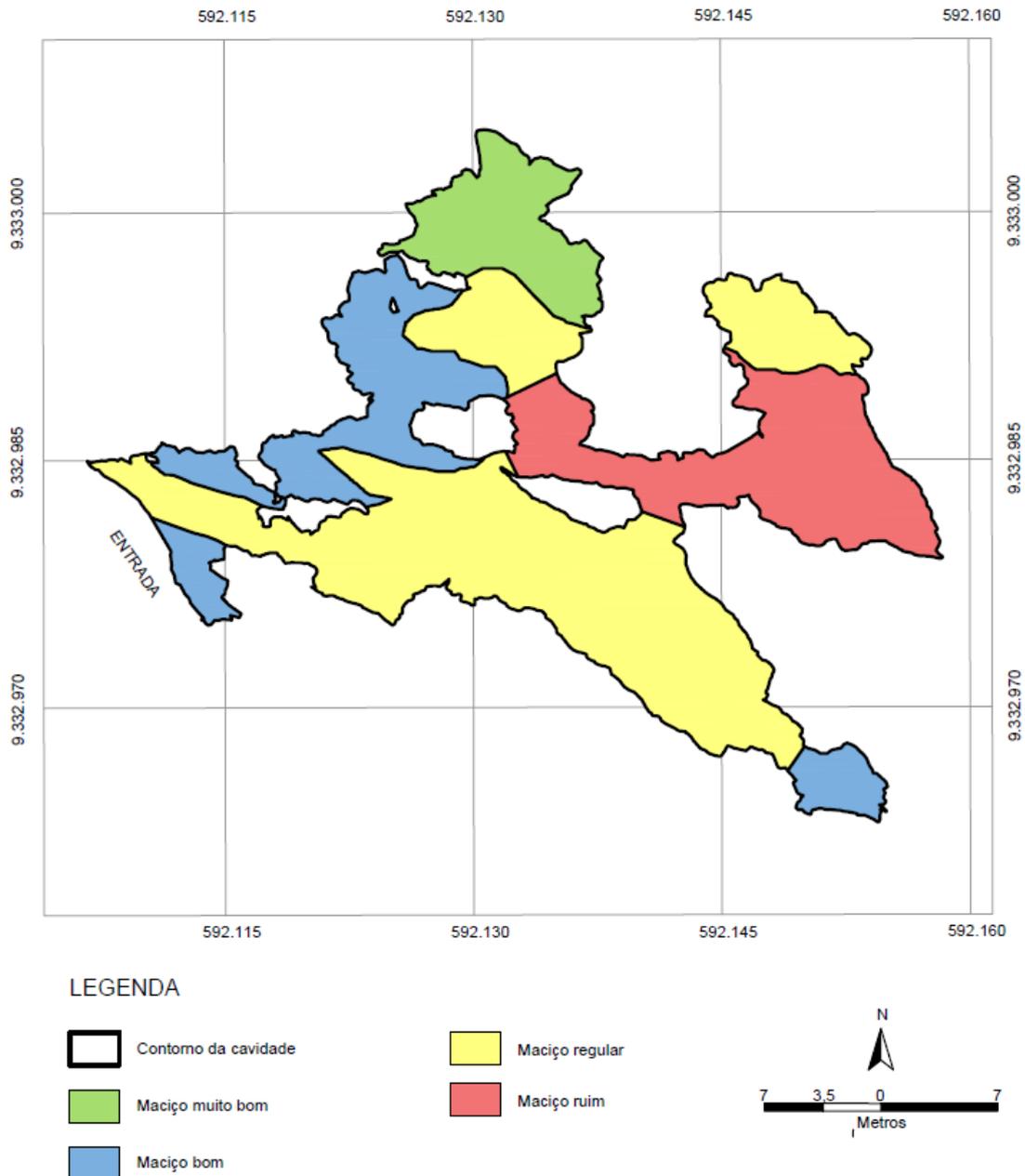


Figura 3.9 - Mapa de Classificação Geomecânica (RMR) da cavidade N4E-0022 (Vale S.A.).

A metodologia desenvolvida recentemente por Brandi (2018) proporciona a classificação geotécnica dos diversos vãos que compõem as cavernas, segundo um Índice Geotécnico de Cavernas (IGC). Tal metodologia, especificamente voltada para cavernas, utiliza parâmetros empregados na estimativa de riscos geotécnicos de cavidades, sustentado em uma abordagem analítica simples, consistente, prática e pioneira. A classificação dos vãos ou setores, segundo indicadores de susceptibilidade, permite uma efetiva antecipação de ações que possam acarretar impactos irreversíveis sobre as cavidades protegidas por lei.

Nesse contexto, a cavidade N4E-0022 foi submetida, por Brandi (2018), à aplicação metodológica do IGC segundo as quatro variáveis inerentes ao índice: classificação geomecânica RMR segundo Bieniawski (1989), geometria do vão, espessura e morfologia do teto. Tais parâmetros foram definidos em virtude da constatação de relevância dos mesmos nas deformações observadas em cavernas ferríferas, sejam elas provocadas por influência das detonações, operações gerais de mina ou sismos naturais (BRANDI, 2018).

O RMR (*Rock Quality Designation*) contempla uma série de parâmetros que estão diretamente ligados às análises geotécnicas para classificação geomecânica dos maciços rochosos em ambiente cavernícola (BRANDI, 2018). Em relação à geometria dos vãos, a variável denominada raio hidráulico, configura-se como fator relevante ao estudo de cavernas, uma vez que seu uso já está consolidado na literatura científica. A espessura e a forma de teto, pelo seu uso recorrente nas avaliações de estabilidade, também foram consideradas na formulação do IGC. A Tabela 3.5 apresenta os parâmetros e pesos para o somatório atribuído ao IGC. Todos os parâmetros são correlacionados a uma pontuação que será utilizada no cálculo final de classes geotécnicas representativas dos níveis de susceptibilidade que as estruturas naturais estão submetidas a deformações irreversíveis (Tabela 3.6). O IGC varia de 0 a 100 e possui cinco classes de interpretação sendo que, quanto menor o valor do IGC (mais próximo de zero), pior a avaliação de estabilidade do vão analisado.

A Figura 3.10 apresenta o mapa de classificação baseado no sistema IGC elaborado por Brandi (2018) aplicado à cavidade N4E-0022. Nessa cavidade, o litotipo correspondente à Formação Ferrífera encontra-se moderadamente alterado e medianamente resistente.

Estruturalmente, foram observadas descontinuidades no bandamento, duas famílias de fraturas e algumas descontinuidades isoladas. A presença de água e de raízes de plantas acaba por influenciar o cálculo do índice e, conseqüentemente, na susceptibilidade associada.

Tabela 3.5 - Pesos atribuídos ao Índice Geotécnico de Cavernas (adaptado de BRANDI, 2018).

Índice Geotécnico de Cavernas		
Variáveis	Classes	Fator para Soma no IGC
RMR	Muito Pobre	0
	Pobre	15
	Regular	30
	Bom	45
	Muito Bom	60
Raio Hidráulico	Pequeno	25
	Regular	15
	Grande	0
Espessura do Teto	Pequeno	0
	Regular	2
	Grande	5
Morfologia do Teto	Abóbada	10
	Planar	4
	Abóbada Invertida	0

Tabela 3.6 - Classes de susceptibilidade consideradas para o IGC, Índice Geotécnico de Cavernas (adaptado de BRANDI, 2018).

Susceptibilidade	Faixa do IGC	Interpretação da classe do vão
Muito baixa	$IGC > 80$	Condições de estabilidade favorecidas.
Baixa	$60 < IGC \leq 80$	Estabilidade geotécnica susceptível se submetido a esforços não controlados.
Moderada	$40 < IGC \leq 60$	Condições de estabilidade moderadas com possibilidade de abatimentos localizados.
Alta	$20 < IGC \leq 40$	Estabilidade comprometida por influência de esforços externos, pertinentes a ações antrópicas e/ou forças não cotidianas da natureza.
Muito alta	$IGC \leq 20$	Estabilidade altamente comprometida, alta densidade de pontos frágeis, sujeitos a abatimentos localizados, influenciados por ações externas ou naturais.

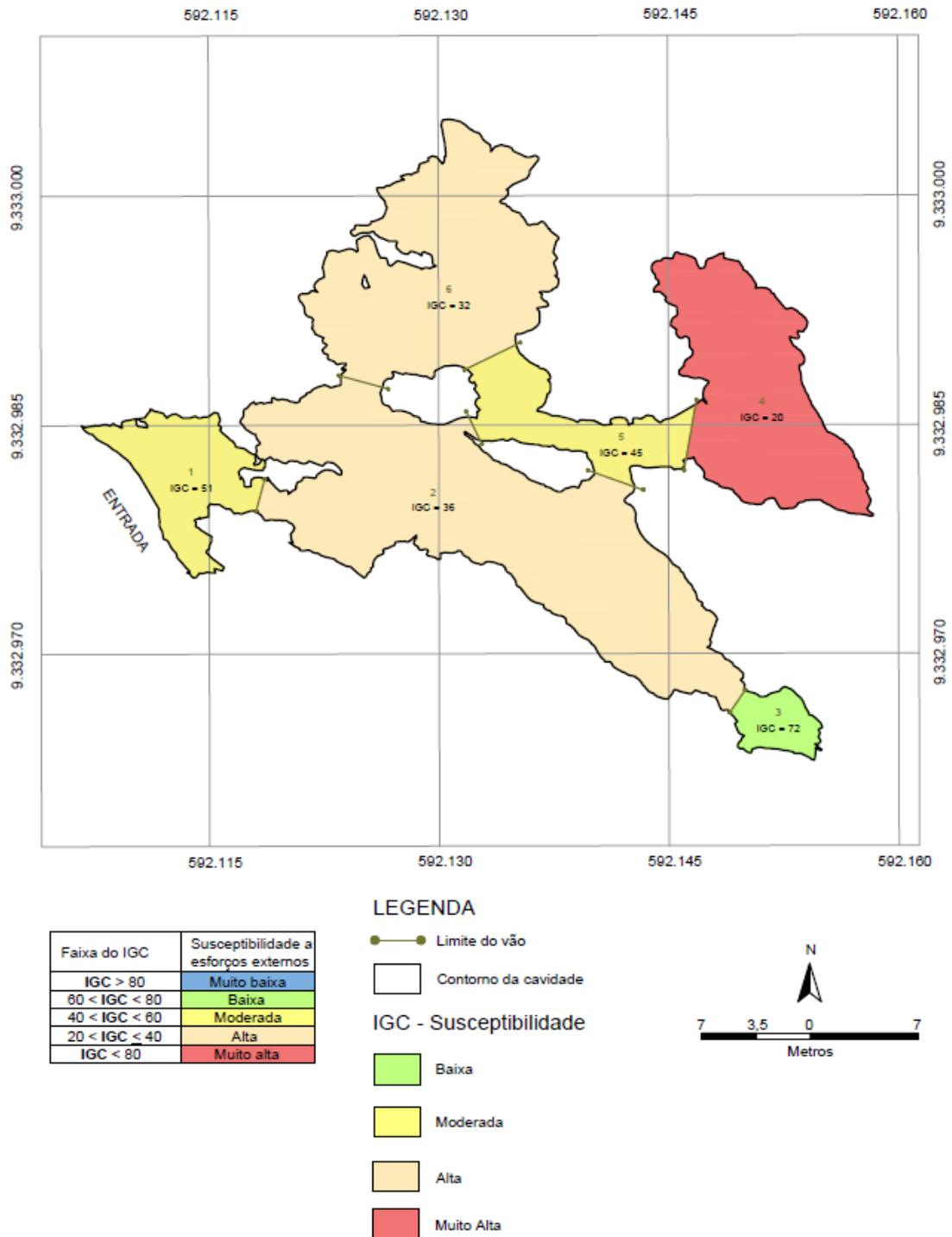


Figura 3.10 - Mapa de Classificação segundo o Índice Geotécnico de Cavernas (IGC) da cavidade N4E-0022 (adaptado de BRANDI, 2018).

3.4. ENSAIOS *IN SITU* E LABORATORIAIS

Os 3 (três) horizontes pertencentes ao perfil de intemperismo típico de rochas ferríferas foram divididos, segundo Gonçalves *et al.* (2016), em: Crosta Laterítica, Horizonte de Transição e Saprolito. Poucos trabalhos abarcaram, entretanto, um estudo mais detalhado das características geológico-geotécnicas desses materiais.

Como forma de aprofundar os estudos nos horizontes lateríticos, foi realizado, pela equipe da Vale S.A., o mapeamento geológico-geotécnico de detalhe, em perfil, que marca a borda oeste da Mina N4EN, próximo à cavidade N4E-0022. Tal perfil foi composto por três taludes de corte com 276 metros de extensão e alturas variando entre 2 a 8 metros (Figura 3.11).

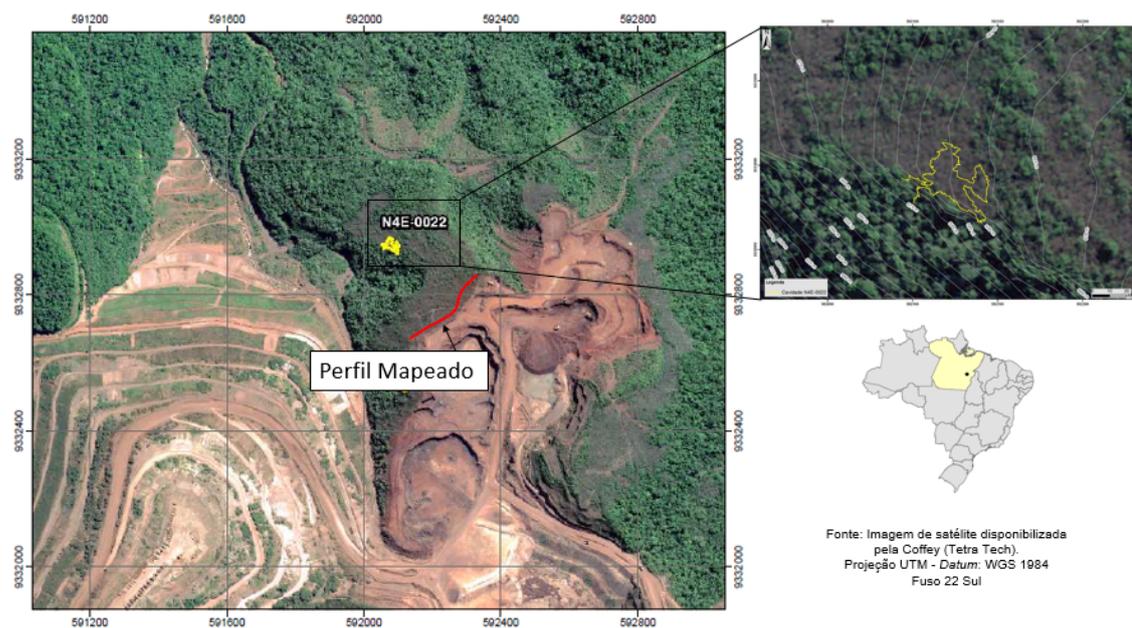


Figura 3.11 - Localização do perfil de detalhe mapeado para caracterização dos litotipos e definição de parâmetros geomecânicos *in situ*.

A realização do perfil foi a solução encontrada para a execução de um mapeamento de detalhe dos horizontes de intemperismo e para produzir resultados de resistência de modo mais assertivos em relação àqueles já elaborados com testes expeditos de campo e correlações empíricas. Os ensaios geomecânicos direcionados a horizontes lateríticos e seus litotipos, no interior da cavidade estudada, foram impossibilitados em virtude do caráter mais invasivo inerente aos testes e pela dificuldade de visualização dos litotipos

existentes. Desta forma, a extrapolação dos valores encontrados no perfil mapeado para a cavidade N4E-0022, frente às condições aproximadamente homogêneas dos horizontes lateríticos, pode ser considerada aceitável e satisfatória. Por meio do mapeamento de detalhe foram individualizados 07 (sete) litotipos nos horizontes de intemperismo já conhecidos (Tabela 3.7). A Tabela 3.8 apresenta as descrições dos litotipos pertencentes aos horizontes intempéricos relacionados.

Tabela 3.7 - Litotipos associados a horizontes de intemperismo (Vale S.A.).

Horizonte de Intemperismo	Litotipo	Sigla
Crosta Laterítica	Crosta Laterítica Detrítica	CLD
	Crosta Laterítica Ferruginosa	CLF
Transição	Formação Ferrífera Laterítica	FFL
	Laterita Ferro-Aluminosa	LFA
Saprolito	Saprolito de Rocha Ferrífera	SAPRF

Para análise da resistência à compressão uniaxial, testes *in situ* nas bancadas do perfil foram realizados pela Vale S.A. Sugerido pela *Internacional Society for Rock Mechanics* ISRM (2007), a resistência à compressão uniaxial simples pode ser correlacionada com a dureza da rocha, obtida *in situ* através do esclerômetro de Schmidt com posterior conversões. O martelo de Schmidt possibilitou a realização de uma gama de ensaios locais e de maneira não destrutiva. Para a sua realização foi levado em consideração o Método Médio ISRM, que recomenda efetuar 20 (vinte) medições em cada superfície ensaiada. Sempre que possível, buscou-se realizar o teste em superfície perpendicular à direção de anisotropia, quando observada. As direções do teste também variaram de acordo com a superfície de exposição, sendo em geral horizontais (nas faces das paredes e tetos). No modelo convencional do martelo de Schmidt, a energia liberada após o impacto é dada pelo Índice Esclerométrico (IE), ou também chamado de número de ricochete (R), cujo cálculo está relacionado à distância percorrida pela massa após o repique do disparo. O resultado é um número adimensional considerado como índice de dureza do material ensaiado, que varia em escala linear de 10 a 70. Quanto maior a resistência da superfície ensaiada, menor a deformação e maior o rebote. No entanto, o martelo convencional tem dificuldades para diferenciar valores R acima de 60.

Tabela 3.8 - Litotipos pertencentes ao perfil de intemperismo típico da região de Carajás/PA, medidas do Coeficiente de Velocidade (Q) e Resistência Geomecânica convertida (adaptado de BARBOSA, 2018).

Horizonte de Intemperismo	Litotipo	Sigla	Descrição Resumida	Esclerômetro de Schmidt			Resistência Geomecânica (MPa)
				Q (min)	Q (médio)	Q (máx)	
Crosta Laterítica	Crosta Laterítica Detrítica	CLD	Ocorre de forma localizada, preenchendo fendas/vazios ou recobrimdo superfícies de fraturas, em forma de bolsões, lentes, camadas pouco espessas (cm/dm). Trata-se de conglomerados compostos por clastos angulosos a sub-angulosos, mal selecionados e matriz silto-arenosa, formada essencialmente de óxido-hidróxido de ferro. Tal litotipo quase não apresenta vazios (< 5%), possui aspecto maciço e pouco poroso. Quando observados, os poros costumam ser milimétricos e se desenvolvem com padrão irregular entre os clastos e a matriz.	14	23,4	31,5	21,5
	Crosta Laterítica Ferruginosa	CLF	Características bandas de óxido-hidróxido de ferro endurecidas e presença marcante de goethita neoformada entre as bandas. Aspecto brechóide, constituída por fragmentos de óxido-hidróxido de ferro com coloração cinza opaco, angulosos a subangulosos, placóides e/ou retangulares. Tais fragmentos estão dispersos em uma matriz/cimento avermelhada/amarelo-ocre, siltosa e endurecida.	24,4	32,7	44	34,5
	Crosta Laterítica Ferro-Aluminosa	CLFA	Aspecto laminado, com significativa presença de goethita neoformada cuja ocorrência aumenta em direção ao topo, aspecto anastomosado e porosidade bem marcada. Possui forma acamadada, marcada por feições psolíticas/pseudopisolíticas e botrioidais. Os vazios geralmente desenvolvem-se nos planos de laminação, normalmente revestidos por películas de óxido-hidróxido de ferro de coloração cinza-metálica.	21,5	28,4	36,5	22
Horizonte de Transição	Formação Ferrífera Laterítica	FFL	Bandas de óxido-hidróxido de ferro, com coloração cinza-fosca, intercaladas por bandas vermelhas, geralmente porosas, de óxido-hidróxido de ferro. Tal estruturação apresenta, em geral, bastante deformada (faturada/dobrada) e obliterada.	17	26,7	38	17
	Laterita Ferro-Aluminosa	LFA	Possui coloração variegada (vermelho, cinza, púrpura e amarelo-ocre), endurecida (laterizada). Apresenta, em geral, aspecto laminado descontínuo e, em menor frequência, aspecto maciço-poroso. Possui cerca de 15% a 30% de núcleos endurecidos (fragmentos) de óxido-hidróxido de ferro, normalmente de tamanho pedregulho, cimentados por óxido e hidróxido de ferro. Matriz silto-arenosa, vermelha amarronzada.	16	24,8	39	16
Saprolito	Saprolito de Rocha Máfica	SAPRM	Elevado grau de alteração, com presença pontual de rocha alterada e solo saprolítico. Apresenta textura silto-argilosa, coloração púrpura, foliadas a maciças, marcadas pela presença de gibbisita e forte heterogeneidade vertical e lateral.	20,5	24	27,5	18
	Saprolito de Formação Ferrífera	SAPRF	Elevado grau de alteração com presença pontual de rocha alterada e solo saprolítico. Apresenta textura silto-argilosa, coloração púrpura, bandamento reliquiar, gibbisita e forte heterogeneidade vertical e lateral. Presença de rocha ferrífera, hematita friável, hematita dura e jaspilito.				

A solução encontrada pelos pesquisadores foi a utilização do martelo modelo RockSchmidt tipo L, com energia de impacto de 0,735 Nm. Tal modelo, digital, mede o verdadeiro coeficiente de ressalto, denominado Número de Rebote Silver Schmidt ou Coeficiente de Velocidade (Q). O coeficiente Q é calculado pela diferença entre a velocidade da massa que é disparada contra o êmbolo no momento da colisão e no instante que retorna a sua posição inicial, sendo a medida independente da gravidade. O resultado também é um número adimensional, considerado como índice de dureza do material ensaiado e varia em escala linear de 10 a 100 (KATZ *et al.* 2000; BASU & AYDIN, 2005). O martelo RockSchmidt usa um sensor embutido para gravar a velocidade de rebote do êmbolo e exibe eletronicamente o valor Q. Os valores Q obtidos nos ensaios para cada litotipo também podem ser visualizados na Tabela 3.8, assim como os valores de Compressão Uniaxial (MPa), calculados por meio de conversão. Tal parâmetro foi introduzido, principalmente, pela capacidade de trabalhar com materiais de resistência geralmente elevada e por não ser influenciado pela direção de impacto do êmbolo. Dessa forma, não há necessidade de referir-se às curvas de conversão da direção do impacto, como é requerido em todos os demais martelos mecânicos convencionais para ensaio da superfície.

Além dos ensaios *in situ* no perfil mapeado, foram realizados pela Vale S.A. e posteriormente fornecidos, o perfil geofísico de Eletroresistividade (Seção Controle com 86,90 metros de comprimento) assim como a coleta de amostras para ensaios em laboratório para a determinação do índice de Resistência à Carga Pontual (*Point Load Test*, 508 amostras), Índice de Resistência a Compressão Uniaxial (*Uniaxial Compressive Strength*, 47 corpos) e Densidade Seca (847 ensaios), conforme Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Testes de laboratório realizados em litotipos do Complexo Carajás.

Horizonte de Intemperismo	Litotipo	Sigla	Resistência a Compressão Uniaxial UCS (MPa)	<i>Point Load Test</i> (MPa)	Densidade Seca
Crosta Laterítica	Crosta Laterítica Detrítica	CLD			
	Crosta Laterítica Ferruginosa	CLF	12,0	2,235	2,73
	Crosta Laterítica Ferro-Aluminosa	CLFA	4,3	1	2,42
Transição	Formação Ferrífera Laterítica	FFL	15,7	0,908	2,87
	Laterita Ferro-Aluminosa	LFA	4,1	0,795	2,22
Saprolito	Saprolito de Rocha Ferrífera	SAPRF			

Alguns resultados ainda estão em fase de análise e, dessa forma, não apresentaram valores característicos de UCS, PLT e Densidade Seca para alguns litotipos. No entanto, as análises dos testes *in situ* e executados em laboratório evidenciaram que as maiores resistências estão associadas aos litotipos lateríticos pertencentes à Crosta Laterítica, que acabam por sustentar o teto das unidades cavernícolas existentes.

Como forma de complementar o perfil de mapeamento geológico-geotécnico de detalhe realizado, foram executados, pela Vale S.A., 8 (oito) furos (SN4-FD00069 a SN4-FD00076) testemunhados de sondagem rotativa, com profundidade média de 50 metros, nas proximidades da área de estudo. Tais furos também foram consagrados com sonda de perfilagem geofísica para obtenção de dados de gama-gama (densidade) e caliper (diâmetro do poço).

3.5. MONITORAMENTO E ESCANEAMENTO 3D

A cavidade N4E-0022 constitui-se uma das 40 cavidades, aproximadamente, monitoradas do Complexo Carajás de modo sistemático (Figura 3.12).

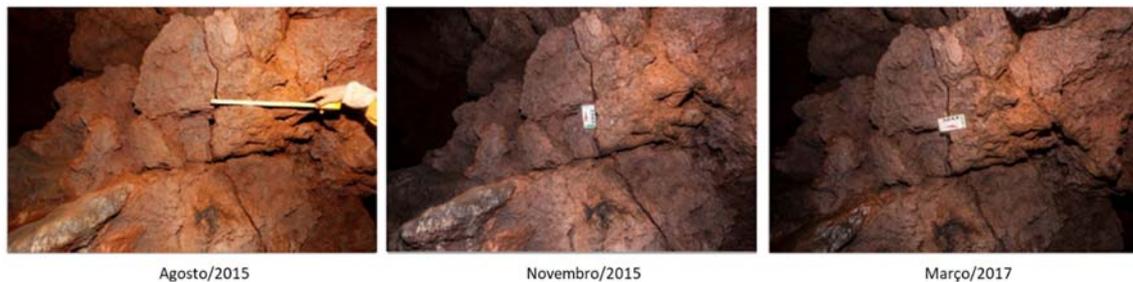


Figura 3.12 - Monitoramento contínuo e periódico de pontos de interesse (*e.g.* fraturas subverticais localizadas na parede) no interior da cavidade N4E-0022 (Vale S.A.).

Equipamentos externos e internos como termohigrômetros, geofones triaxiais, sismógrafo (para ruído e vibração), *crackmeter* (para movimentação das fraturas), *convergence meter* (para recalque de teto) e *datalogger* de armazenamento, realizam as coletas de forma contínua e em tempo real, via *web*, através de estações de telemetria e repetidoras (Figura 3.13).



Figura 3.13 - Estações de alimentação dos equipamentos de monitoramento sistemático da cavidade N4E-0022.

Adicionalmente às diversas ferramentas para o monitoramento da cavidade, o escaneamento tridimensional a *laser* da cavidade permitiu a produção de plantas mais precisas e detalhadas e proporcionou uma imersão em Realidade Virtual (RV). Um dos diversos produtos gerados pela técnica foi o mapa de isoprofundidades 3D (Figura 3.14), consistente para o entendimento da espessura dos tetos e a morfologia geral da cavidade.

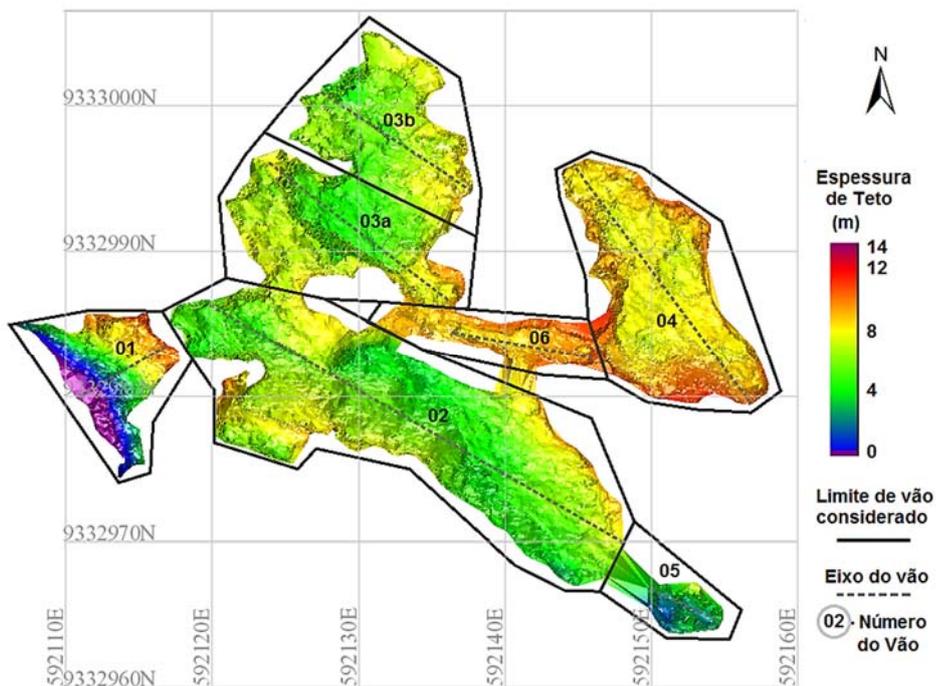


Figura 3.14 - Mapa de isoprofundidades da cavidade N4E-0022 (Vale S.A.).

4. MÉTODOS GEOFÍSICOS APLICADOS ÀS CAVIDADES FERRÍFERAS

A investigação indireta tem se mostrado com satisfatória utilidade na identificação de importantes aspectos lito-estruturais de cavidades em terrenos ferríferos por meio da integração de métodos geofísicos rasos.

O sucesso dos resultados depende da habilidade em alcançar o alvo assim como a utilização de apropriada resolução vertical para cada problema proposto. Neste cenário, foi proposto, para o presente estudo, a integração de diferentes métodos geofísicos, identificando parâmetros físicos diferenciados e complementares para a construção de um conjunto de dados necessários ao objetivo apresentado.

4.1. MÉTODOS ELÉTRICOS

4.1.1. Eletrorresistividade (Caminhamento Elétrico)

A Eletrorresistividade é um método geofísico baseado na determinação da resistividade elétrica dos materiais, tendo sido utilizado nos mais variados campos de Geologia, Hidrogeologia, Geotecnia, Espeleologia, Geologia ambiental, Engenharia entre outros. A técnica da Eletrorresistividade já foi utilizada para detecção de cavidades por alguns autores como Cook & Nostrand (1954), Vincenz (1968), Dutta *et al.* (1970), Greenfield, (1979), Militzer *et al.* (1979); Smith (1986) e Chalikakis *et al.* (2011). Cardarelli *et al.* (2006) também contribuíram para a exploração de sistemas cársticos por meio da realização de Eletrorresistividade em cavidades subterrâneas localizadas em Roma, Itália.

O método da Eletrorresistividade é dividido em duas técnicas de levantamentos de campo: Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e Caminhamento Elétrico (CE). A técnica do Caminhamento Elétrico, utilizada para este estudo, é aplicada quando o alvo de interesse

é o estudo da variação tanto lateral quanto vertical da resistividade. Esse método de prospecção geofísica emprega uma corrente elétrica direta baseada na emissão artificial (e.g. bateria) introduzida no terreno através de dois eletrodos de corrente (denominados A e B) e medida por um amperímetro. O potencial gerado em outros dois eletrodos de potencial (denominados M e N) nas proximidades do fluxo de corrente é medido por meio de um voltímetro (Figura 4.1).

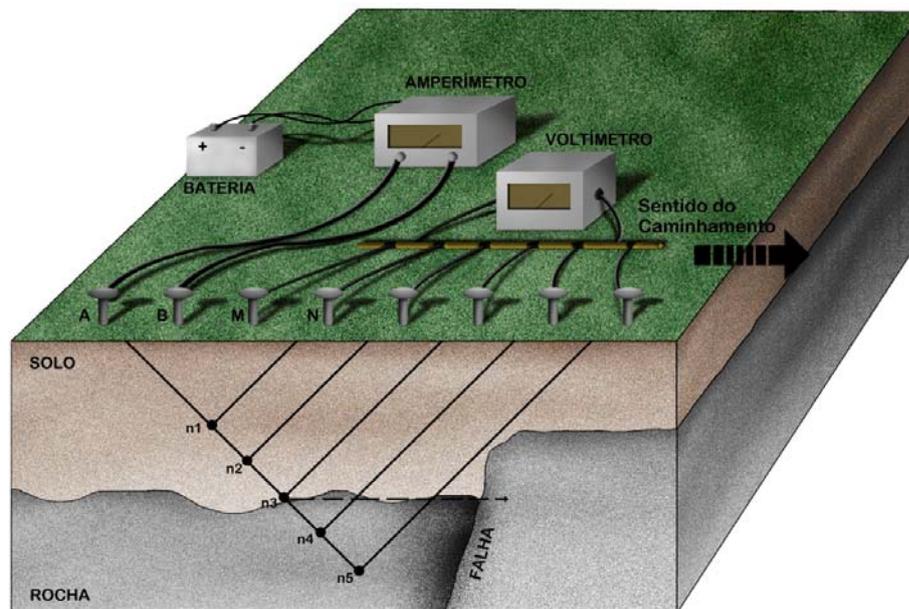


Figura 4.1 - Técnica de Caminhamento Elétrico (Neogeo Geotecnologia LTDA.).

Com isso, é possível identificar regiões em subsuperfície que apresentam maior ou menor resistividade. Os eletrodos são cravados no solo por percussão a martelo/furadeira ou por rosqueamento para melhorar a conexão elétrica com o solo. Diversas variações nas configurações dos eletrodos (arranjos) são possíveis e conferem ao método grande versatilidade. Para terrenos muito resistivos, usa-se molhar o terreno com uma solução salina e/ou com bentonita. A dificuldade em se efetuar um bom contato elétrico com o solo é a principal deficiência dos métodos geoeletricos.

Quando se injeta corrente no solo, a mesma irá distribuir-se por todas as rotas possíveis, desde a superfície até os níveis mais profundos, passando preferencialmente pelos caminhos mais fáceis (condutivos). Uma porcentagem de corrente, progressivamente menor, irá percorrer os caminhos mais longos e resistivos.

A escolha dos parâmetros de aquisição da Eletrorresistividade é feita com base nos objetivos propostos para o método, definindo assim, o número de cabos a utilizar, o comprimento das seções, espaçamento entre eletrodos, arranjos e protocolo. Os parâmetros para o processamento dos dados também dependem de cada caso e recebem um ajuste fino. Informações geológicas prévias e de sondagem também podem ser integradas para garantir a melhoraria dos resultados. Tais parâmetros serão melhor abordados nos itens a seguir.

É importante ressaltar que a resolução na superfície é inversamente proporcional ao espaçamento mínimo entre eletrodos e diminui gradativamente com a profundidade. A parte mais rasa do terreno é a que mais influencia na medida, portanto, uma boa modelagem superficial é importante mesmo quando o que se deseja visualizar está mais profundo.

4.1.1.1. Resistividade

A resistividade (e seu inverso, a condutividade) de solos e rochas pode ser afetada pelos seguintes fatores, segundo Oldenburg & Jones (2007):

- Composição mineralógica;
- Porosidade;
- Permeabilidade hidráulica, que descreve como os poros são interconectados;
- Teor de umidade;
- Concentração de eletrólitos dissolvidos;
- Temperatura e a fase do fluido intersticial;
- Quantidade de composição de coloides (conteúdo de argila);
- Direção da aquisição geofísica em virtude da anisotropia do meio (Figura 4.2).
Tal fator configura-se em especial importância em virtude de estruturas planares das rochas ferríferas presentes na área de estudo.

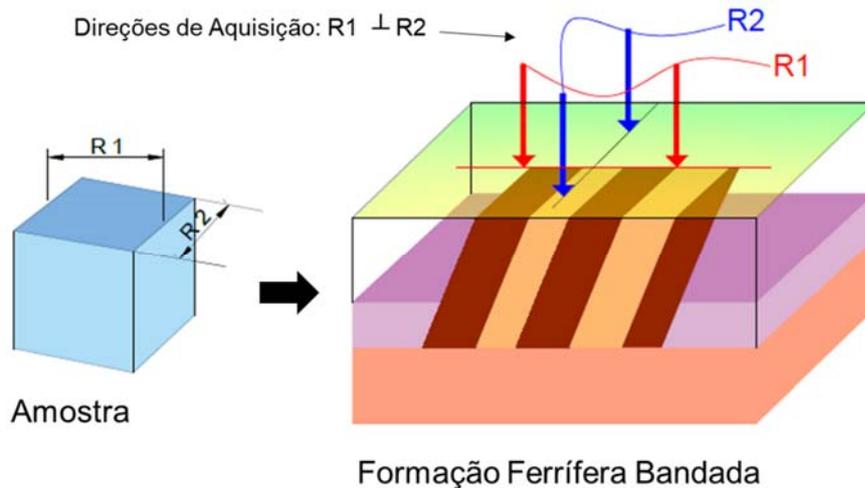


Figura 4.2 - Influência da direção das camadas nos valores de resistividade (adaptado de OLDENBURG & JONES, 2007).

O tamanho dos poros e suas geometrias são os fatores mais importantes que afetam os valores da resistividade. Para a determinação da resistividade é necessário, inicialmente, o entendimento da Primeira Lei de Ohm, descoberta experimentalmente pelo alemão Georg Simon Ohm (1789-1854). Tal lei expressa a proporcionalidade de corrente elétrica que percorre um condutor metálico e a diferença de potencial entre os terminais desse condutor, definida pela equação abaixo:

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (4.1)$$

- R: Resistência do material à passagem da corrente elétrica (*ohms*);
- ΔV : Diferença de potencial entre dois terminais quaisquer (*volts*);
- I: intensidade da corrente elétrica (*ampères*).

A resistência elétrica de um condutor varia na razão direta do seu comprimento (L) e na razão inversa de sua seção (A) transversal (Figura 4.3), resultando na seguinte expressão correspondente à Segunda Lei de Ohm:

$$R = \rho \frac{\Delta L}{\Delta A} \quad (4.2)$$

Sendo ρ o fator de proporcionalidade denominado resistividade. Esse fator, ao contrário da resistência, é um parâmetro que caracteriza o material, independentemente de suas dimensões.

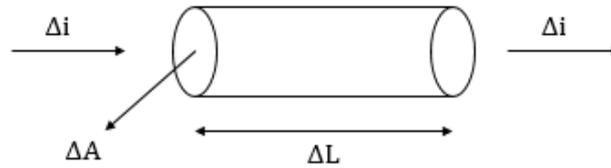


Figura 4.3: Fundamentos da Lei de Ohm a partir de um condutor metálico.

Pode-se deduzir a medida da resistividade a partir da Equação 4.3 por meio de simples operações matemáticas:

$$\rho = R \times \frac{\Delta A}{\Delta L} \quad (4.3)$$

Inserindo a definição estabelecida na Eq. 6.1 (Primeira Lei de Ohm), tem-se:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \times \frac{\Delta A}{\Delta L} \quad (4.4)$$

Para a determinação da resistividade acima equacionada em um material tridimensional terrestre, é necessário considerar e extrapolar o valor de L como a distância r entre os eletrodos de corrente e o ponto no qual o potencial é medido (AM, BM, AN e BN). A área A também deve ser considerada como a área superficial de valor $2\pi r^2$, uma vez que a corrente flui radialmente a partir dos eletrodos de corrente A e B, de forma que a distribuição de corrente seja uniforme sobre as cascas hemisféricas centradas na fonte (Figura 4.4).

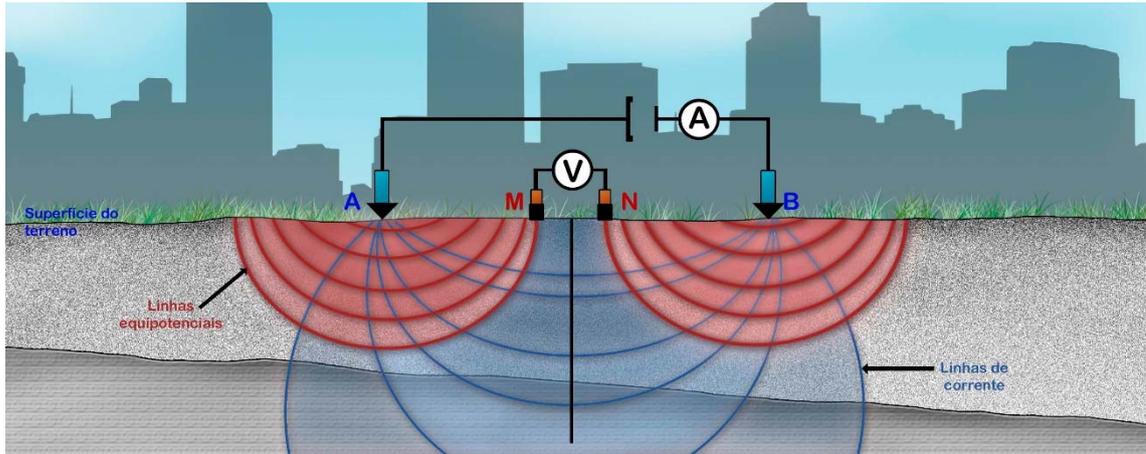


Figura 4.4 - Fluxo de corrente radial a partir dos eletrodos de corrente A e B (Neogeo Geotecnologia LTDA.).

A determinação do potencial resultante (ΔV) do campo elétrico criado pode ser demonstrada da seguinte maneira: a corrente elétrica de intensidade I conhecida é introduzida no subsolo por meio dos eletrodos A e B e a diferença de potencial ΔV gerada, é medida por meio dos eletrodos M e N. Ao supor que o meio investigado é homogêneo e isotrópico, tem-se que o potencial no eletrodo M, será dado por:

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \quad (4.5)$$

Já o potencial do eletrodo N será dado por:

$$V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \quad (4.6)$$

Portanto, a diferença de potencial medida (Eq. 6.5 e Eq. 6.6) no equipamento para determinada posição dos eletrodos M e N, será:

$$\Delta V_{MN} = V_M - V_N \quad (4.7)$$

Assim:

$$\Delta V_{MN} = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (4.8)$$

Ao utilizar o mesmo arranjo de eletrodos para efetuar medições sobre um meio heterogêneo, a diferença de potencial observada ΔV será diferente da registrada sobre um meio homogêneo, pois o campo elétrico deverá sofrer modificações em função desta heterogeneidade do meio.

Como, na prática, a maioria das situações geológicas encontradas não podem ser consideradas como um meio homogêneo, a quantia medida de ΔV representa uma média ponderada de todas as resistividades verdadeiras em um volume de material, em subsuperfície, relativamente grande. Portanto, ao efetuar-se os cálculos pertinentes, obtém-se uma resistividade aparente ρ_a . Pode-se então, calcular o valor da resistividade ρ_a do meio investigado, mediante a seguinte equação:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (4.9)$$

Sendo K o coeficiente geométrico entre os quatro eletrodos, assim calculado:

$$K = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad (4.10)$$

Esta ρ_a é a variável que expressa os resultados das medições na maioria dos métodos geoeletricos e, portanto, configura-se base para as interpretações finais. As dimensões da resistividade aparente, em virtude de sua definição, são as mesmas para a resistividade, e sua unidade será também dada por ohm.m.

Ainda em relação aos métodos elétricos, destacam-se as seguintes informações relevantes:

- A técnica do Caminhamento Elétrico (CE) baseia-se na análise e interpretação de um parâmetro físico, obtido a partir de medidas efetuadas na superfície do terreno, investigando, ao longo de uma seção, sua variação na horizontal, a uma ou mais profundidades determinadas;
- Os resultados obtidos relacionam-se entre si através de mapas (a uma ou mais profundidades determinadas), ou de seções (com várias profundidades de investigação, ou seja, vários níveis de investigação);

- O espaçamento X a ser utilizado (dipolos AB e MN) deve ser determinado em função dos objetivos do trabalho e da profundidade máxima de investigação a ser atingida, controlada pelo número de níveis a serem investigados;
- A quantidade de pontos a serem lidos depende da resolução esperada e da quantidade de combinações possíveis de se fazer com os eletrodos disponíveis. Certos arranjos permitem mais de uma leitura por injeção de corrente, otimizando, assim, o levantamento geoeletrico.

Na técnica de CE, vários eletrodos (dispositivos denominados multi-eletrodos) são cravados no solo e um cabo com contatos correspondentes à quantidade de eletrodos é lançado sobre a seção. Tais contatos são conectados aos eletrodos.

O equipamento que realiza as leituras (resistivímetro) é composto por um módulo gerador (que gera a corrente a ser injetada no solo) e um módulo receptor (que registra o potencial elétrico que se estabelece em resposta), posicionado no meio da seção. De forma automática (de acordo com a sequência ou *script* de leitura selecionado e previamente configurado), o equipamento realiza as diversas leituras para as quais foi programado.

A profundidade de penetração da corrente elétrica no solo está diretamente ligada ao comprimento da seção de Eletrorresistividade, sendo que a resolução tende a diminuir com o aumento da profundidade. Através da criação de protocolos de aquisição, é feita a adequação da resolução (em intervalos de profundidades estabelecidos) para uma melhor definição do alvo pretendido. Ao final, os dados são descarregados para um computador, podendo ser visualizados e tratados em *softwares* adequados (*e.g.* RES2DINV).

4.1.1.2. Arranjos de Eletrodos

O arranjo de eletrodos é o termo utilizado para definir a geometria de aquisição, no que diz sentido à lógica das medições realizadas. Os mais utilizados são: Schlumberger (SCH), Wenner (WEN), Dipolo-Dipolo (DDP), Gradiente (GRD). Um arranjo pode ter mais sensibilidade horizontal ou vertical e robustez que outro, assim como demais parâmetros (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 - Arranjos de eletrodos e avaliação das resoluções vertical e horizontal (adaptado de WARD, 1990). Legenda: 1 – muito bom; 2 – bom; 3 – regular; 4 – ruim; 5 – muito ruim.

Arranjos de Eletrodos e Resolução		
Arranjo	Resolução Horizontal	Resolução Vertical
Gradiente	1	5
Dipolo-Dipolo	2	2
Polo-Dipolo	3	2
Schlumberger	4	1
Wenner	5	1

Geralmente, a escolha do arranjo de eletrodos depende da profundidade de investigação, da sensibilidade do arranjo a variações laterais e verticais, da cobertura horizontal dos dados e da intensidade do sinal (LOKE, 2000). O valor da resistividade aparente (ohm.m) é calculado levando-se em consideração o fator geométrico (K), definido na Eq. 6.10, em função do arranjo utilizado.

- **Arranjo Dipolo-Dipolo (DDP)**

O arranjo Dipolo-Dipolo (DDP) revela-se como um dos mais precisos e rápidos de serem executados no campo. Uma de suas grandes vantagens reside no fato de que, o estudo da variação lateral do parâmetro físico pode ser efetuado em vários níveis de profundidade, obtendo-se uma caracterização dos materiais, em subsuperfície, tanto horizontalmente como verticalmente.

O arranjo dipolo-dipolo pode ser definido como tendo as seguintes características:

- Centro dos dipolos AB e MN não permanecem fixos, mas se deslocam ao longo da seção a ser levantada;
- Espaçamento entre os eletrodos AB igual ao MN;
- Espaçamento entre os dipolos AB e MN pode variar, utilizando-se, simultaneamente, vários dipolos MN dispostos ao longo da seção;
- Cada dipolo MN refere-se a um nível de investigação.

A Figura 4.5, a seguir, ilustra a disposição inicial desse arranjo ao longo de uma seção a ser estudada. Vários dipolos de recepção (MN) instalados na superfície do terreno podem ser observados. Cada par de dipolos MN, em relação ao dipolo AB, representa um nível de investigação (profundidade teórica investigada). Portanto, quanto mais dipolos MN forem instalados, maior será a profundidade de investigação.

Entretanto, deve-se ressaltar que, como nesse tipo de arranjo o potencial, à medida que se afasta do dipolo AB, diminui sensivelmente, as leituras mais afastadas tornam-se difíceis de serem obtidas com precisão. Recomenda-se a leitura de cinco a seis níveis, correspondendo, respectivamente, a cinco e a seis dipolos MN. Dependendo das características do equipamento transmissor de corrente, pode-se obter até oito níveis.

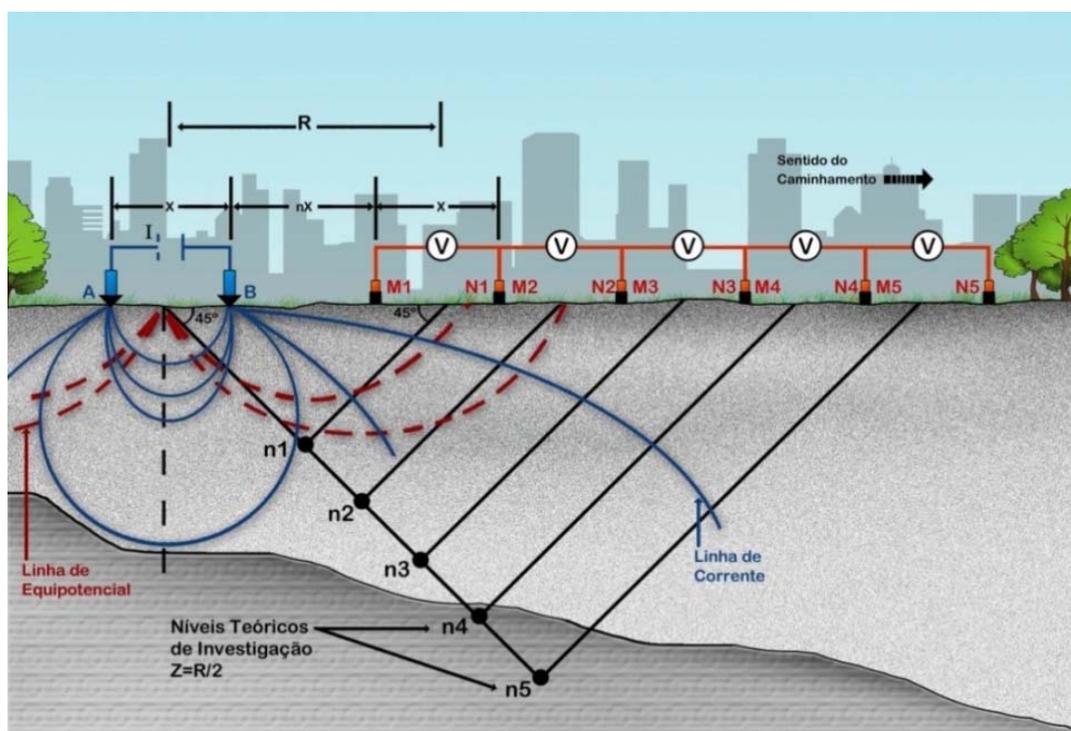


Figura 4.5 - Arranjo Dipolo-Dipolo (Neogeo Geotecnologia LTDA.).

- **Arranjo Schlumberger (SCH)**

Neste tipo de arranjo, enquanto os eletrodos de corrente A e B apresentam uma separação crescente (L), em relação ao centro do arranjo (o), os eletrodos de potencial M e N permanecem fixos durante o desenvolvimento do ensaio. A Figura 4.6, a seguir, ilustra a disposição inicial desse arranjo.

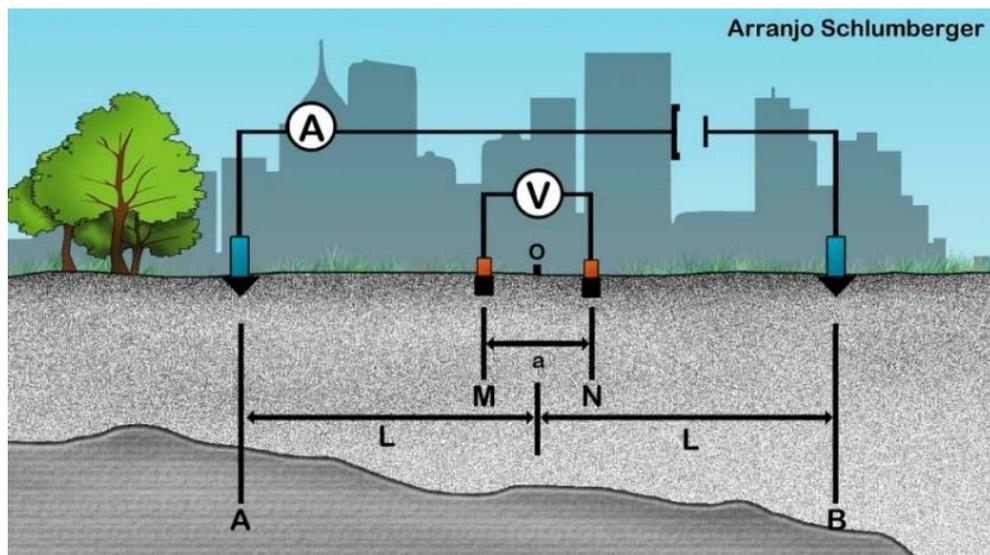


Figura 4.6 - Arranjo Schlumberger (Neogeo Geotecnologia LTDA.).

O arranjo Schlumberger (SCH) é, normalmente, sensível a variações verticais abaixo do centro da linha, mas menos sensíveis a variações horizontais de resistividade. Desta forma, é empregado principalmente em Sondagens Elétricas Verticais (SEV). A ideia básica desse arranjo é fazer com que a distância “a”, que separa os eletrodos M e N, tenda a zero em relação à distância crescente entre A e B. O erro produzido por esse tipo de arranjo, que se reflete nos dados de campo (em função dos ajustes necessários nas equações gerais básicas), pode ser considerado insignificante, não se traduzindo em desvantagem. Com o intuito de minimizar este erro, adota-se a relação: $MN \leq AB/5$.

- **Arranjo Wenner (WEN)**

O arranjo Wenner é considerado uma das mais simples operações de eletrodos. Por também apresentar grande sensibilidade vertical, é muito utilizado para a diferenciação de camadas horizontais.

Neste arranjo, os quatro eletrodos apresentam uma separação “a” crescente e constante durante todo o desenvolvimento do ensaio. A relação $AM = MN = NB = “a”$, e o centro do arranjo (o) permanece fixo (Figura 4.7).

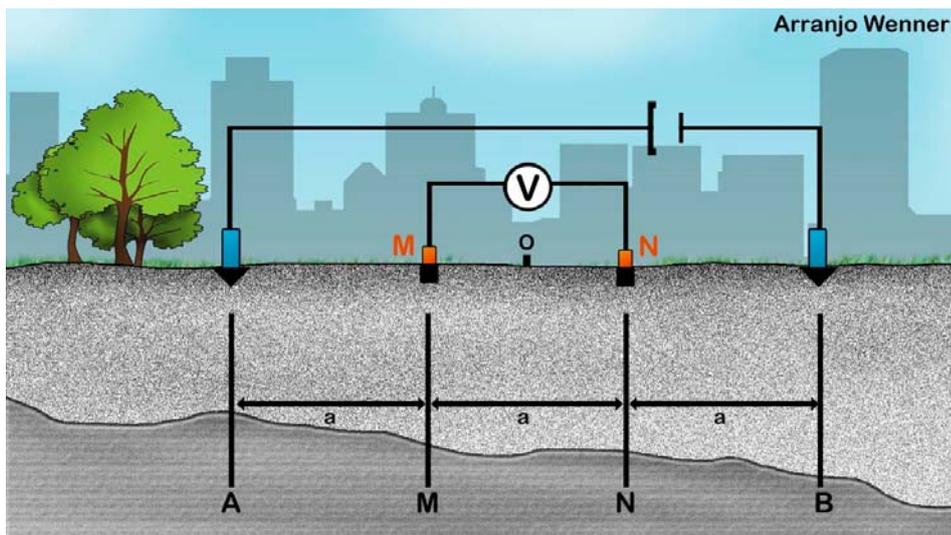


Figura 4.7 - Arranjo Wenner (Neogeo Geotecnologia LTDA.).

- **Arranjo Gradiente (GRD)**

O arranjo gradiente consiste em uma linha de transmissão de corrente (A e B) fixa, com medidas efetuadas entre os eletrodos de potencial (M e N), deslocados sobre perfis paralelos à seção AB (Figura 4.8).

As estações de medida permanecem no interior de um retângulo central, com centro coincidente com o meio de AB. O arranjo Gradiente (GRD), é utilizado, principalmente, para mapeamentos regionais de grandes extensões laterais (BRAGA, 2006).

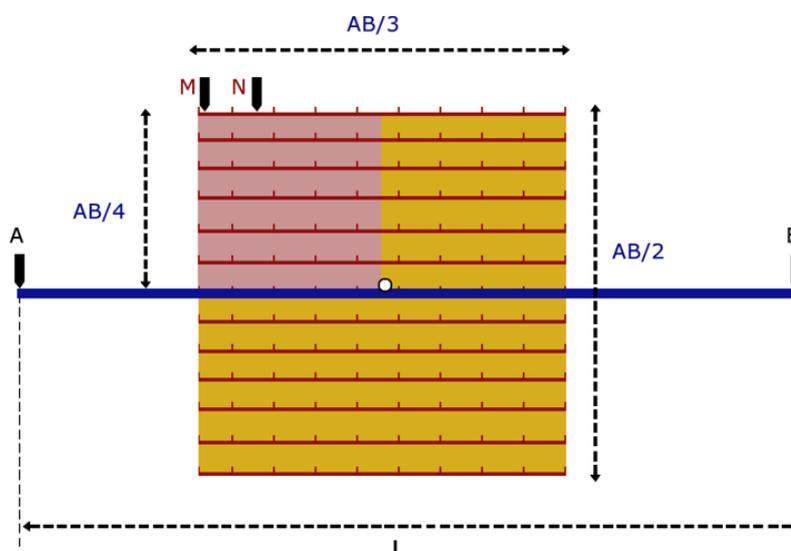


Figura 4.8 - Arranjo Gradiente (Neogeo Geotecnologia LTDA.).

4.1.1.3. Inversão dos Dados

No modelamento direto, um modelo genérico (da Terra) é utilizado e, por meio de algoritmos matemáticos, calcula-se as assinaturas geofísicas condizentes com a realidade observada (Figura 4.9A) com base em processos dirigidos por leis físicas. No entanto, o processo inverso ocorre quando os possíveis modelos reais precisam ser estimados a partir de dados coletados em campo. O conhecido problema da não-unicidade revela que, para o mesmo conjunto de dados, existe uma ampla gama de modelos cujos valores de resistividade aparente calculados estão de acordo com os valores coletados (Figura 4.9B).

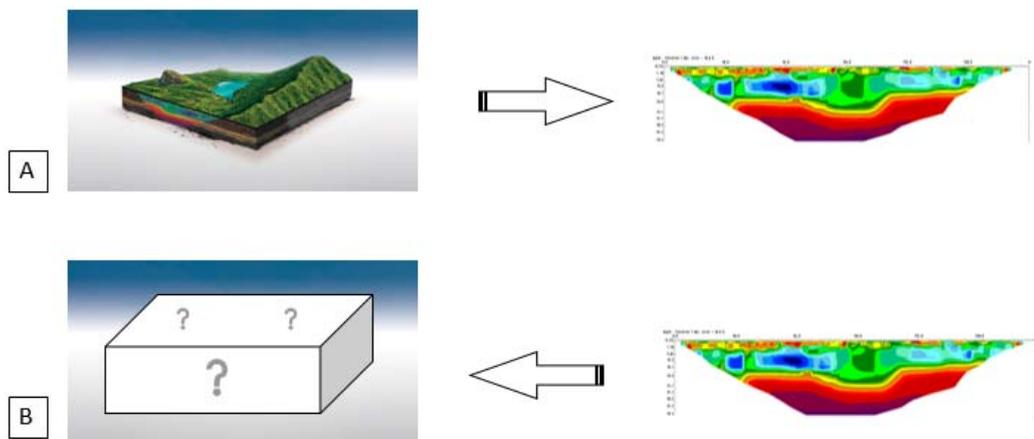


Figura 4.9 – (A): Esquema para o modelamento direto; (B): Esquema para a inversão de dados.

A relação entre a resistividade aparente coletada em campo e a resistividade aparente do modelo geofísico (condizente com a realidade do local) é consideravelmente complexa e, para sua determinação, é necessária a realização de um longo processo de inversão dos dados medidos em campo, por meio de um *software* computacional.

Em suma, todos os métodos de inversão tentam, essencialmente, encontrar um modelo para o subsolo cuja resposta concorda com os dados coletados em campo. Ao contrário de outros procedimentos para tratamento de dados geofísicos (*e.g.* filtragem), a inversão não toma um conjunto de dados brutos, manipula-os diretamente e produz algum tipo de resposta. Por essa razão, o fluxograma do processo não é um caminho linear simples com dados em uma extremidade e o modelo resultante em outra. Além de tentar minimizar a diferença entre os valores de resistividade aparente medidos e calculados, o método de

inversão também tenta alterar outras grandezas que produzirão certas características desejadas no modelo resultante (OLDENBURG & JONES, 2007).

A inversão, portanto, pode ser definida como o processo matemático baseado na solução da matriz Jacobiana de derivadas parciais, também conhecida por “matriz de sensibilidade”. Tal matriz pode ser calculada de forma analítica ou numericamente utilizando o método de elementos finitos. Por esse processo numérico, é possível fazer uso da solução de Gauss-Newton (“solução por mínimos quadrados”) ou quasi-Newton (GANDOLFO, 2007).

Os procedimentos de inversão de dados geofísicos podem ser assim sumarizados (OLDENBURG & JONES, 2007; GANDOLFO, 2007):

- 1) A partir de um conjunto de dados brutos hipotéticos, uma estimativa inicial do terreno é necessária com base nas resistividades aparentes dos materiais existentes ou em um modelo *a priori*. Em quase todas as pesquisas, algo é conhecido sobre a geologia do subsolo. O Modelo Inicial, no *software* RES2DINV, é determinado automaticamente, considerando um semi-espaço homogêneo com resistividade constante e igual à média dos logaritmos dos valores das resistividades aparentes da pseudo-seção medida em campo, a partir de um modelo de blocos retangulares;
- 2) Calcula-se, por modelamento direto, o conjunto de dados de resistividade aparente que seria obtido caso um levantamento fosse realizado em um terreno exatamente como o Modelo Inicial (*default*);
- 3) A este conjunto damos o nome de Modelo Calculado 1;
- 4) O Modelo Inicial é ajustado, por meio de um algoritmo de otimização, para um novo modelo, observando as diferenças entre o conjunto de dados brutos coletados em campo e o Modelo Calculado 1;
- 5) Calcula-se, novamente, o conjunto de dados de resistividade aparente que seria obtido caso o levantamento fosse realizado em um terreno que parecesse exatamente como o modelo recém ajustado. Esse conjunto de dados é chamado Modelo Calculado 2. Tal modelo constitui-se por uma nova resposta que se ajustará cada vez melhor ao conjunto de dados medidos;
- 6) O processo evolui repetidamente (Etapas 3 e 4) até que o ajuste entre o conjunto de dados brutos (Figura 4.10A) e o conjunto de dados calculados (Figura 4.10B)

seja mínimo (convergência) e o modelo final invertido (Figura 4.10C) apresenta-se satisfatório. O processo de inversão geofísica é um processo de aplicação iterativa do algoritmo de otimização. Uma inversão bem-sucedida raramente é um processo único, ou seja, vários modelos devem ser gerados por iterações sucessivas. O erro de ajuste dos dados (RMS) é calculado pela diferença entre o logaritmo das resistividades aparentes medidas e calculadas, diminuído a cada iteração durante o processo de inversão dos dados.

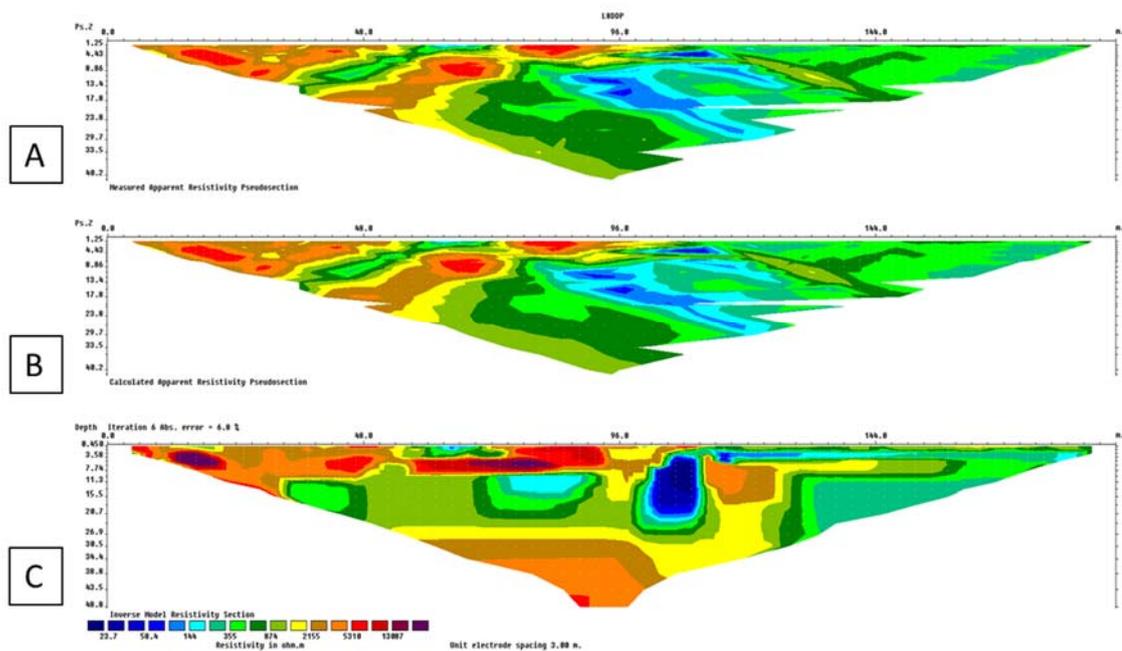


Figura 4.10 - Exemplo de dado de Eletroresistividade e a rotina de inversão. (A): Dado medido; (B): Dado calculado; (C): Dado invertido.

A Figura 4.11, a seguir, apresenta o esquema de inversão simplificado com a identificação das etapas detalhadas anteriormente.

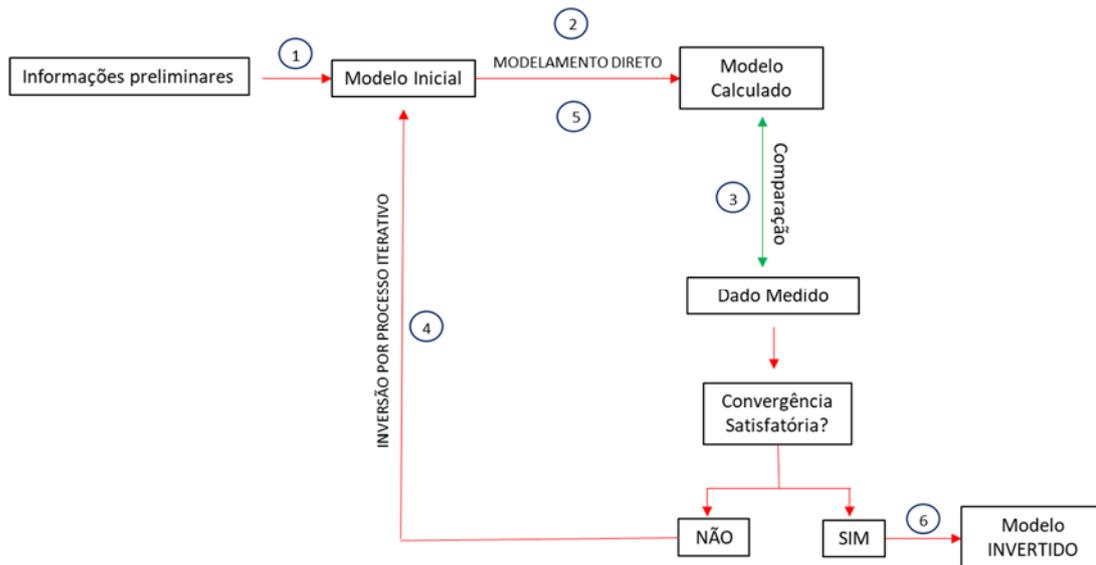


Figura 4.11 - Esquema ilustrativo para a rotina de inversão. Os números (1 a 6) representam as etapas sumarizadas acima.

As técnicas de inversão iterativas requerem as derivadas parciais da resposta do modelo (potencial elétrico) em relação aos seus parâmetros (resistividade de cada bloco do modelo discretizado). O modelo de discretização 2D utilizado no programa representa a forma pela qual a subsuperfície é subdividida em células (blocos) e que são utilizadas no processo de inversão (Figura 4.12). A disposição desses blocos no modelo está relacionada com a distribuição dos pontos na pseudo-seção. Cada bloco ou célula possui os seguintes atributos: um valor de resistividade “verdadeira” (calculada), que é o parâmetro do modelo, uma largura e uma espessura.

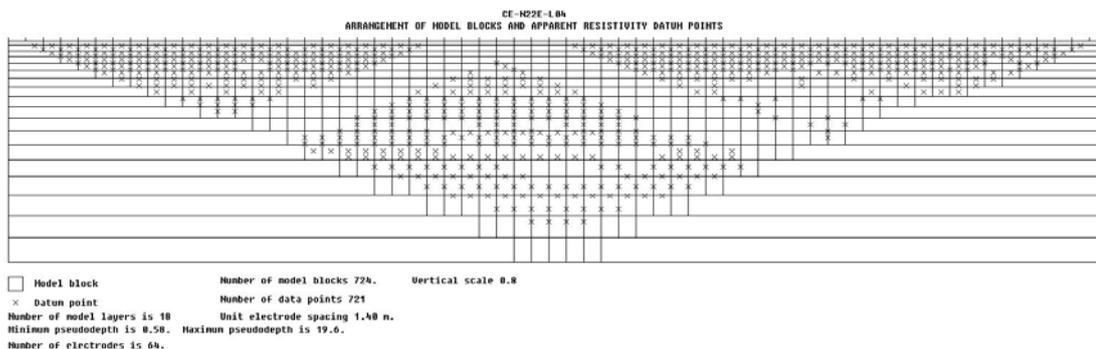


Figura 4.12 - Arranjo dos blocos discretizados e pontos de medida da correspondente pseudo-seção. O número de blocos é 724, com 721 pontos de medidas em um perfil de 90 m de extensão, aproximadamente.

4.1.1.4. Interpretação dos Resultados

A técnica de campo do Caminhamento Elétrico (CE) baseia-se na avaliação de anomalias geofísicas através do mapeamento de zonas com variação de resistividade elétrica. Essas variações podem ser tanto as de alta resistividade quanto as de baixa resistividade, e fornecem indícios qualitativos sobre as diferenças resistivas entre os materiais do subsolo. A resistividade elétrica apresenta seus valores afetados principalmente por três fatores principais: composição mineralógica, porosidade e teor em água, razão pela qual esses parâmetros acarretam em um amplo intervalo de variação nos valores de resistividade. Dentre esses fatores, a quantidade de água contida no solo, é muito importante, pois o aumento do teor de umidade leva a uma diminuição dos valores de resistividade.

A identificação das interfaces resistivas nas seções de Eletrorresistividade é importante, pois permite inferir quanto:

- As condições naturais do substrato onde terrenos com maior porosidade, mais arenosos e com espaços entre os grãos não preenchidos por água tornam o meio mais resistivo; enquanto que, a presença de água nesses espaços diminui a resistividade. A presença de materiais pelíticos também torna o meio mais condutivo;
- *A priori*, a presença de cavidades preenchidas por ar, em subsuperfície, faz com que os valores de resistividade elétrica sejam elevados; enquanto o preenchimento por água acaba por reduzir os valores de resistividade aparente, tornando os sinais elétricos mais condutivos.

4.2. MÉTODOS ELETROMAGNÉTICOS

4.2.1. Ground Penetrating Radar (GPR)

O GPR (*Ground Penetrating Radar*) ou Radar de Penetração no Solo é um método geofísico não invasivo que utiliza ondas eletromagnéticas de alta frequência (entre 10 a 2.500 MHz) para mapear feições geológicas, localizar poluentes no subsolo (em fases adsorvidas, dissolvidas e livre), estruturas, descontinuidades geológicas, bem como estruturas antrópicas e objetos enterrados pelo homem.

A técnica do GPR já foi utilizada para detecção de vazios e cavidade por alguns autores como Robert & Bosset (1994) e McMechan *et al.* (1998), principalmente com aplicação em cavidades subterrâneas de rochas calcárias.

Campos eletromagnéticos (EM) são constituídos pela composição de campos elétricos (\vec{E}) e campos magnéticos (\vec{H}). Como as variações magnéticas nas rochas são, em sua grande maioria, muito fracas, as mesmas podem ser consideradas desprezíveis (DANIELS *et al.* 1988). Por essa razão, as propriedades elétricas constituem os fatores dominantes que controlam a resposta do subsolo ao campo EM.

Os fundamentos do método GPR estão embasados na teoria de propagação das ondas eletromagnéticas, ou seja, nas equações de Maxwell (1831 – 1879). Essas equações são utilizadas para estudar a estrutura interna da Terra, a partir de suas propriedades elétricas e magnéticas, descrevendo o comportamento do campo eletromagnético em qualquer meio (COSTA, 2012). As equações de Maxwell representam expressões matemáticas de resultados experimentais com aplicações em situações macroscópicas.

Na Lei de Ampère, uma das equações de Maxwell, o campo magnético (\vec{H}) é produzido por correntes elétricas, conforme a seguinte equação:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (4.11)$$

- ∇ : operador diferencial;
- \vec{J} : densidade de corrente por condução, em ampère/metro quadrado (A/m^2);
- $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$: corrente por deslocamento.

As movimentações de cargas elétricas (correntes elétricas) resultantes da ação de um campo eletromagnético podem ocorrer de duas formas: correntes por condução (\vec{J}) e correntes por deslocamento/polarização (\vec{D}).

As equações de Maxwell, entretanto, não possuem nenhuma informação sobre as propriedades elétricas e magnéticas dos materiais em que os campos elétrico e magnético atuam. Dessa forma, é necessário introduzir as relações constitutivas do meio, que relacionam o campo elétrico com as propriedades elétrica e magnética dos materiais (COSTA, 2012).

A primeira relação constitutiva do meio, conhecida como Lei de Ohm, relaciona a densidade de corrente de condução (\vec{J}) ao campo elétrico (\vec{E}), sendo escrita como:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (4.12)$$

Nos materiais geológicos, essa relação é aproximadamente linear e a constante de proporcionalidade é a condutividade elétrica (σ). A condutividade elétrica de um material é uma medida de sua habilidade em conduzir corrente elétrica (KELLER, 1987).

A segunda relação constitutiva do meio relaciona diretamente o campo elétrico (\vec{E}) à corrente de deslocamento (\vec{D}). A constante de proporcionalidade é a permissividade dielétrica do material (ϵ), segundo a equação:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (4.13)$$

A permissividade dielétrica (ϵ) pode ser definida como a medida da capacidade que um material isolante possui de armazenar cargas elétricas (ou de se polarizar).

Quando a condutividade e a permissividade dielétrica são constantes em um meio, existe uma frequência de transição em que as duas formas de cargas elétricas se equivalem. Acima dessa frequência, predomina a movimentação por deslocamento, quando a energia se propaga como onda sem nenhuma ou pouca dispersão. Abaixo dessa frequência, predomina a movimentação por condução, em que a energia se difunde no material (COSTA, 2012).

Substituindo-se as relações constitutivas (Equações 4.12 e 4.13) do meio nas equações de Maxwell, obtêm-se as equações de propagação da onda eletromagnética em um determinado meio, cujos fatores mais importantes que as governam são a velocidade e a atenuação. Segundo Annan (1992), a velocidade (V) e a atenuação (α) da onda no deslocamento são relacionadas com a permissividade dielétrica e com a condutividade elétrica.

A velocidade de propagação do campo EM é definida como:

$$V = \frac{c}{\sqrt{K}} \quad (4.14)$$

- c : velocidade da luz = $2,997 \times 10^8$ m/s \cong 0,3 m/ns;
- K : constante dielétrica dos materiais.

O valor de K pode ser definido segundo a relação:

$$K = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (4.15)$$

- ε : permissividade dielétrica do material (F/m);
- ε_0 : 8.854×10^{-12} F/m (permissividade dielétrica no vácuo).

No caso do GPR, a onda é atenuada pelos fenômenos de absorção, além das perdas por espalhamento geométrico, condução elétrica (dominante em materiais condutivos, para baixas frequências), polarização e dispersão. Essas perdas ocorrem sob a forma de calor liberado a partir da propagação da energia do campo eletromagnético através do meio. A atenuação (α) pode ser definida pela seguinte equação:

$$\alpha = \frac{1.64 \sigma}{\sqrt{K}} \quad (4.16)$$

Os valores de constante dielétrica (K) e condutividade elétrica (σ).podem ser consultadas em diversas tabelas disponíveis na literatura corrente.

A Figura 4.13 apresenta a variação típica da constante dielétrica (K) com o conteúdo volumétrico de água nos solos. Tal curva foi obtida empiricamente por Topp *et al.* (1980), usando medida do tempo de propagação de ondas eletromagnéticas nas frequências de rádio para diversos tipos de materiais geológicos.

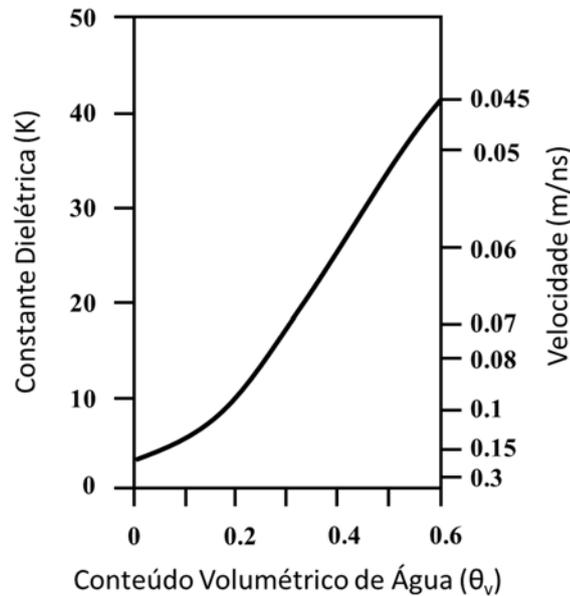


Figura 4.13 - Variação da constante dielétrica (K) em função do conteúdo de água para os materiais geológicos (adaptado de TOPP *et al.* 1980).

Sabe-se, portanto, que a permissividade dielétrica (ϵ) é o principal fator que influencia a velocidade da onda (Equação 4.14), enquanto a condutividade elétrica (σ) tem influência direta na atenuação do sinal (Equação 4.16). Assim, a penetração do pulso de radar é limitada principalmente pela condutividade elétrica do terreno, sendo que a eficácia de um levantamento pode ser comprometida em solos que apresentam elevados valores desta grandeza.

4.2.1.1. Funcionamento do Método

A análise com o método de GPR consiste na emissão e propagação de ondas eletromagnéticas, em um meio físico, com a posterior recepção dos sinais refletidos, em discontinuidades desse meio. Desta forma, o sistema de GPR é formado por uma fonte geradora de pulsos elétricos de alta frequência, uma antena transmissora, uma antena receptora e uma unidade de armazenamento de dados.

A Figura 4.14 ilustra, de modo esquemático, o funcionamento do GPR. A fonte geradora produz um pulso de curta duração e alta voltagem, que é aplicado na antena transmissora. Essa antena emite a onda eletromagnética para o subsolo sendo que parte da onda é refletida quando existir contraste de propriedades físicas. Tal reflexão ocorre quando a onda eletromagnética, gerada no meio com constante dielétrica K_1 , encontrar uma interface que separa esse meio de um outro, com constante dielétrica K_2 . Na antena receptora são registradas duas ondas diretas: a primeira adquirida é a onda direta que viaja pelo ar e a segunda é a onda direta que viaja pela subsuperfície. Após a recepção das duas ondas diretas, são detectadas as ondas de interesse, refletidas em interfaces e/ou difratadas por pequenos corpos.

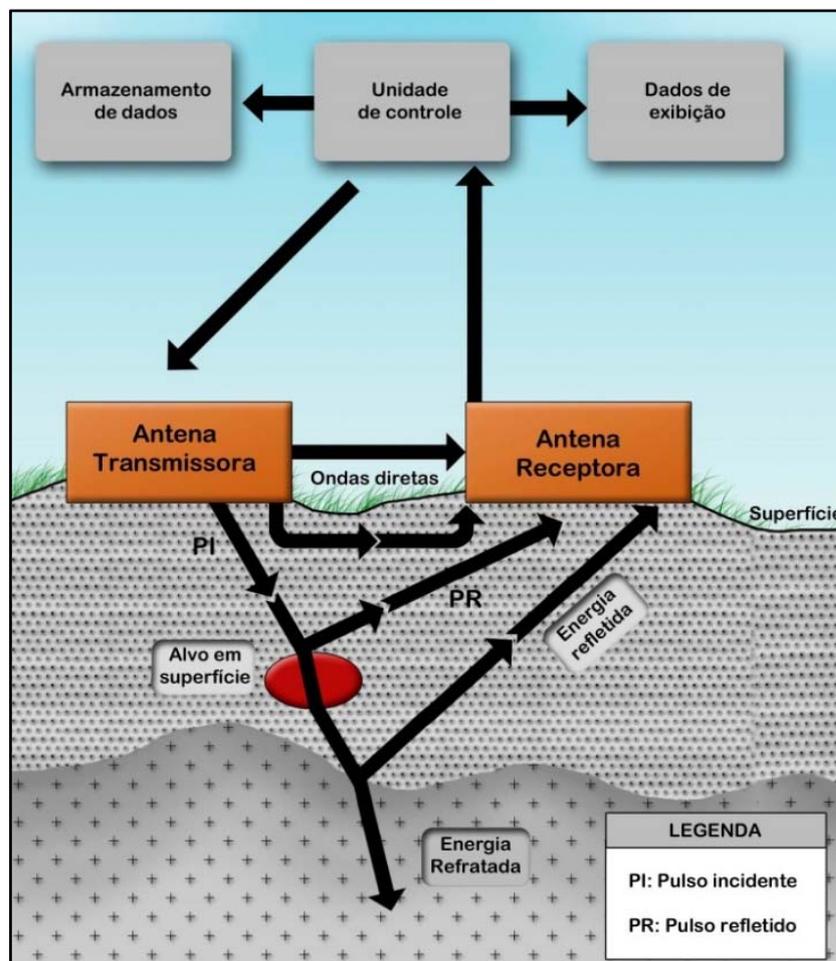


Figura 4.14 - Esquema da reflexão das ondas (Neogeo Geotecnologia LTDA.).

O sinal recebido é amplificado, digitalizado, visualizado e armazenado, podendo ser processado em uma etapa posterior. Os dados são apresentados na forma de seções cuja

posição de medida em superfície corresponde a um traço, que representa o tempo duplo de percurso do sinal refletido/difratado em discontinuidades presentes no subsolo (materiais que apresentem contrastes de K). A rapidez com que a aquisição dos dados é realizada possibilita a coleta de um grande número de traços que produzem uma seção de alta definição, denominada radargrama.

4.2.1.2. Técnicas de Aquisição dos Dados

O sistema GPR pode ser operado através dos modos do afastamento constante (*Common Offset*) ou por meio das sondagens de velocidade (CMP ou WARR).

A técnica de aquisição com afastamento constante é o modo mais comum de operação do método. Nesta técnica, as antenas, transmissora e receptora, são mantidas a uma distância fixa constante, sendo transportadas ao longo do perfil (Figura 4.15). O resultado obtido é uma seção cujo eixo vertical tem-se a medida do tempo duplo de viagem das ondas refletidas, enquanto no eixo horizontal estão as posições das antenas (distâncias).

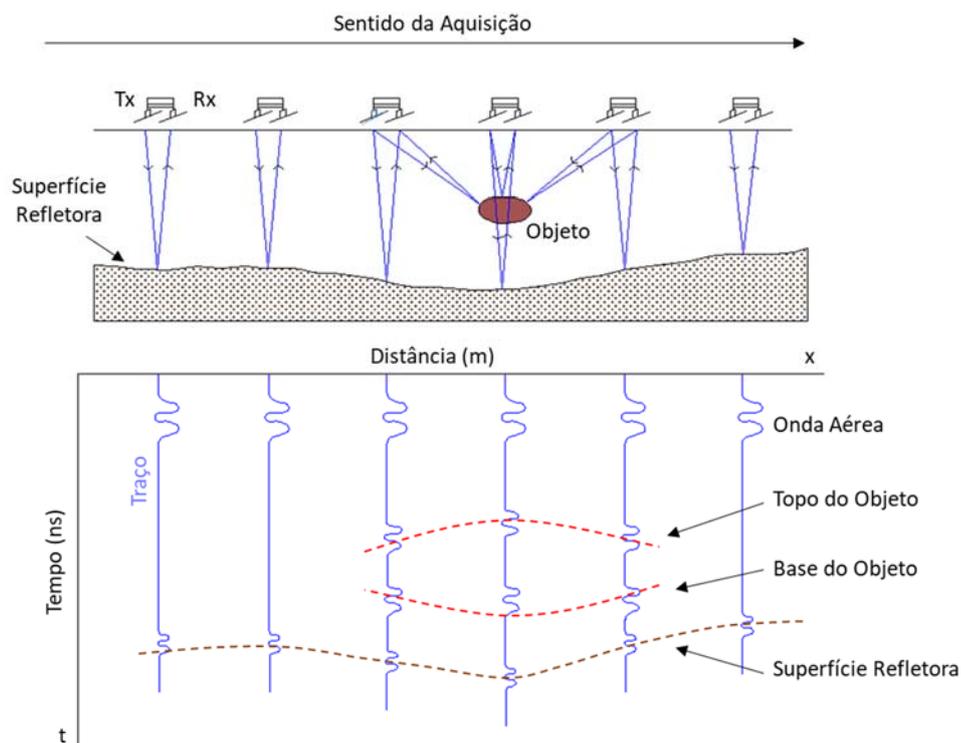


Figura 4.15 - Levantamento GPR por meio da técnica *Common Offset* e respectivo registro de traços obtidos (adaptado de DAVIS & ANNAN, 1989).

Tanto a técnica do CMP (*Common Midpoint*) quanto WARR (*Wide Angle Reflection and Refraction*) são utilizadas para se obter uma estimativa da velocidade da onda de radar através da variação do espaçamento das antenas e do tempo duplo das reflexões em subsuperfície. Na técnica CMP, a abertura entre as antenas (transmissora e receptora) é crescente em sentidos opostos, partindo-se de um ponto central fixo (Figura 4.16). Na técnica WARR, uma das antenas é mantida fixa enquanto a outra é sucessivamente afastada da primeira (Figura 4.17).

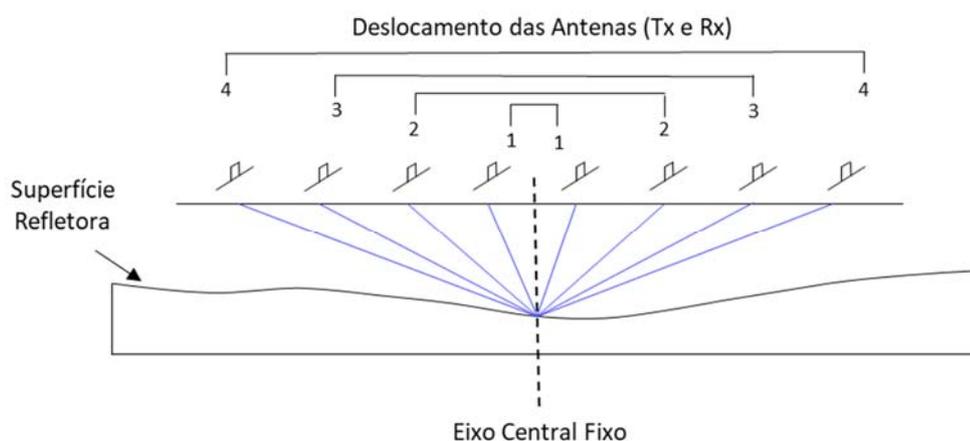


Figura 4.16 - Sondagem CMP para determinação da velocidade no meio (adaptado de BORGES, 2002).

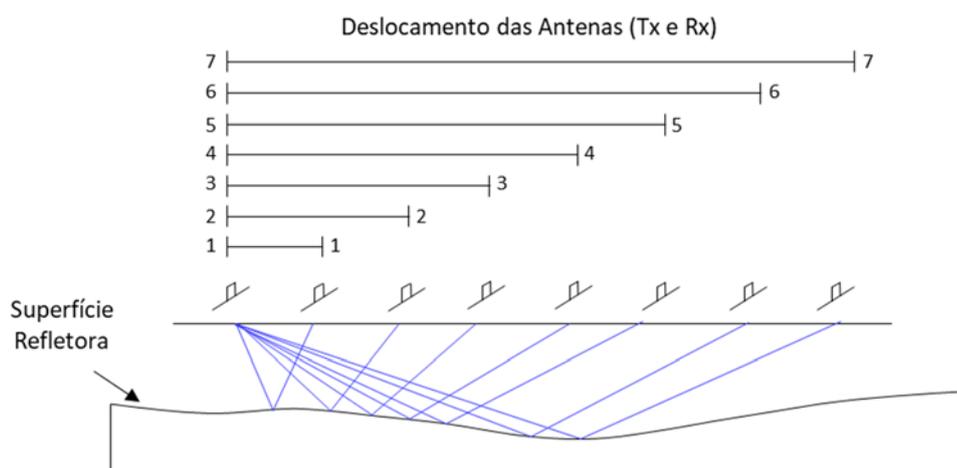


Figura 4.17 - Sondagem WARR para determinação da velocidade no meio (adaptado de BORGES, 2002).

A determinação da velocidade de propagação da onda eletromagnética no meio faz-se necessária para quantificar a profundidade dos refletores, ou seja, converter o eixo vertical do radargrama de tempo (ns) para profundidade (m). Existem várias maneiras de estimar o valor da velocidade, a primeira é através da identificação de um objeto e/ou feição na

seção cuja profundidade é conhecida, a segunda seria através de valores tabelados encontrados na bibliografia geofísica. A terceira opção é a determinação da velocidade por intermédio de hipérboles de difração observadas nos radargramas, denominada de adaptação hiperbólica. Finalmente, o método mais recomendado (por tratar-se de uma investigação *in situ*) é a utilização dos ensaios CMP (*Common Midpoint*) ou WARR (*Wide Angle Reflection and Refraction*), acima descritos.

4.2.1.3. Parâmetros de Aquisição

Para a aquisição dos perfis de GPR, alguns parâmetros de aquisição devem ser observados, tais como: frequência da antena, abertura da janela temporal (tempo que a janela deve permanecer aberta, para que o sinal seja transmitido e refletido), intervalo de amostragem (intervalo entre as emissões de sinal elétrico, ou seja, a resolução horizontal), número de amostras por traço (número de pontos amostrados em um traço, ou seja, a resolução vertical) e espaçamento e orientação entre as antenas (SOUZA, 2006).

A escolha da orientação das antenas afeta diretamente a qualidade dos dados devido aos diferentes padrões de radiação. Existem inúmeros trabalhos a respeito dos modos de arranjos de antenas, como, por exemplo, os estudos de Peter Annan (ANNAN, 1992). Normalmente, orienta-se as antenas perpendicularmente à direção do perfil GPR, situação em que o pulso é radiado com o campo elétrico transversal à direção do perfil. As principais orientações das antenas de radar estão ilustradas na Figura 4.18.

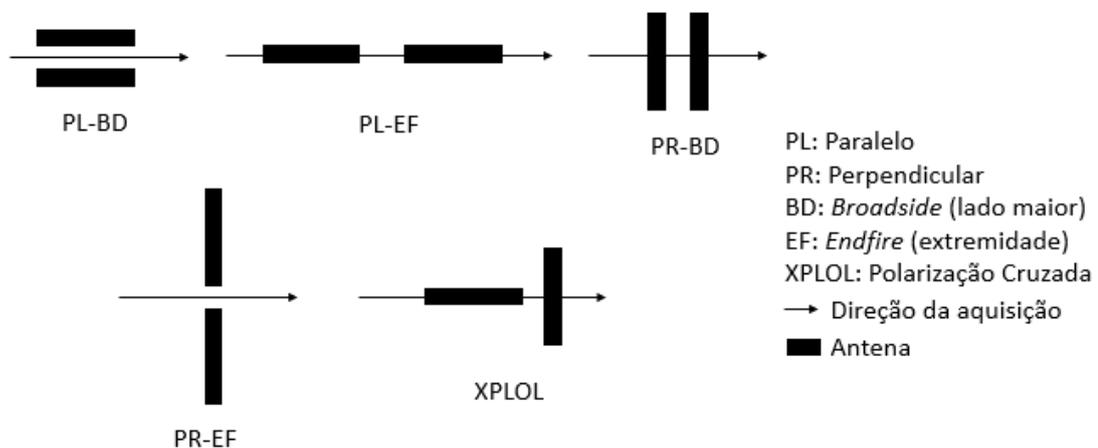


Figura 4.18 - Arranjo de antenas de GPR (adaptado de ANNAN, 1992).

As antenas podem ser usadas nos modos monoestático ou biestático. O modo monoestático usa a antena como transmissor e receptor, já o modo biestático usa duas antenas separadas, uma servindo como transmissor (TX) e a outra como receptor (RX). A frequência de operação das antenas é escolhida de forma a fornecer a relação mais vantajosa entre penetração e resolução. Sinais de alta frequência produzem alta resolução, porém baixa penetração, ocorrendo o inverso para sinais de baixa frequência. Os sistemas GPR podem operar com diversos valores de frequências, e em geral, tanto o módulo transmissor como o receptor pode ser usado com um variado número de antenas, cada qual correspondendo a um determinado valor de frequência. Normalmente, suas antenas são projetadas para atuar em uma faixa situada entre 0.5 vezes a frequência central até 1.5 vezes a frequência central (SOUZA, 2006). A escolha de qual antena utilizar deverá levar em consideração aspectos importantes tais como o acesso à área do levantamento e as condições locais existentes, uma vez que o tamanho de uma antena varia de acordo com a sua frequência central. A Tabela 4.2 apresenta alguns valores de frequências centrais das antenas de GPR com suas respectivas profundidades máximas de penetração.

Tabela 4.2 - Variação da frequência central das antenas de GPR e respectivas profundidades (adaptado de PORSANI, 1999).

Frequência Central (MHz)	Profundidade Máxima de Penetração (m)
1000	1
400	2
200	4
100	25
50	30
25	40
10	50

Deve-se ressaltar que os valores contidos na tabela podem sofrer variações em virtude do meio geológico a ser pesquisado. No entanto, quando as informações geológicas são escassas ou inexistentes, a tabela serve como guia prático para os trabalhos de aquisição. Segundo Davis & Annan (1989) os dados de GPR podem ser adquiridos em modo contínuo/dinâmico ou estático (*step mode*). O modo de aquisição dinâmico baseia-se em medições em modo contínuo (os traços são acionados com base na distância percorrida ou em intervalos de tempo), garantindo, portanto, maior agilidade durante a operação. Entretanto, uma das desvantagens associadas a esse modo resulta no mau acoplamento

entre a antena e o solo em terrenos acidentados, principalmente na presença de vegetação alta (WOODWARD *et al.* 2003). Tal modo de aquisição é mais adequado quando é necessário fazer o reconhecimento do terreno (JOL & BRISTOW, 2003). Já o modo estático baseia-se no acionamento manual dos traços durante as aquisições. Segundo Jol & Bristow (2003), o *step mode* é preferencialmente utilizado nos levantamentos em que são necessários alta resolução e boa qualidade dos dados.

4.2.1.4. Processamento e Interpretação dos Resultados

O processamento dos dados de GPR, posterior ao levantamento de campo, é realizado seguindo uma rotina sistemática de processamento, realçando ou removendo determinadas feições. As etapas iniciais envolvem a edição dos dados, ou seja, a manipulação das informações para melhorar a apresentação, inclusão de topografia, edição dos traços, correção do tempo zero da chegada da onda e etc. A etapa seguinte inclui a filtragem dos dados para melhorar a razão sinal/ruído, aplicação de ganhos e, no caso de tratamentos mais avançados, tem-se as etapas de migração e deconvolução. A migração tem por objetivo posicionar os refletores em suas posições verdadeiras e, dessa forma, reconstruir a imagem gerada de modo que melhor represente a subsuperfície imageada (SHERIFF, 1991). Já a deconvolução permite eliminar reflexões múltiplas, causadas pela ressonância da energia do radar (NUNES, 2002). Após o satisfatório processamento, os radargramas gerados podem ser, finalmente, interpretados.

As interpretações dos radargramas levam em conta a estrutura interna dos refletores tais como forma, mergulho, relação de continuidade além da dicotomia contraste-atenuação, que pode ser nitidamente diferenciada na Figura 4.19.

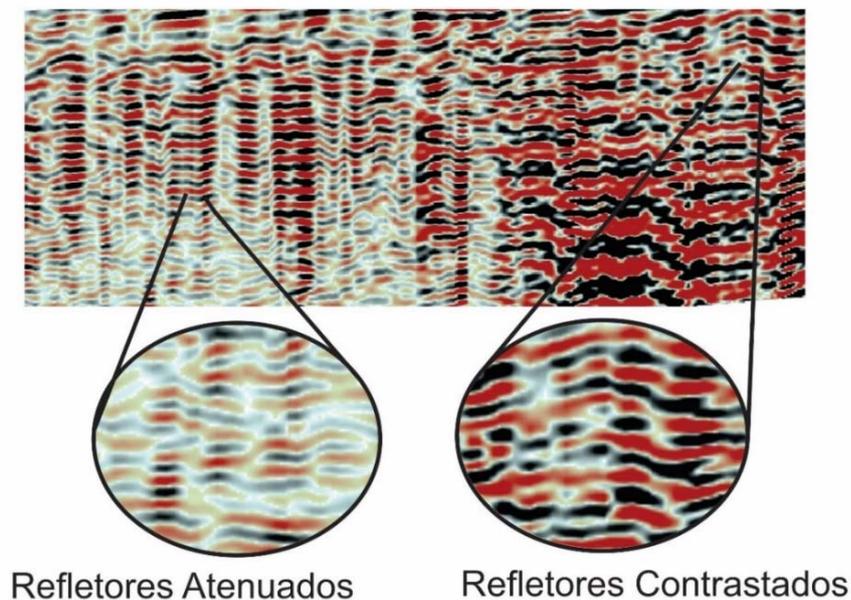


Figura 4.19 - Radargrama com variação de contraste dos refletores em uma seção ilustrativa de GPR (Neogeo Geotecnologia LTDA.).

Vale ressaltar que as interpretações das seções de GPR configuram-se como um processo bastante subjetivo e dependente do intérprete. É importante estar ciente dos objetivos propostos e possuir conhecimento sobre as propriedades elétricas dos alvos e do meio encaixante.

Segundo Robinson & Michaud (1999), algumas condições devem ser levadas em consideração para o planejamento e interpretação de um levantamento de GPR:

- A alta condutividade do solo rende uma alta razão de atenuação das ondas eletromagnéticas;
- Para levantamentos geológicos, construções, cabos elétricos, entre outros materiais poderão causar interferências se estiverem próximos à linha de levantamento;
- Materiais do tipo areia e cascalho possuem, frequentemente, baixa condutividade e podem apresentar altos contrastes devido a diferentes conteúdos de água, resultando em uma maior penetração do sinal (baixa atenuação). Porém, argila e silte apresentam, frequentemente, maior condutividade associada, resultando em alta razão de sinais de atenuação;

- O grau de saturação faz com que a razão de atenuação seja mais alta em materiais saturados do que nos secos. Ferro dissolvido nos poros pode aumentar a condutividade, resultando em um aumento adicional na razão de atenuação. Segundo Harari (1996), os fortes sinais de GPR, que ocorrem em limites de laminações, podem estar relacionados ao contraste significativo da impedância pela presença de minerais pesados, como, por exemplo, magnetita;
- A força do potencial refletor de interesse precisa ser considerada dependendo do que se deseja imagear (objetivo do trabalho). Salienta-se que cada tipo de antena alcança uma margem de resolução e profundidade intrínseca;
- Existe uma relação entre a profundidade de penetração e resolução. A geometria (altura, comprimento e largura) e a orientação (mergulho e direção) do alvo devem ser estimadas antes do levantamento.

5. CAVIDADE N4E-0022: AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS GEOFÍSICOS

5.1. METODOLOGIAS E ETAPAS DOS ESTUDOS

Os trabalhos pioneiros de geofísica rasa aplicados a cavidades ferríferas do Complexo Carajás ocorreram inicialmente em 2014 por meio do estudo de 2 (duas) cavidades pertencentes à Mina N4EN (N4E-0026 e N4E-0086). Nesta fase incipiente, os objetivos principais restringiam-se à escolha da melhor metodologia geofísica frente ao problema proposto assim como a definição de parâmetros gerais de forma a corroborar um melhor imageamento e, conseqüentemente, uma melhor interpretação dos dados geofísicos adquiridos. Com a evolução dos projetos de pesquisa em geofísica rasa na região, a adequada parametrização para os *inputs* nas aquisições de GPR, assim como o correto espaçamento entre eletrodos nas aquisições de Eletrorresistividade (CE), por exemplo, passaram a contribuir para aquisições de dados que melhor representassem a realidade local.

No escopo deste trabalho, foram aplicados os métodos geofísicos de Eletrorresistividade (Caminhamento Elétrico) e de *Ground Penetrating Radar* (GPR) para o caso da cavidade N4E-0022 da Mina N4EN, situada ao norte da Serra dos Carajás e sudeste do estado do Pará.

Como etapas prévias ao levantamento geofísico, pode-se listar os seguintes estágios dos estudos realizados:

- Etapa 1: Revisão bibliográfica, contextualização do tema e descrição dos aspectos pertinentes ao local do trabalho;

- Etapa 2: Visitas de reconhecimento à área de estudo (N4E-0022, Mina N4EN – Complexo Carajás) em 2018;
- Etapa 3: Planejamento das seções geofísicas de modo transversal às principais estruturas;
- Etapa 4: Parametrização da coleta dos dados geofísicos, considerando-se a profundidade a ser imageada e a resolução necessária para reconhecimento do alvo, seja em um perfil isolado ou na interpretação de perfis paralelos. Para a Eletrorresistividade (CE), tal parametrização é realizada pela correta definição do arranjo de eletrodos, espaçamento entre eletrodos, protocolo de aquisição, quantidade total de eletrodos por perfil e, até mesmo, a potência do equipamento. Para o GPR, configura-se a frequência da antena a ser utilizada, o espaçamento entre traços (resolução horizontal), frequência de amostragem (resolução vertical) e janela de tempo. Para ambos os métodos, a resolução lateral entre perfis (espaçamento entre linhas) é determinada pelas dimensões e formato do alvo.
- Etapa 5: Topografia dos perfis geofísicos por meio de Estação Total e GPS RTK de alta precisão, posteriormente inserida no mapa planialtimétrico fornecido pela Vale S.A.

É importante destacar que a fase de planejamento geofísico possui como embasamento a análise estrutural realizada previamente para a definição dos *trends* estruturais principais, a identificação da direção principal de desenvolvimento da cavidade (geometria do alvo), assim como o sentido geral de bandamento da formação ferrífera bandada. Sabe-se que o posicionamento das seções geofísicas interfere diretamente na qualidade dos dados geofísicos coletados e, conseqüentemente, nas interpretações realizadas. Nesta etapa, também foram identificadas as dificuldades operacionais da região (como relevo acidentado, resistência da rocha frente à cravação de eletrodos, vegetação fechada) assim como a verificação de ruídos eletromagnéticos que interferem nos dados (como, por exemplo, postes de iluminação, torres de alta tensão, cercas metálicas, antenas de rádio).

Para a cavidade N4E-0022 foram adquiridas 05 (cinco) seções geofísicas, espaçadas de 10 metros entre si e assim dispostas: 03 (três) no sentido SW-NE e 02 (duas) em sentido perpendicular às anteriores, ou seja, SW-NE. Para posterior comparação e validação, os diferentes métodos geofísicos foram adquiridos de modo coincidente, diferenciando-se

pela profundidade atingida, inerente a cada método. Durante a fase de aquisição dos dados, a etapa de controle de qualidade dos dados faz-se necessária como forma de validação e aprovação dos dados recebidos. Nesta etapa, caso algum parâmetro não tenha sido ajustado corretamente, a seção geofísica deve ser novamente realizada até a aprovação por parte do processamento.

- Etapa 6: Para os dados de CE, o controle de qualidade é realizado por meio da análise da resistência de contato, validação da SNR (Relação Sinal/Ruído) e validação de *datum points* oriundos do dado bruto (Figura 5.1). Para os dados de GPR, a validação é realizada aferindo-se o espaçamento entre traços, a verificação de traços mortos, atenuação e o espectro de frequência central (Figura 5.2).

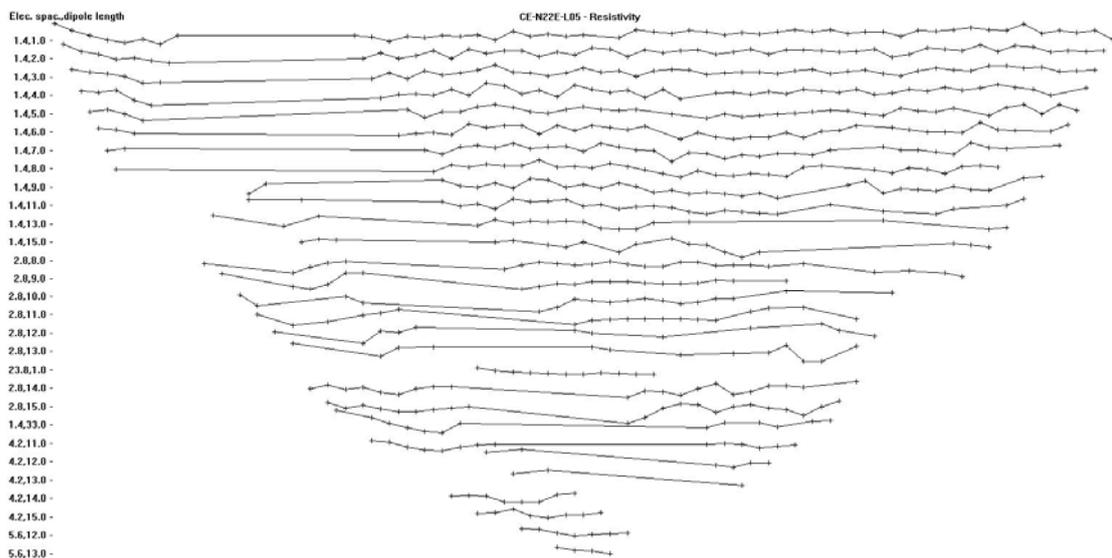


Figura 5.1 - Controle de qualidade por meio da análise de *datum points* do dado bruto de Eletrorresistividade.

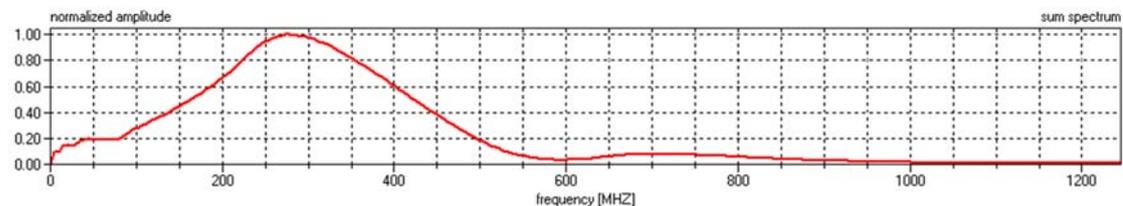


Figura 5.2 - Controle de qualidade por meio da análise do espectro de frequência central do dado de GPR.

Após a validação dos dados pelo controle de qualidade, a etapa referente ao processamento de dados deve ser rigorosamente acompanhada uma vez que, a partir desta etapa, pode-se conseguir concretizar uma adequada interpretação.

- Etapa 7: Acompanhamento do processamento de dados elétricos (dados medidos, calculados e invertidos) e eletromagnéticos (aplicação de filtros) por meio de *softwares* específicos tais como RES2DINV/RES2DMOD (Geotomo *Software*), Surfer (Golden *Software*) e ReflexW (Sandmeier).

5.2. ELETORRESISTIVIDADE (CAMINHAMENTO ELÉTRICO)

O equipamento utilizado no trabalho foi o resistivímetro SAS 4000 da fabricante ABEM, composto de unidade de controle, unidade seletora, bateria, eletrodos com hastes metálicas, grampos e cabos (Figura 5.3). Tal equipamento possui capacidade de 64 eletrodos, podendo endereçar até 10 eletrodos simultaneamente, sendo 2 de corrente e 8 de potencial.

O levantamento geofísico com utilização do método elétrico objetivou o imageamento do subsolo pelo mapeamento de diferenças resistivas como respostas a diferentes litotipos presentes na região ou mesmo pela ausência de matéria (como, por exemplo, cavidades). Os eletrodos foram cravados em subsuperfície por meio de furadeira e, em virtude do terreno exacerbadamente acidentado e impossibilidades operacionais, alguns eletrodos tiveram de ser ignorados (saltados) nos trechos mais críticos (taludes íngremes em quebra de relevo).



Figura 5.3 - Operação do resistivímetro em campo, cavidade N4E-0022. (A): Equipamento composto por unidade de controle, unidade seletora e bateria; (B): Eletrodos metálicos cravados na superfície e cabos.

A Tabela 5.1 apresenta, de modo detalhado, os quantitativos executados (comprimento horizontal) para cada perfil de Eletrorresistividade (CE) executado. A profundidade máxima vertical alcançada para cada seção também pode ser visualizada na mesma tabela. As principais informações de aquisição e processamento encontram-se na Tabela 5.2.

Tabela 5.1 - Inventário das aquisições de Eletorresistividade (CE).

Cavidade	Nome da Linha	Comprimento (m)	Prof. Alcançada (m)
N4E-0022	CE-N22E-01	86.94	21
	CE-N22E-02	91.02	20
	CE-N22E-03	83.11	18
	CE-N22E-04	85.96	23
	CE-N22E-05	88.98	21

Tabela 5.2 - Informações das aquisições de Eletorresistividade (CE).

Método da Eletorresistividade - Cavidade N4E-0022	
Parâmetros/Equipamento	Característica
Técnica de Campo	Caminhamento Elétrico (CE)
Equipamento	SAS 4000
Fabricante	ABEM
Bateria	12 V – 60 A
Cabos	2 cabos, 32 vias/ <i>takeouts</i>
Total de Eletrodos por Aquisição	64
Quantidade de Seções	5
Espaçamento entre Linhas	10 metros
Espaçamento entre Eletrodos	1.40 metros
Níveis de Investigação	29
Corrente Mínima e Máxima de Operação	20 mA / 200 mA
Iterações	5
Profundidade Máxima	23 metros
<i>Roll-Along (Up ou Down)</i>	Não
Otimização	Gauss
Modelo de Refinamento	Normal
Efeito de redução do Modelo de Bloco	Não
Tipo de cálculo de matriz Jacobiana	Gauss-Newton
Limite de convergência relativa (RMS)	5%
Uso de Modelo Inicial na Inversão	Sim
Tipo de método de elemento finito	Trapezoidal

Os *softwares* utilizados para o processamento, interpretação e apresentação dos dados compreenderam:

- Inversão e processamento de dados elétricos: RED2DMOD e RES2DINV;
- Obtenção de imagens de satélite: *Google Earth* (Google);
- Tratamento de imagens, nuvem de pontos e montagens: *Surfer*, *Voxler*;
- Modelamento numérico e visualização tridimensional: Leapfrog Geo ®.

Foram realizados testes com utilização de diferentes arranjos nas fases iniciais do projeto como forma de procurar o melhor arranjo entre eletrodos para as aquisições. Os testes foram realizados em seção próxima à cavidade N4E-0022 com os arranjos Dipolo-Dipolo (DDP), Schlumberger (SCH) e Wenner (WEN). As imagens, a seguir, (Figuras 5.4 a 5.6) apresentam os testes realizados para escolha do arranjo contendo o dado calculado, medido e invertido, sem topografia.

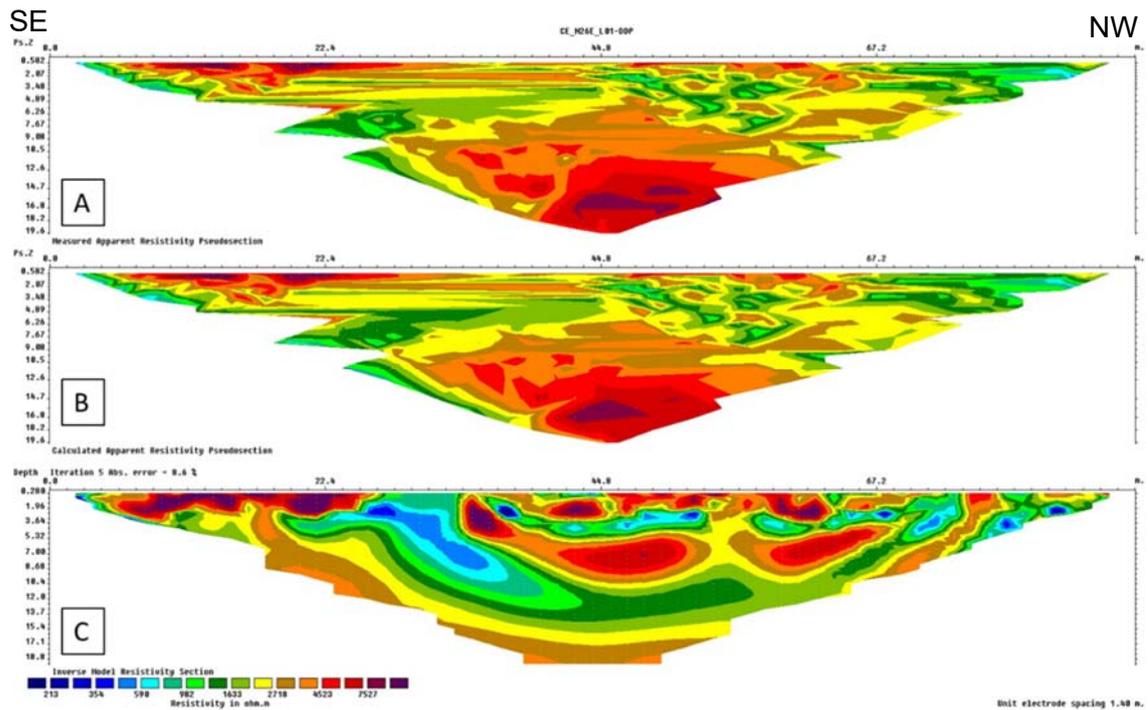


Figura 5.4 - Teste Arranjo Dipolo-Dipolo (DDP). (A): Dado medido; (B): Dado calculado; (C): Dado invertido.

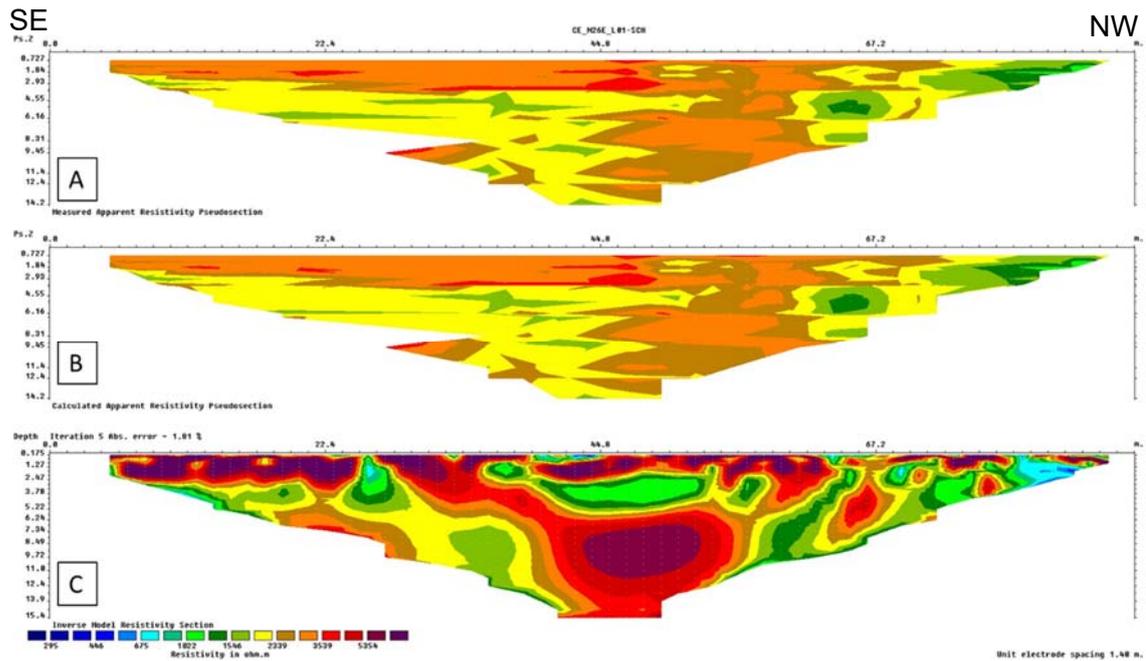


Figura 5.5 - Teste Arranjo Schlumberger (DDP). (A): Dado medido; (B): Dado calculado; (C): Dado invertido.

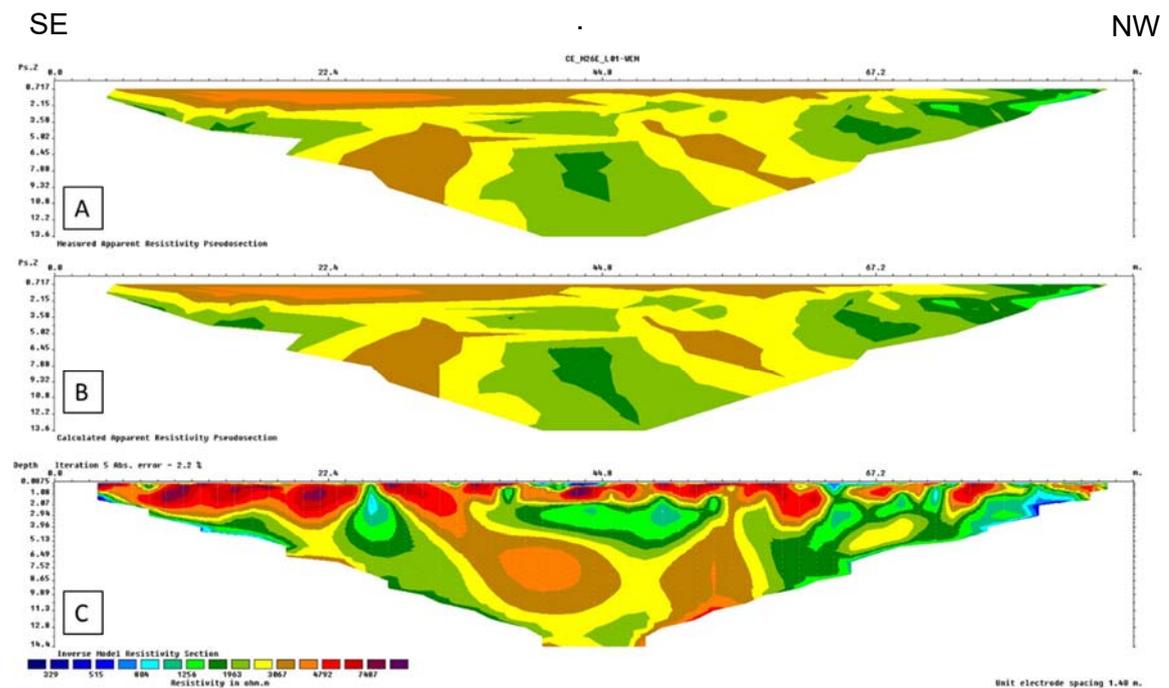


Figura 5.6 - Teste Arranjo Wenner (WEN). (A): Dado medido; (B): Dado calculado; (C): Dado invertido.

O arranjo de eletrodos escolhido para a realização dos ensaios de Eletrorresistividade (CE) foi o Dipolo-Dipolo (DDP) por apresentar melhor resolução, boa relação sinal-ruído assim como satisfatória relação profundidade de investigação *versus* resolução lateral.

A normalização consiste em definir o formato lógico adequado para as estruturas de dados, com o objetivo de oferecer um mesmo intervalo de resistividade aparente para as diferentes seções levantadas, garantindo a integridade e confiabilidade das informações.

A apresentação dos dados de resistividade aparente da cavidade N4E-0022 mostrou valores com espalhamentos específicos, coerentes com a realidade de cada seção levantada. Embora acredite-se que as pequenas diferenças no espalhamento dos valores de resistividade sejam fundamentais e os efeitos da parte real não podem ser completamente ignorados, a utilização da normalização da escala, ou seja, a redistribuição dos valores de resistividade aparente para o mesmo *range* de resistividades aparentes para todas as seções próximas, tem atendido às expectativas das análises geofísicas. Dessa forma, todas as seções pertencentes à cavidade N4E-0022 foram normalizadas para uma mesma escala cromática de resistividade aparente, considerando os valores extremos (máximos e mínimos) encontrados em todas as seções (resistividade aparente mais alta e resistividade aparente mais baixa).

Convencionou-se, portanto, a seguinte representação para a escala cromática de resistividades aparentes nas seções e modelos apresentados nesta dissertação: tonalidades quentes (vermelho) serão associadas a materiais de maior resistividade e tonalidades frias (azul) representarão materiais de maior condutividade (Figura 5.7).

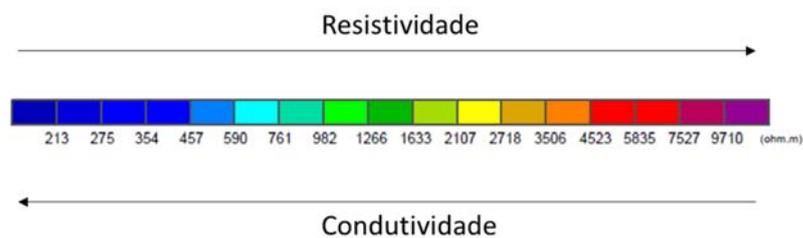


Figura 5.7 - Escala cromática (*range*) de resistividade aparente.

A Figura 5.8, a seguir, apresenta a localização das seções de CE pertencentes à cavidade N4E-0022.

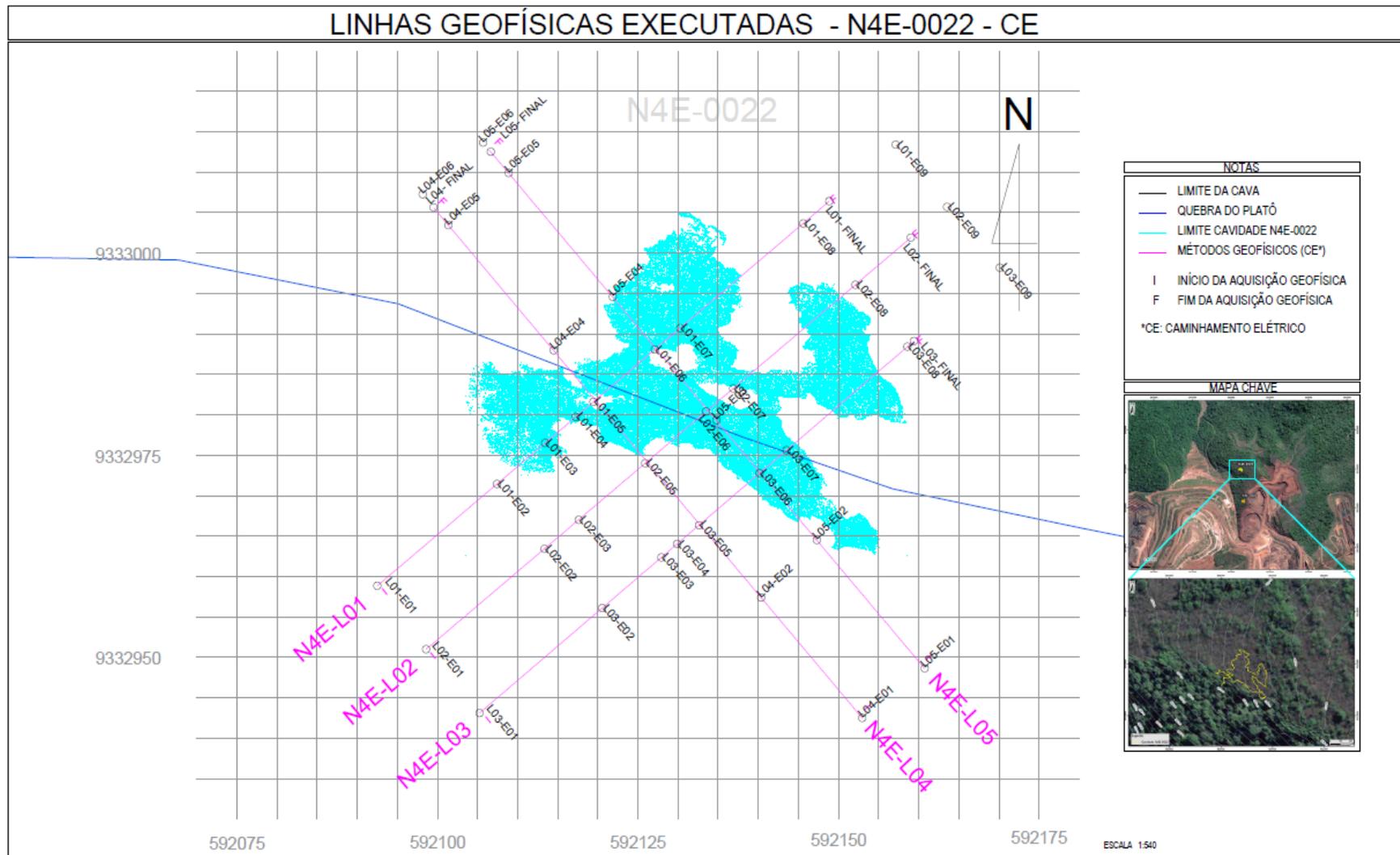


Figura 5.8 - Localização das seções de CE na cavidade N4E-0022.

5.3. GROUND PENETRATING RADAR (GPR)

Para as aquisições de dados geofísicos com utilização do *Ground Penetrating Radar* (GPR), foram utilizados como referência os dados obtidos no ano de 2014. Tais dados foram realizados em outras cavidades ferríferas do Complexo Carajás (N4E-0026 e N4E-0086) e tiveram como objetivo principal o teste de aplicabilidade do método eletromagnético. O banco de dados contendo os perfis anteriormente adquiridos, com antenas de frequências 80 MHz, 100 MHz, 200 MHz e 400 MHz, serviram como premissa e embasamento técnico para a correta definição das frequências centrais que nortearam este trabalho, a partir da análise dos dados que melhor apresentaram correspondência à realidade local. Tais seções também auxiliaram na definição adequada dos parâmetros intrínsecos à aquisição de forma a corroborar para um melhor imageamento e, conseqüentemente, interpretação dos dados geofísicos.

Para as aquisições geofísicas utilizadas nesta dissertação, foram utilizados os equipamentos SIR3000 da fabricante americana GSSI (*Geophysical Survey Systems Inc.*), com antena de frequência central de 80 MHz (MLF – *Multi Low Frequency*), em modo estático (passo a passo); e o equipamento PulseEKKO Pro da fabricante canadense *Sensor & Software Inc.*, com antena de frequência central de 250 MHz, modo contínuo/dinâmico (Figura 5.9). A antena de 80 MHz foi mantida de aquisições pretéritas por ter proporcionado satisfatório imageamento da subsuperfície e a antena de 250 MHz configurou-se como tentativa de uma melhor resolução, intermediárias entre as antenas de 200 MHz e 400 MHz.



Figura 5.9 - Operação do método GPR em campo, cavidade N4E-0022. (A): Equipamento PulseEKKO Pro com antena de 250 MHz; (B): Equipamento SIR3000 com antena MLF de 80 MHz.

A Tabela 5.3 apresenta, de modo detalhado, os quantitativos executados (comprimento horizontal) para cada perfil de GPR executado. As principais informações de aquisição e processamento encontram-se na Tabela 5.4.

Tabela 5.3 - Inventário das aquisições de GPR.

Cavidade	Nome da Linha	Comprimento (m)	
		SIR3000 (Antena 80 MHz)	PulseEKKO Pro (Antena 250 MHz)
N4E-0022	GPR-N22E-01	87.03	87.01
	GPR-N22E-02	80.70	80.70
	GPR-N22E-03	88.08	88.08
	GPR-N22E-04	80.49	80.55
	GPR-N22E-05	70.17	70.17

Os perfis estão apresentados em profundidade e a conversão tempo/profundidade está baseada na velocidade 0,07 (PulseEKKO Pro e SIR3000) metros por nano segundos (m/ns), obtidos a partir da análise de feições hiperbólicas encontradas no dado bruto (adaptação hiperbólica realizada no *software* ReflexW). As profundidades dos dados levantados nas investigações de GPR da cavidade N4E-0022 atingiram valores de até 8 metros para as seções levantadas com antena de 250 MHz (PulseEKKO Pro) e 22 metros para os perfis adquiridos com antena de 80 MHz (SIR3000).

Os *softwares* utilizados para o processamento, interpretação e apresentação dos dados de GPR são descritos abaixo:

- Processamento de dados eletromagnéticos (GPR): ReflexW (Sandmeier);
- Obtenção de mapas aéreos: *Google Earth* (Google);
- Interpretação, tratamento de imagens e montagens: Seisvision (LandMark), AutoCAD, CorelDraw, Photoshop, Leapfrog Geo ®.

As reflexões registradas durante a aquisição de dados de GPR apresentam, comumente, perturbações no sinal conhecidas como ruído, reverberações ou interferências. Tais ruídos podem, certamente, dificultar e/ou mascarar as interpretações dos dados contidos nos radargramas. Desta forma, a etapa de análise da qualidade dos dados e processamento faz-se importante, tanto para eliminar/reduzir as perturbações presentes no sinal quanto amplificar partes do sinal que possam conter reflexões relevantes.

Tabela 5.4 - Informações das aquisições de GPR na cavidade N4E-0022.

Método GPR - Cavidade N4E-0022			
Parâmetros/Equipamento	Características		Descrição
Equipamento	PulseEKKO Pro	SIR3000	-
Fabricante	Sensor & Software	GSSI	-
Antena	250 MHz	MLF (80 MHz)	Antena de média a baixa frequência, indicada para localização de vazios e interferências subterrâneas em geral.
Blindagem	Sim	Não	Impede que sinais eletromagnéticos externos interfiram no sinal.
Taxa/Frequência de Amostragem (ns)	0.39	0.98	Indica o intervalo de tempo em que serão realizadas leituras das amostras para formação do traço de GPR. Este parâmetro é dependente da frequência central da antena utilizada.
Amostras	512	512	Indica a quantidade de amostras (leituras) que constituirão cada traço do perfil de GPR. Resolução vertical.
Janela de Tempo (ns)	200	500	Indica o tempo total de duração de cada traço. Este parâmetro, que é um fruto dos dois anteriores, está ligado à profundidade em que o sinal poderá chegar.
Intervalo entre Traços (m)	0.10	0.10	Indica a distância entre cada traço que forma o perfil de GPR.
<i>Stacks</i>	16	16	Indica o empilhamento utilizado, ou seja, quantas vezes o mesmo ponto vai ser lido para então ser extraída a sua média. Serve para eliminação de ruídos (aleatórios).
Modo de Operação	Contínuo	Estático	Modo como os traços são acionados.
Arranjo das Antenas	PR-BD	PR-BD	Maneira como as antenas são orientadas em relação ao perfil.
Espaçamento entre Antenas (m)	0.40 (fixo)	1.00	Espaçamento entre as antenas Transmissora (TX) e Receptora (RX).

Os principais filtros utilizados para o processamento básico dos dados geofísicos adquiridos podem ser assim sumarizados:

- Ajuste de tempo zero. O tempo zero representa o tempo de chegada da primeira onda da reflexão da interface ar/solo, assinalando a localização da superfície do terreno. A correção de tempo zero permite ajustar o início do dado de GPR de forma que corresponda ao instante de tempo zero;
- Aplicação de filtros 1D (Passa Banda com dependência do tempo, por exemplo). O principal objetivo dos filtros aplicados é o melhoramento da qualidade visual dos dados de GPR, por exemplo, na remoção de picos de alta frequência provenientes de transmissões de rádio (OLHOEFT, 2000). É também útil na extração de aspectos particulares contidos nos dados, tais como reflexões de superfícies planas, difrações e reverberações, de forma a permitir uma correta interpretação da informação presente nos radargramas (AGUIAR, 2005);
- Dessaturação do sinal (*Dewow*). Calcula-se a média ponderada dos valores de amplitude do sinal de radar, subtraindo, posteriormente, tal média a cada valor do traço de radar. Removem-se, portanto, as componentes de baixa frequência registradas nos dados (GONÇALVES, 2013);
- Aplicação de Ganho. Amplificação do sinal de radar recebido, através da multiplicação dos valores das amplitudes das ondas eletromagnéticas;
- Correção estática/topográfica: Corrige os efeitos produzidos pela cartografia da superfície na qual se traça os perfis e também os efeitos causados pela variação brusca da velocidade de propagação (GONÇALVES, 2013);
- Aplicação de filtros 2D (*Remove background*, por exemplo). Tal filtro possui como principal objetivo remover ruídos de baixa frequência que, normalmente, aparecem nos perfis sob a forma de bandas horizontais contínuas e que se prolongam ao longo de todo o perfil;
- Conversão tempo/profundidade. Tal conversão é feita atribuindo uma velocidade constante a todo radargrama e calculando-se as profundidades das feições através do tempo duplo de reflexão do sinal;
- Exportação SGY. O formato SGY é padrão para dados desta natureza e permite o carregamento do mesmo em diversos outros *softwares*.

Existem diversas formas de apresentação dos dados GPR. Normalmente, são empregados os códigos de cores que apresentam os refletores com diferentes paletas cromáticas e a *wiggle trace*, que evidencia a amplitude do sinal em função do tempo (PORSANI, 2002). A mudança da escala da cor de visualização das reflexões pode ser uma alternativa satisfatória para a interpretação. Determinadas feições geológicas podem estar melhor explícitas e/ou melhor evidentes, por exemplo, na escala de cinza. Tal procedimento depende da subjetividade do intérprete, porém, a integração de informações é a melhor alternativa para uma interpretação mais coerente.

As Figuras 5.10 e 5.11 apresentam as localizações das seções de GPR (PulseEKKO Pro e SIR3000, respectivamente) adquiridas na cavidade N4E-0022. É importante ressaltar que, em virtude do terreno exacerbadamente acidentado e impossibilidades operacionais, as seções de GPR tiveram suas aquisições de dados interrompidas por questões de segurança, nos trechos mais críticos, particularmente no caso de taludes muito íngremes.

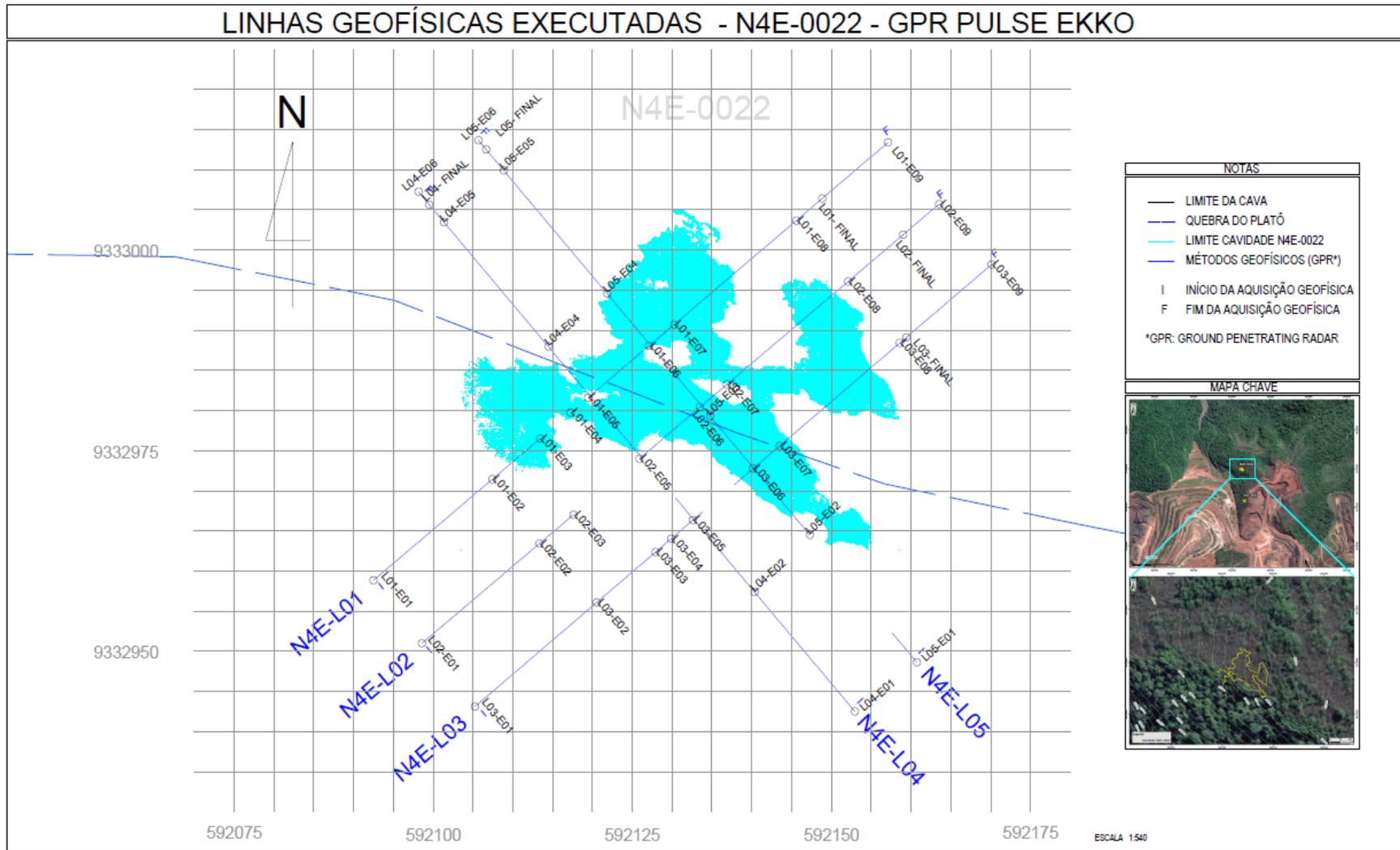


Figura 5.10 - Localização das seções de GPR (PulseEKKO Pro), demarcadas em azul, na cavidade N4E-0022.

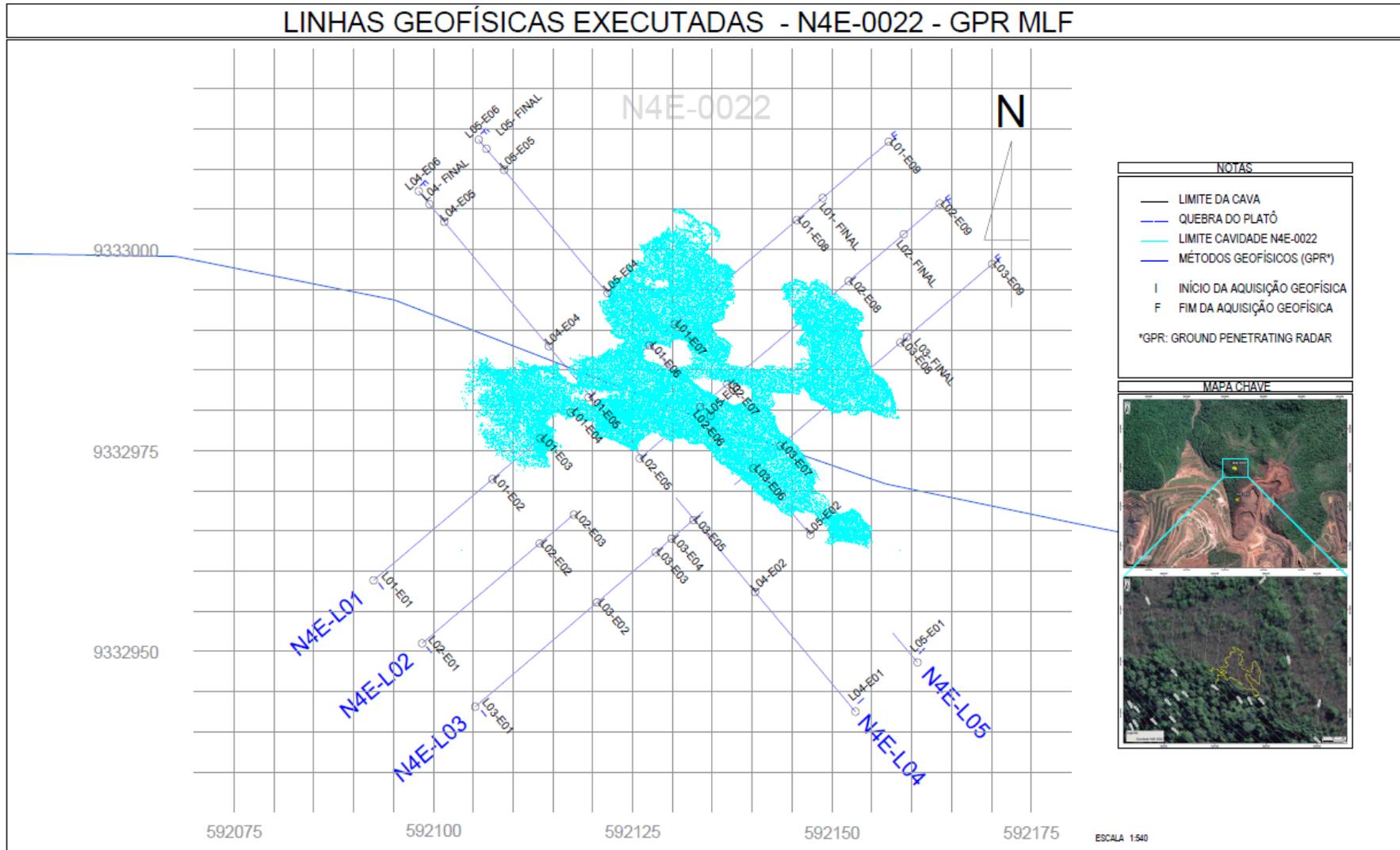


Figura 5.11 - Localização das seções de GPR (SIR3000, Antena MLF), demarcadas em azul, na cavidade N4E-0022.

6. CAVIDADE N4E-0022: APRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

6.1. ELETORRESISTIVIDADE (CAMINHAMENTO ELÉTRICO)

As análises das seções geofísicas consideraram a diferenciação dos perfis em virtude da sua magnitude em Zonas de Alta Resistividade aparente (ZAR), cujos valores encontram-se acima de 2.718 ohm.m, e Zonas de Baixa Resistividade aparente (ZBR), cujos valores estão abaixo de 760 ohm.m, aproximadamente (Figura 6.1). Valores intermediários entre os acima descritos foram associados a Zonas de Resistividade Intermediária (ZIR). Tais segmentações foram definidas por meio de Seção Controle realizada em face exposta de talude com posterior validação visual entre as assinaturas geofísicas e o perfil laterítico existente, assim como correlações bibliográficas conhecidas na literatura geofísica.

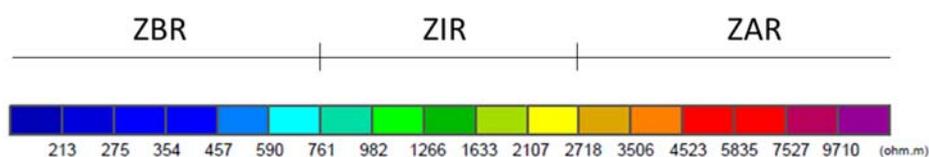


Figura 6.1 - Escala cromática com a segmentação em ZBR (Zonas de Baixa Resistividade aparente), ZIR (Zonas de Resistividade aparente Intermediárias) e ZAR (Zonas de Alta Resistividade aparente).

As seções adquiridas CE-N22E-L01 a CE-N22E-L05 encontram-se na porção superior ao teto da cavidade N4E-0022 e espaçadas de 10 metros entre si (Figura 5.8). Tais perfis mostraram a segmentação de duas regiões claramente distintas. A primeira, com predomínio de Zonas de Alta Resistividade aparente (ZAR), ocorre essencialmente de maneira contínua nas porções superficiais dos perfis. O horizonte logo abaixo e que perfaz por grande parte da seção, é caracterizado pela redução nos valores de resistividade aparente (entre 982 ohm.m e 1.633 ohm.m) assim como anomalias resistivas e condutivas restritas e pontuais.

As regiões basais dos perfis em algumas seções (como CE-N22E-L03 a CE-N22E-L05) apresentaram uma tendência de crescimento nos valores de resistividade aparente (ZAR) à medida que o imageamento avançou em maiores profundidades (Figura 6.2). Em algumas seções, tal tendência resistiva não foi observada em virtude da restrição da profundidade alcançada pelo método.

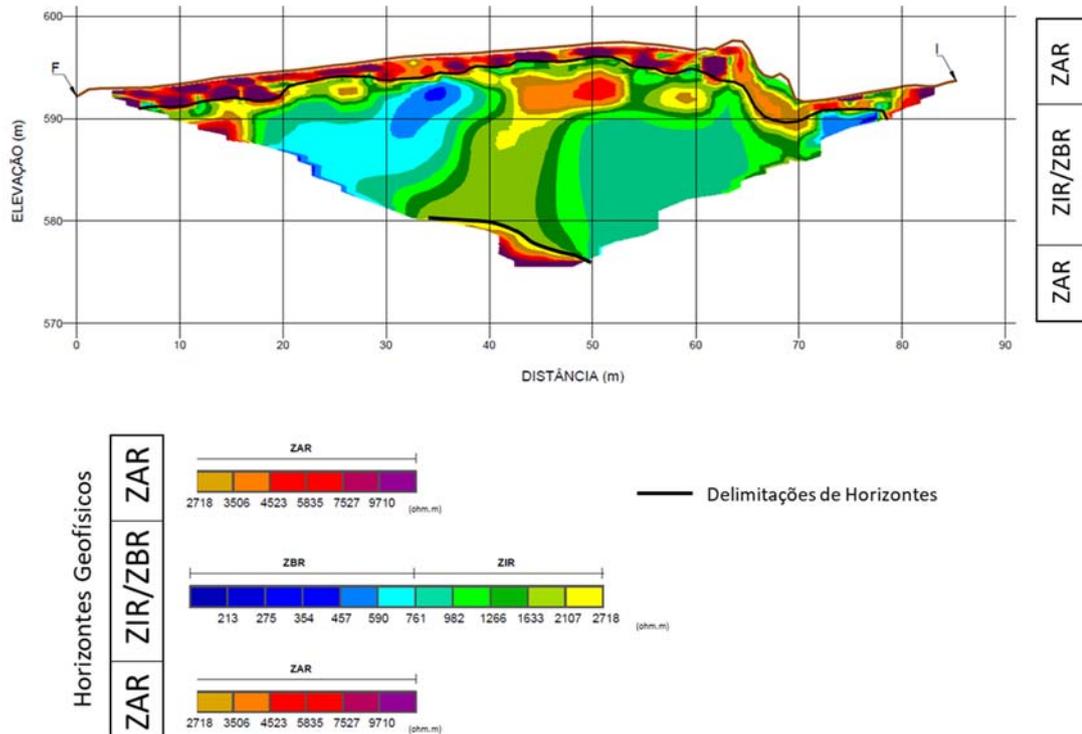


Figura 6.2 - Seção CE-N22E-L05 com destaque para zonas geofísicas interpretadas a partir da magnitude dos valores de resistividade aparente em: Zonas de Alta resistividade aparente (ZAR), Zonas de Baixa Resistividade aparente (ZBR) e Zonas e Resistividade Intermediária (ZIR).

Como forma de facilitar as interpretações geofísicas realizadas pelo método da Eletrorresistividade (CE), as mesmas foram segmentadas de acordo com as seguintes aplicações:

- Definição do Perfil de Laterização;
- Caracterização e Detalhamento do Horizonte de Transição;
- Análise de Instabilizações de Teto; e
- Avaliação da Resistência à Compressão Uniaxial.

6.1.1. Definição do Perfil de Laterização

Os dados gerados pelo método geofísico da Eletrorresistividade, aliados a dados litotectônicos de documentos cedidos pela Vale S.A., forneceram informações acerca dos diferentes tipos de materiais constituintes do perfil de intemperismo de rochas ferríferas, e que, nesta pesquisa, estão em concordância com os horizontes descritos por Gonçalves *et al.* (2016).

O horizonte que ocorre na superfície do terreno, denominado Costa Laterítica, é caracterizado por zonas altamente resistivas (acima de 2.718 ohm.m) nos dados geoeletricos que acabam por configurar uma superfície relativamente contínua em subsuperfície (1 a 3 metros de espessura). As altas resistividades estão relacionadas ao processo de laterização de rochas, cuja alta rugosidade está intimamente associada à macroporosidade resultante de sua gênese. Tais materiais, conhecidos genericamente como canga, apresentam o encouraçamento e cimentação ocasionados pela precipitação de ferro, o que dificulta a penetração de água no sistema pelos poros, pouco conectados. Desta forma, possuem uma quantidade significativa de ar preenchendo os vazios, culminando em uma resposta geofísica de altos valores de resistividade aparente.

O horizonte logo abaixo, com profundidades nas seções que podem chegar a até 19 metros, é caracterizado pela redução dos valores de resistividade aparente (entre 760 e 2.718 ohm.m) e pode estar relacionado à zona vadosa. Tal horizonte é caracterizado pela maior probabilidade para a ocorrência e desenvolvimento de cavidades em virtude da progressiva dissolução da matriz argilosa do manto saprolítico, porção superior das rochas saprolíticas de formação ferrífera e/ou rochas máficas, com essas últimas, predominantemente, caulínicas. A alumina remanescente evolui para um produto gibbítico poroso e friável, altamente susceptível a processos intempéricos. A predominância de sedimento argiloso, o piso pouco inclinado e a ausência de saídas de

escoamento da cavidade são responsáveis pelo acúmulo de água e umidade, principalmente pela presença de textura mais porosa e cavernosa. Tais fatos acabam por gerar um horizonte caracterizado pela redução nos valores de resistividades aparentes e que pode correlacionar-se ao Horizonte de Transição de menor densidade associada.

O horizonte basal, denominado Saprolito, é caracterizado pelo retorno de Zonas de Alta Resistividade aparente (ZAR) e presente em algumas seções, podendo ser correlacionado à transição saprolito → formação ferrífera bandada, com a crescente tendência de preservação da rocha em profundidade. Tal fato acaba por proporcionar valores de resistividades aparentes progressivamente maiores e com influência da porosidade secundária das rochas (e.g. fraturas cada vez mais apertadas, em profundidade).

Deste modo, foram segmentados os horizontes geofísicos em função das assinaturas geoeletricas interpretadas para todas as seções adquiridas. As Figuras 6.3 a 6.7 apresentam a diferenciação dos horizontes geofísicos interpretados e a correlação gráfica com o perfil de laterização relacionado à região.

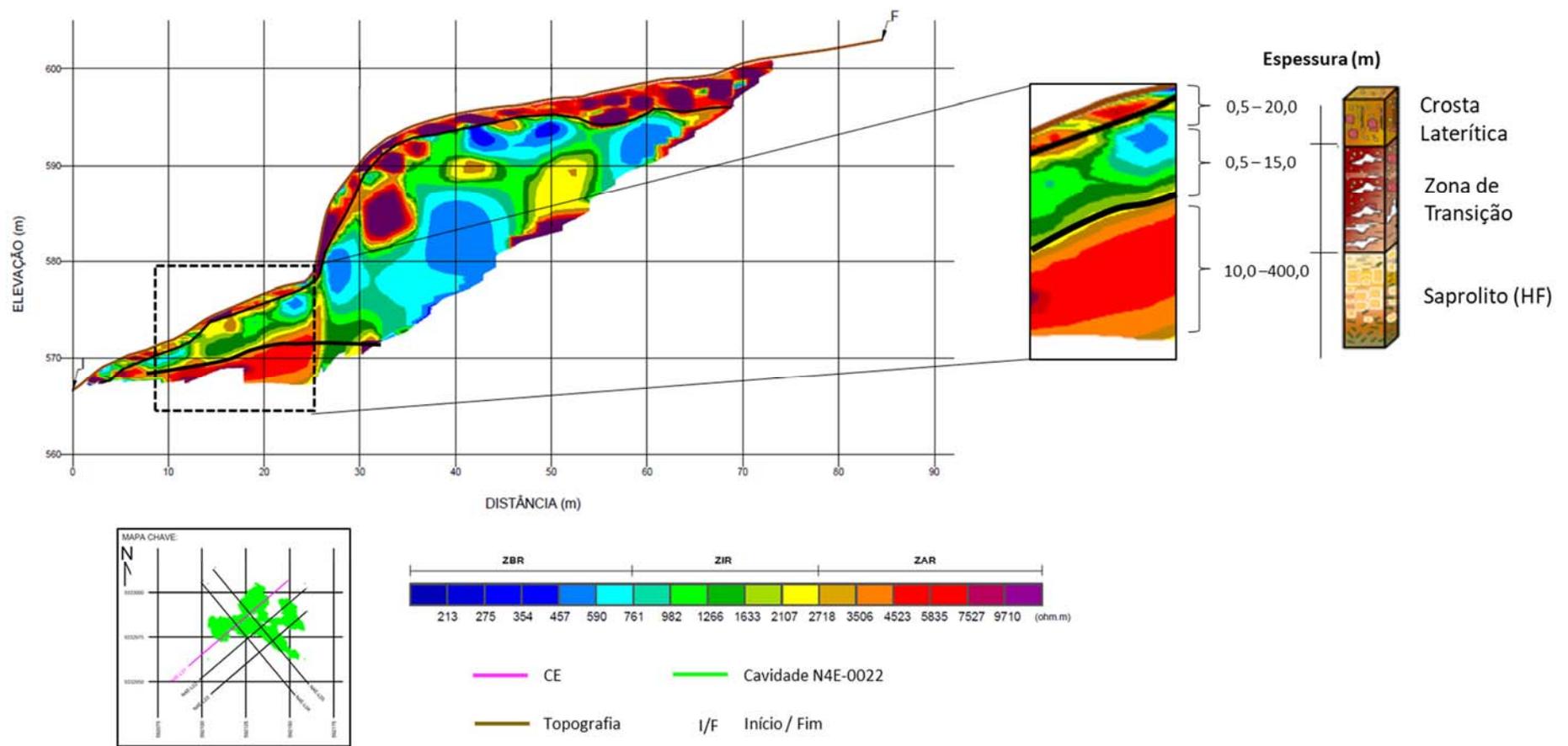


Figura 6.3 - Assinaturas geolétricas (CE-N22E-L01) e perfil de laterização na cavidade N4E-0022.

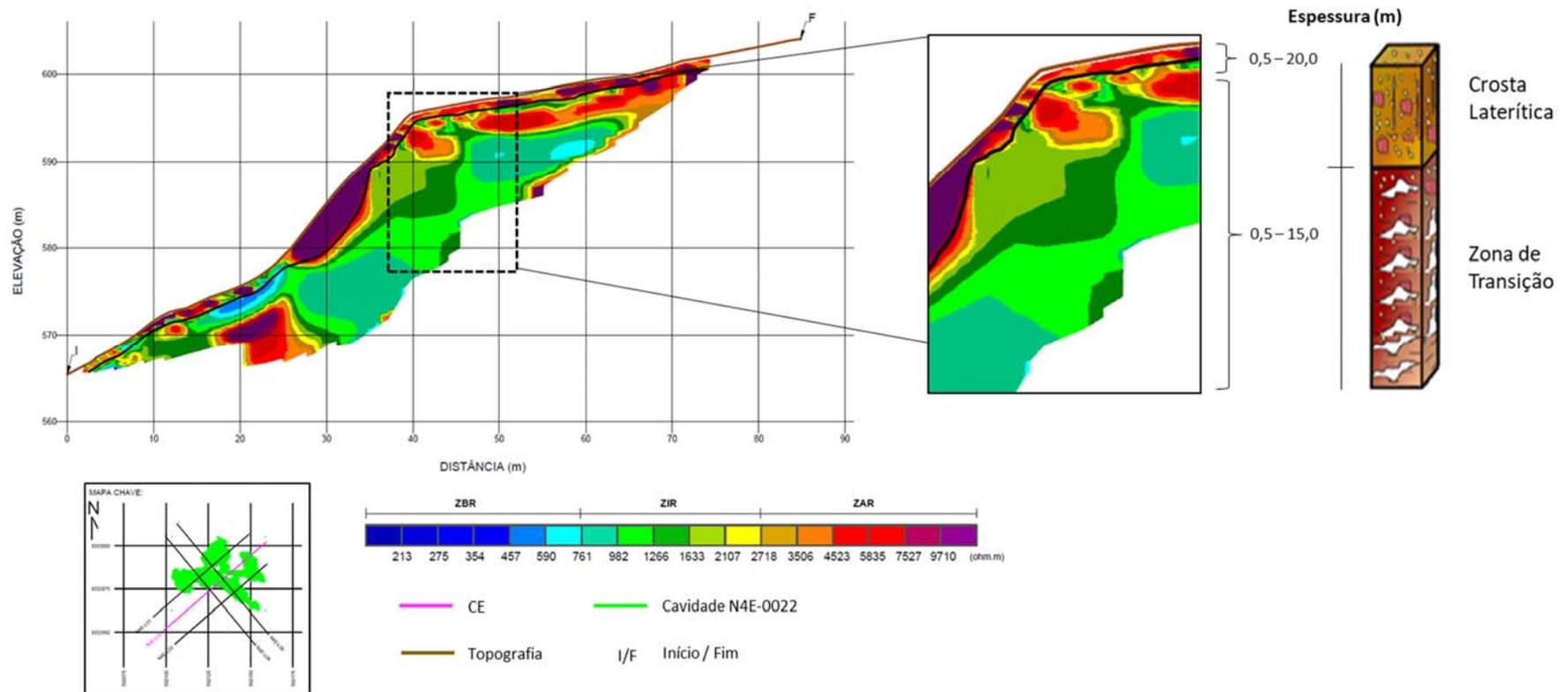


Figura 6.4 - Assinaturas geolétricas (CE-N22E-L02) e perfil de laterização na cavidade N4E-0022.

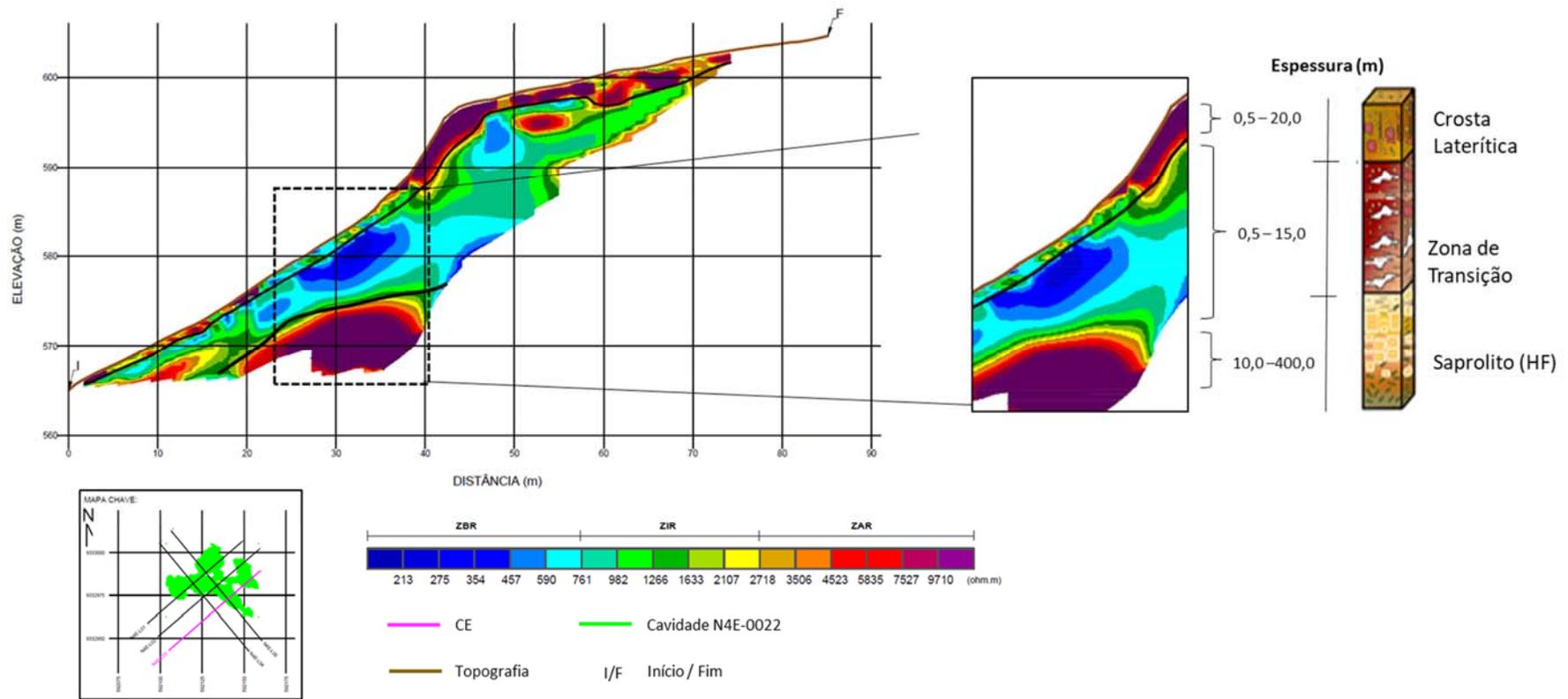


Figura 6.5 - Assinaturas geolétricas (CE-N22E-L03) e perfil de laterização na cavidade N4E-0022.

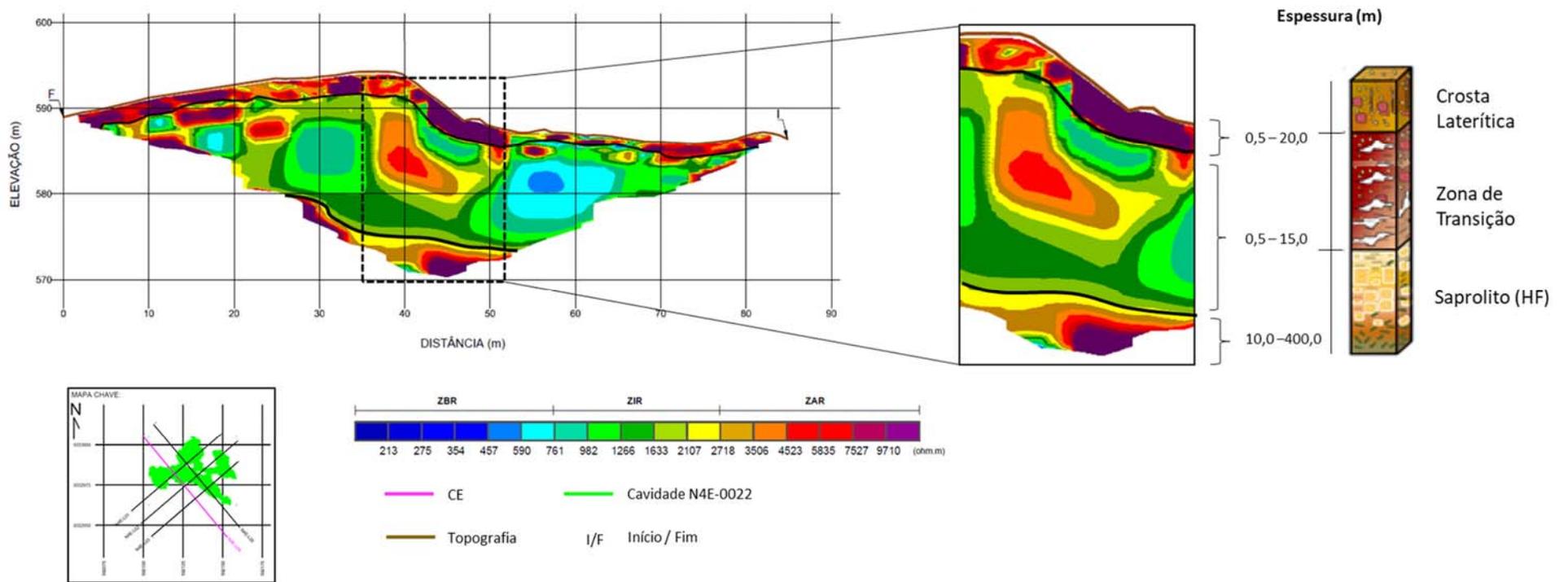


Figura 6.6 - Assinaturas geolétricas (CE-N22E-L04) e perfil de laterização na cavidade N4E-0022.

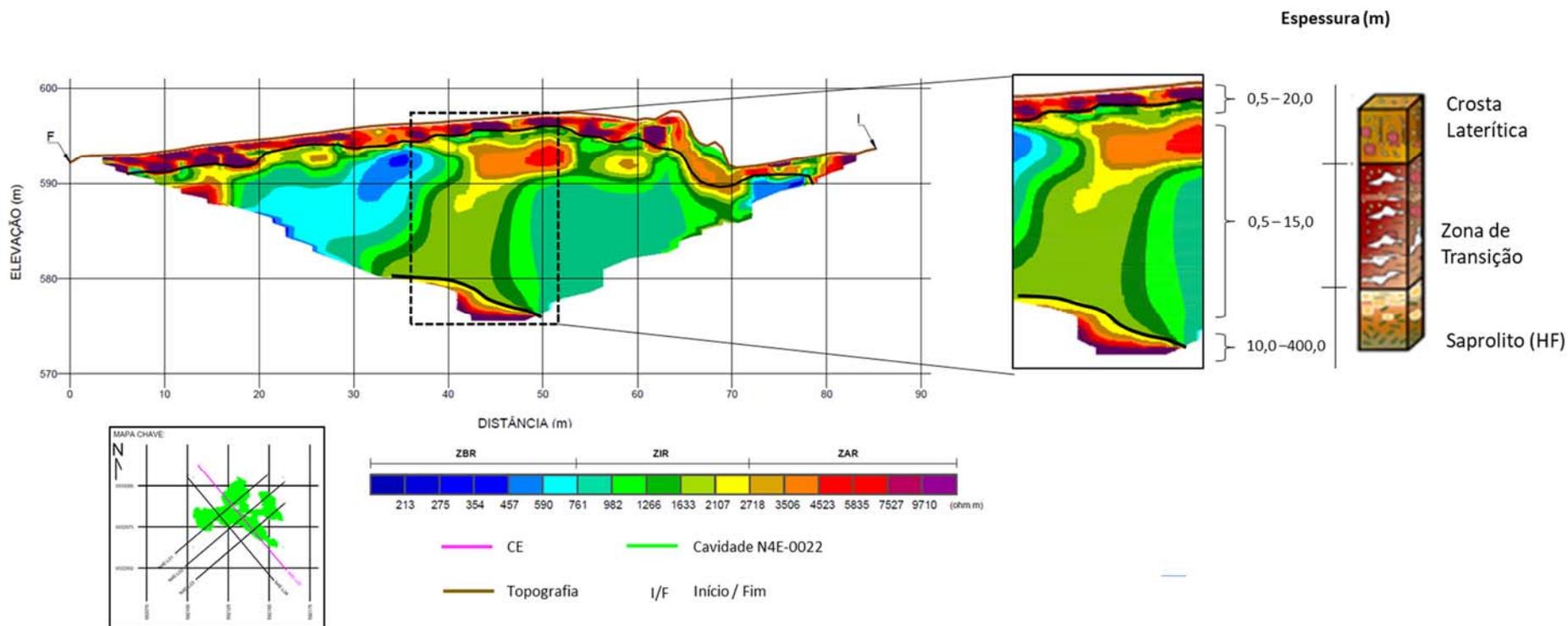


Figura 6.7 - Assinaturas geolétricas (CE-N22E-L05) e perfil de laterização na cavidade N4E-0022.

Após a análise e interpretação das seções geofísicas 2D, as mesmas foram inseridas em *software* de modelamento específico (Leapfrog Geo ®). Tal *software* permite a visualização tridimensional (Figura 6.8A) das seções obtidas assim como a construção de blocos diagramas condizentes com o perfil de laterização da região, a partir de uma série de procedimentos. As etapas, a seguir, resumizam a modelagem numérica desenvolvida:

- Inicialmente, os contatos entre os horizontes geofísicos demarcados explicitamente nas seções 2D de Eletrorresistividade (CE) foram importados para o *software* (Figura 6.8B);
- A partir dos contatos (superior e inferior) estabelecidos graficamente, superfícies foram modeladas, tanto para a separação inferior Zona de Transição – Saprolito (Figura 6.8C) quanto para a separação superior Canga – Zona de Transição (Figura 6.8D);
- Em seguida, modelos dinâmicos referentes ao Saprolito (Figura 6.8E), Zona de Transição (Figura 6.8F) e Crosta Laterítica (Figura 6.8G) foram gerados, individualmente, através de interpoladores específicos que utilizam uma função de base radial para a modelagem;
- O resultado modelado pelo *software* (Figura 6.8H) traduz, de forma esquemática, a satisfatória aproximação com a realidade local e com os modelos propostos para o perfil de laterização da região.

Os diagramas de blocos construídos a partir da modelagem numérica dos dados geoeletricos foram consistentes com o Perfil Laterítico típico da região. As aproximações podem ser confirmadas com dados representados pelas sondagens rotativas contendo informação de perfilagem geofísica e as descrições lito-estruturais dos horizontes intempéricos mapeados em bancada de lavra nas proximidades da cavidade N4E-0022. As correlações realizadas entre dados diretos e indiretos (seções geoeletricas) foram congruentes para os horizontes interpretados. Como forma de exemplificar a maneira como as correlações realizadas foram procedidas, o furo de sonda SN4-FD00071 foi selecionado a título didático (Figura 6.9).

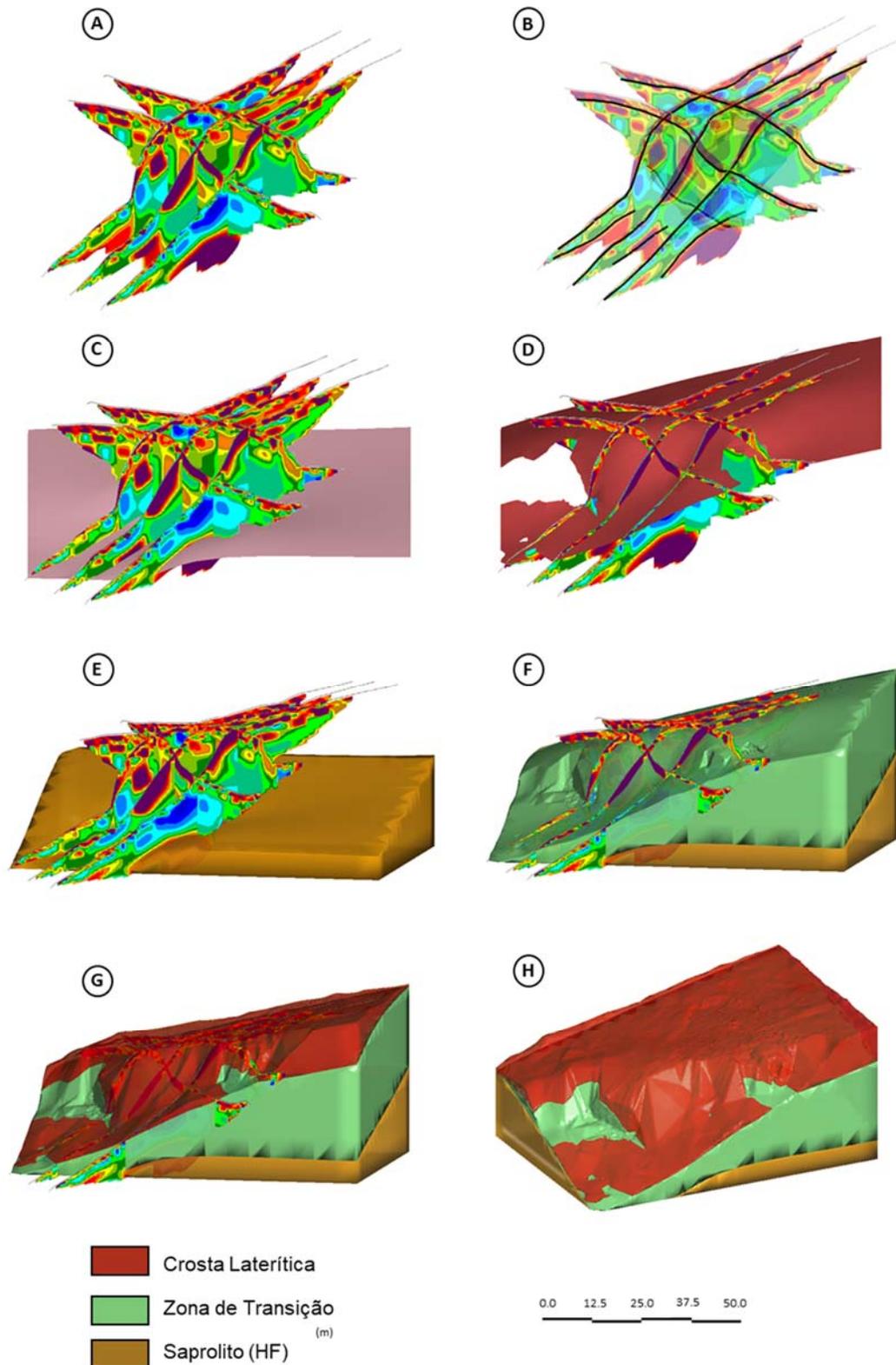


Figura 6.8 - Processo de modelamento implícito dos dados geoeletricos adquiridos na cavidade N4E-0022. (A): Seções elétricas 2D; (B): Delimitação explícita dos contatos geofísicos coincidente com os horizontes lateríticos; (C): Modelamento da superfície inferior referente ao contato Zona de Transição – Saprolito; (D): Modelamento da superfície superior referente ao contato Canga – Zona de Transição; (E): Modelo referente ao Saprolito (HF); (F): Modelo referente à Zona de Transição; (G): Modelo referente à Crosta Laterítica; (H): Modelo implícito para o perfil de laterização da região de N4E-0022 a partir de dados geofísicos.

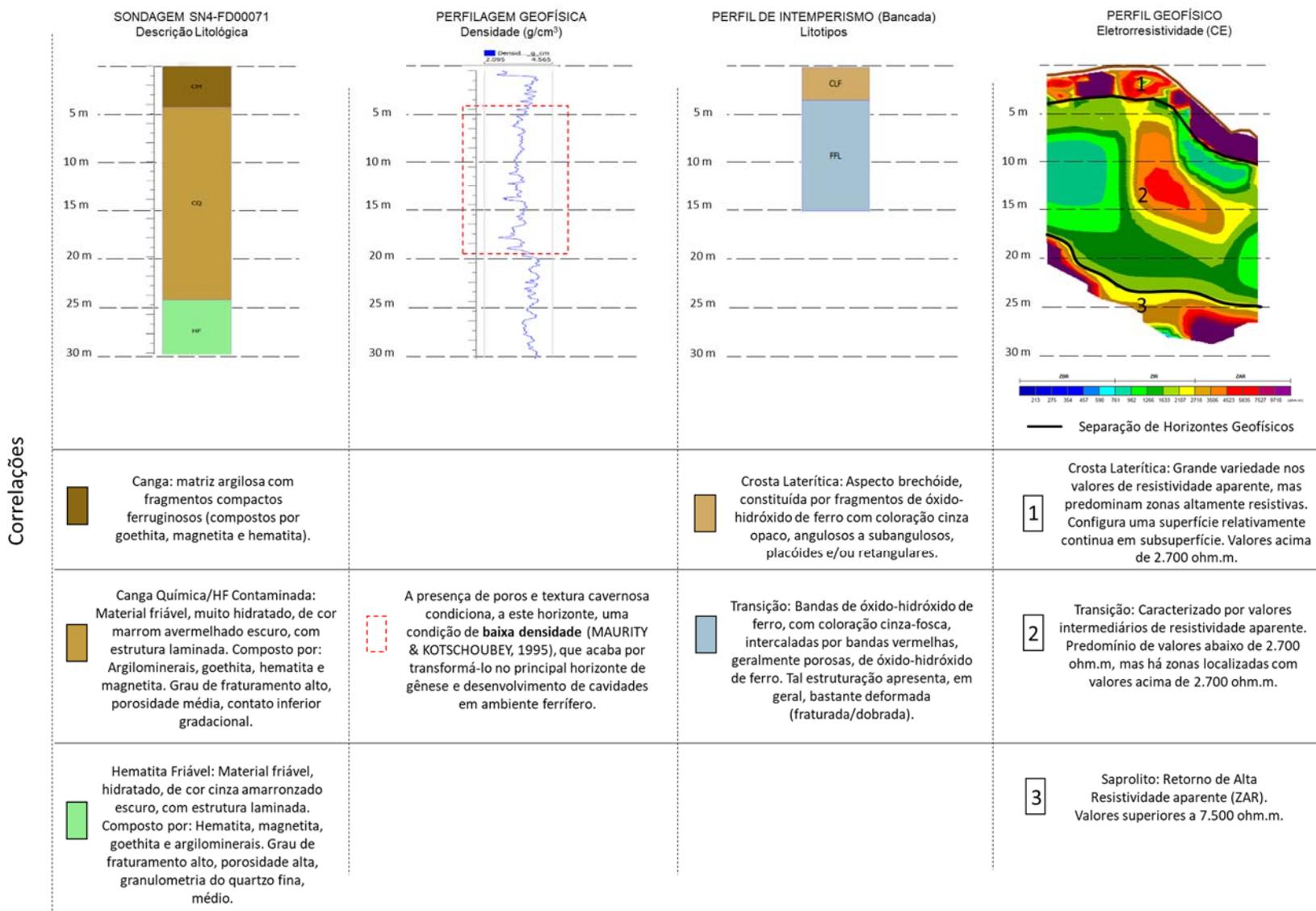


Figura 6.9 - Correlações entre dados diretos (sondagem rotativa, perfilagem gama-gama/densidade, perfil de intemperismo) e assinaturas geofísicas. O perfil de intemperismo mostra as espessuras médias obtidas no mapeamento de detalhe em bancada.

O Horizonte Superior, identificado pelo mapeamento detalhado em bancada próximo à cavidade N4E-0022, denominado de Crosta Laterítica, mostrou compatibilidade com a faixa representada pelo aumento nos valores de densidade (variando de 3,2 a 3,9 e média de 3,6) dos dados de perfilagem geofísica gama-gama. Esse horizonte também apresentou correspondência com o perfil geoeletrico, que definiu um horizonte contínuo na parte superior com altas zonas de resistividade aparente. Já as descrições litológicas do furo de sondagem definiram tal camada superior como sendo canga, caracterizada pela presença de rocha compacta (goethita, magnetita e hematita), refletindo os valores de alta densidade observados nos dados de perfilagem.

O Horizonte de Transição, identificado no mapeamento detalhado de bancada próximo à cavidade, também apresentou similaridade com os dados de perfilagem geofísica, que identificou redução nos valores de densidade (variando de 2,6 a 3,6 e média de 3,3) nas faixas correspondentes a tal horizonte. Segundo Maurity & Kotschoubey (1995), os poros e a textura cavernosa conferem a esse horizonte uma condição particular de baixa densidade, que favorece o desenvolvimento de cavidades ferríferas. Esse horizonte também está relacionado ao perfil geoeletrico, caracterizado pela redução nos valores de resistividade aparente. As descrições litológicas do furo de sondagem definiram tal camada intermediária como sendo canga química e hematita friável contaminada. A presença de diferentes propriedades características tanto de material laterítico quanto de material saprolítico (material hidratado, argila, porosidade e minerais como hematita, magnetita e goethita) confirmam o caráter transicional desse horizonte.

O Horizonte Saprolítico, localizado na porção basal da seção geoeletrica, apresentou seu contato superior em consonância com o a perfilagem geofísica, caracterizada pelo retorno de altos valores de densidade após 20 metros de profundidade (variando de 2,9 a 4,1 e média de 3,8). A presença de características originárias da rocha (como, por exemplo, estrutura laminada) confirma a interpretação do perfil geoeletrico, que evidenciou zonas de alta resistividade aparente características de material mais preservada. Vale ressaltar que esse horizonte apresentou razoável diferença com a correspondente faixa de profundidade no furo de sondagem (hematita friável). Tal divergência pode estar associada ao caráter descritivo do furo de sondagem, enquanto a perfilagem geofísica,

como uma medida coletada *in situ*, apresenta melhor correspondência com os contatos litológicos existentes e, conseqüentemente, com a realidade local.

6.1.2. Caracterização e Detalhamento do Horizonte de Transição

Cavidades podem estar parcialmente ou completamente preenchidas por ar ou água. Dependendo da composição química da água, pode-se ter um *range* de resistividades aparentes desde muito condutivas até relativamente resistivas, em comparação à rocha hospedeira (CHALIKAKIS *et al.* 2011).

A presença de salões de tamanhos consideráveis e possibilidade de acesso interno para estudos e pesquisas corroboraram para a expectativa de uma resposta geolétrica resistiva para a cavidade em estudo. Dessa forma, o modelamento direto para simulação da existência de uma cavidade com preenchimento por ar foi realizado através do *software* RES2DMOD (Figura 6.10). O valor extremamente elevado considerado para a resistividade aparente do ar reflete a característica resistiva do mesmo.

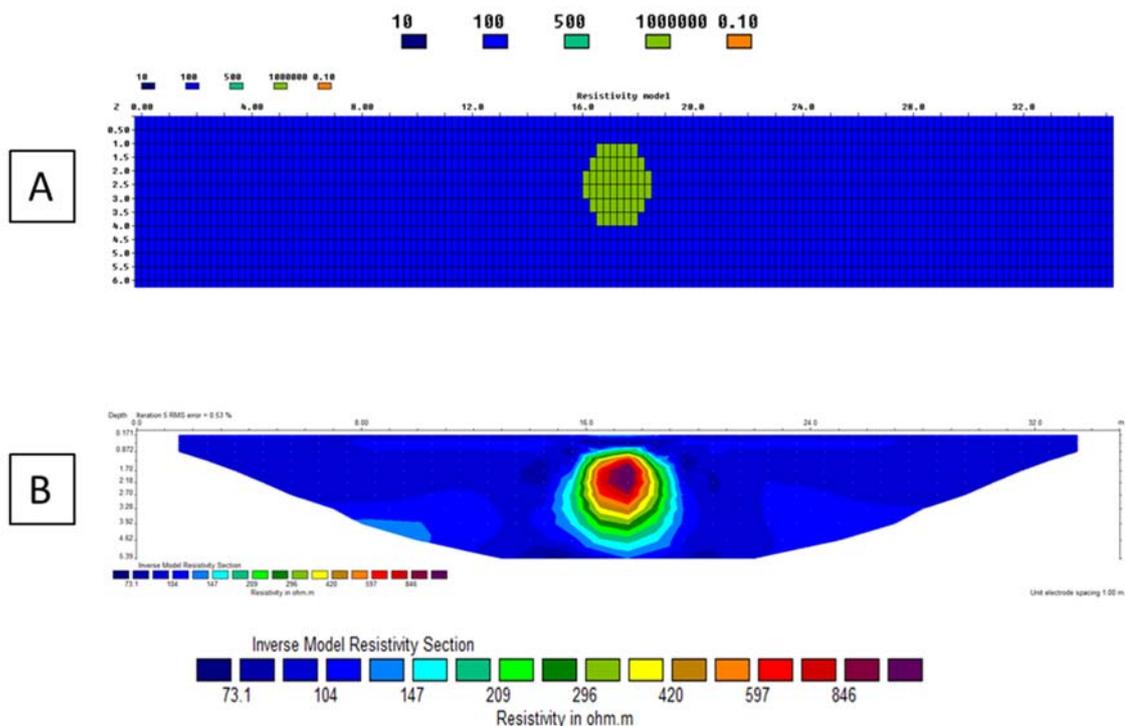


Figura 6.10 – (A): Modelamento direto para simulação de cavidade preenchida por ar; (B): Seção Invertida do Modelamento Direto (Neogeo Geotecnologia LTDA.).

Algumas seções geofísicas apresentaram a resposta geolétrica conforme elucidada pela modelamento direto realizado. No entanto, algumas outras, apresentaram uma resposta menos resistiva do que o esperado. Dessa forma, surgiu a necessidade de se realizar uma retroanálise dos dados considerando um modelamento direto com a existência de uma fina camada condutiva no entorno de uma cavidade preenchida por ar. Tal contexto representa uma situação hipotética possível e que pode interferir no modelamento geofísico realizado pelo *software* RES2DMOD. É natural que, nas paredes de cavidades subterrâneas, ocorra uma fina camada de água com minerais de argila assim como umidade existente no solo (CHALIKAKIS *et al.* 2011). Geralmente, essa fina camada, localizada no teto e paredes das cavidades apresenta condutividade elétrica mais alta que as áreas no entorno, sendo conhecida e caracterizada pela textura *spongework* (esponjosa), definida por Palmer (2009). A Figura 6.11, apresenta o modelo direto elaborado também pelo *software* RES2DMOD para a simulação da existência de uma cavidade com preenchimento por ar e presença de camada condutiva adjacente.

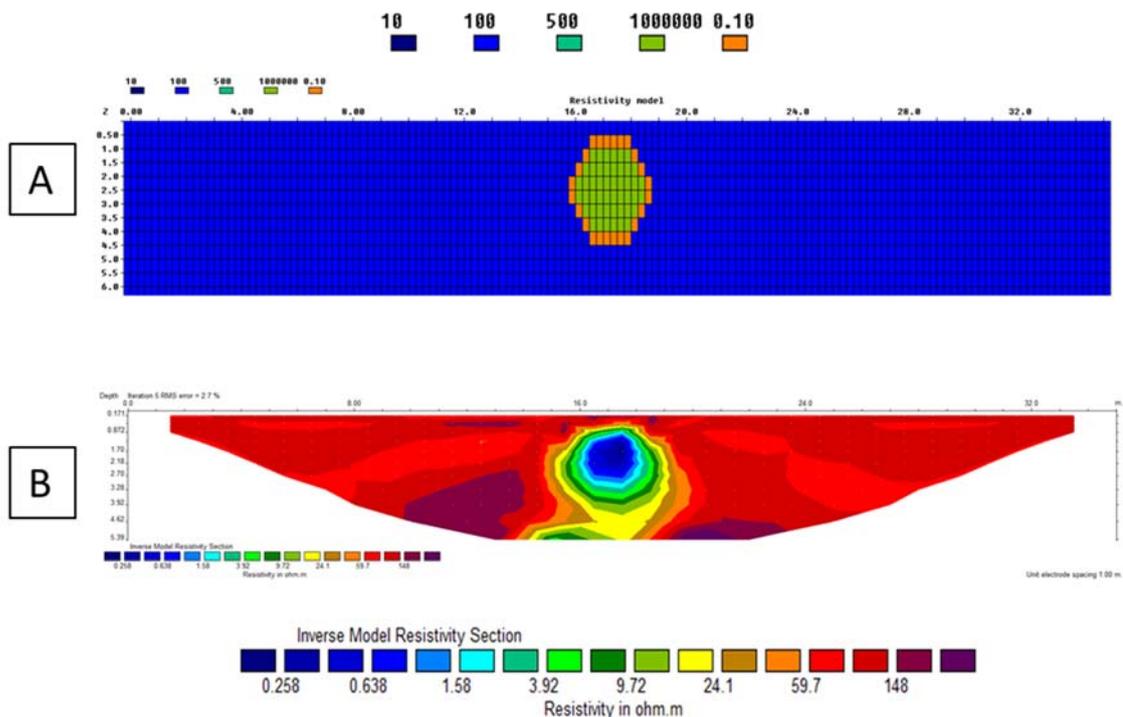


Figura 6.11 – (A): Modelamento direto para simulação de cavidade preenchida por ar e presença de camada condutiva subjacente; (B): Seção Invertida do Modelamento Direto (Neogeo Geotecnologia LTDA.).

Nesse caso, a fina camada mais condutiva acaba por gerar uma deformação das linhas equipotenciais e um aumento considerável da densidade de corrente, de modo que a

corrente flua no entorno da cavidade altamente resistiva. Tal fato acarreta um efeito de menor resistividade aparente na cavidade preenchida por ar, e não altamente resistivo como o esperado.

Diante de tais informações, a cavidade N4E-0022 foi inserida no *software* de modelamento (Leapfrog Geo[®]), através da nuvem de pontos coletada por *Laser Scan*, juntamente com as seções geofísicas de Eletrorresistividade (CE) adquiridas, conforme Figura 6.12. A análise tridimensional permitiu verificar a presença do contato entre a Crosta Laterítica e o Horizonte de Transição na cavidade estudada. O horizonte transicional é caracterizado pela baixa densidade associada e maior propensão à gênese e desenvolvimento de poros.

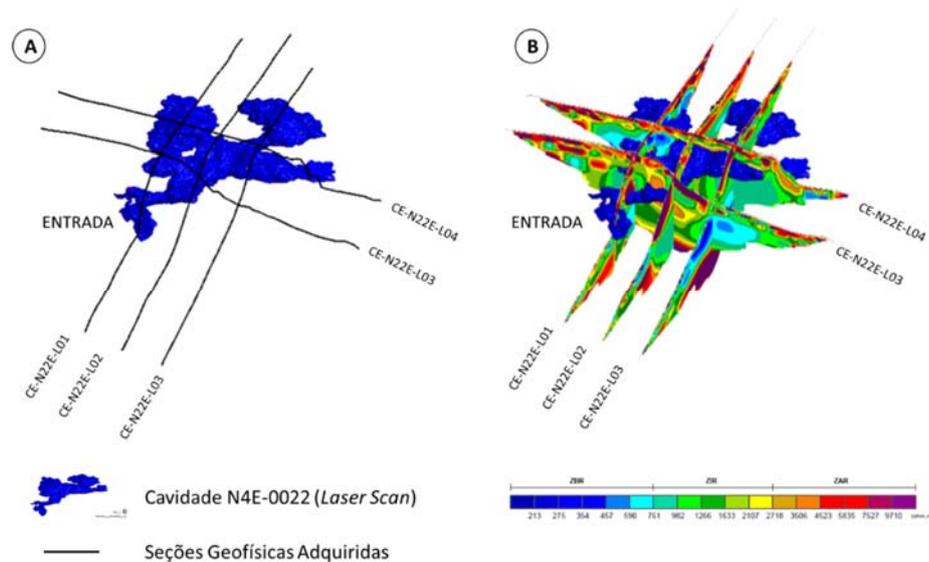


Figura 6.12 – (A): Cavidade N4E-0022 obtida por meio de *Laser Scan*; (B): Seções geoeletricas adquiridas no contexto da cavidade N4E-0022.

A análise tridimensional das seções geofísicas permitiu identificar assinaturas de Alta Resistividade aparente presentes nas regiões próximas à entrada da cavidade e que podem estar relacionadas ao preenchimento por ar e/ou baixa umidade associada (Figura 6.13A). Assim, a resposta geofísica para salões próximos à entrada de cavidades está em concordância com o modelo sintético elaborado no RES2DMOD (Figura 6.10). Tal assinatura também pode refletir a presença de litologias lateríticas com respostas altamente resistivas, fato que requer maior detalhamento na interpretação de seções geofísicas próximas a entradas de cavidades.

A assinatura geofísica coincidente com o horizonte de transição onde a cavidade está inserida torna-se progressivamente mais condutiva à medida que se afasta da abertura de acesso à cavidade (Figura 6.13B). Tal fato pode ser explicado pelo progressivo aumento de umidade no entorno da cavidade, comprovado em campo por equipamentos de medição (termohigrômetro), o que pode refletir em uma resposta mais condutiva da anomalia. As medidas de umidade no interior da cavidade, ou seja, na porção mais distal (mais distante para o interior da cavidade), tendem a aproximar-se da pressão de equilíbrio (“saturação”), ou seja, próximo aos 100%. A resposta geofísica para salões nas porções distais está em consonância, portanto, com o modelo hipotético de retroanálise que considera uma fina camada condutiva no entorno da cavidade (Figura 6.11).

A Tabela 6.1 apresenta a síntese das interpretações realizadas e as assinaturas geoeletricas obtidas como resposta a cavidades e sua condição de contorno.

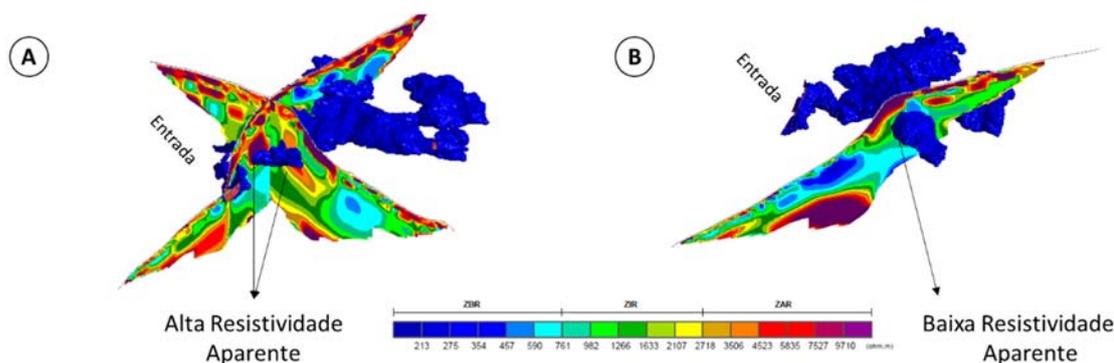


Figura 6.13 – (A): Anomalias de Alta Resistividade associadas à cavidade N4E-0022 e próximas à entrada; (B): Anomalias de Baixa Resistividade Aparente associadas à cavidade N4E-0022 e afastadas da entrada.

Tabela 6.1 - Assinaturas geoeletricas e condições de contorno da cavidade.

Posição Espeleométrica	Assinatura Geoeletrica	Medida de Termohigrômetro
Entrada (Proximal)	Alta Resistividade Aparente	84%
Maior Desenvolvimento Horizontal (Distal)	Baixa Resistividade Aparente	99%

6.1.3. Análises de Instabilização do Teto de Cavidades Ferríferas

Nas regiões localizadas imediatamente acima da cavidade N4E-0022, ou seja, no contato entre a Crosta Laterítica e o Horizonte de Transição, algumas assinaturas geoeletricas podem auxiliar na elucidação e previsibilidade de instabilizações do teto.

Tais assinaturas em contrastes elétricos, conforme elucidado por Barbosa (2018), podem ser relacionadas a alguns indicativos geotécnicos de instabilidade, como:

- **Contraste Angular** – Assinaturas geofísicas de diferentes magnitudes em contato lateral brusco podem indicar presença de descontinuidades no maciço (Figura 6.14). Tais estruturas podem estar associadas a contato entre materiais de litotipos diferentes e/ou condições geomecânicas distintas (*e.g.* pilares) assim como famílias de falhas/fraturas que acabam por discretizar blocos no maciço;

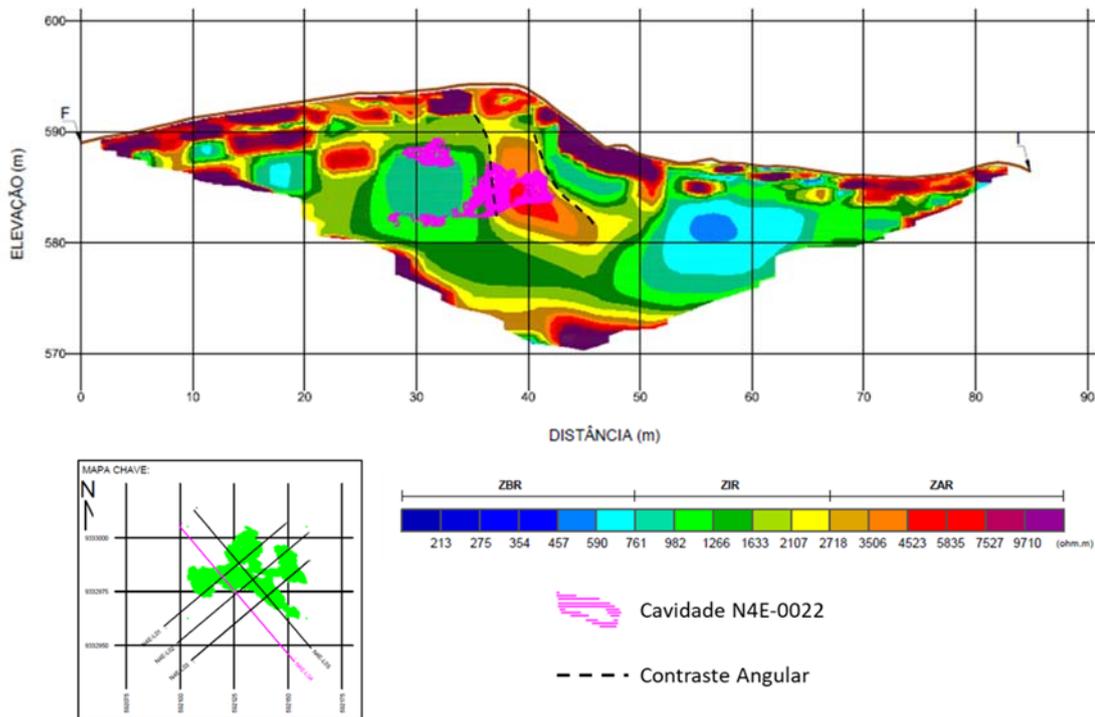


Figura 6.14 - Anomalias de Contraste Angular associadas à cavidade N4E-0022, evidenciadas por linhas pretas pontilhadas.

- **Contraste Baixo Resistivo** – Porções caracterizadas por baixa resistividade aparente (< 800 ohm.m) e localizadas no teto da cavidade podem indicar presença de umidade e/ou água assim como material alterado/intemperizado, cujo processo

de intemperismo acaba por tornar o meio menos resistivo (Figura 6.15). Sabe-se que a água é um importante agente desestabilizador das cavidades, tanto por meio de gotejamentos (capaz de alterar o material rochoso e carrear fragmentos) quanto por erosão das paredes de descontinuidades. Algumas anomalias com valores intermediários e que se localizam na porção do teto da cavidade também podem estar associadas a materiais menos alterados, úmidos e influenciados por algum fluxo hídrico existente, dado a característica bastante irregular do material. Valores abaixo de 800 ohm.m são compatíveis com resistividades aparentes de materiais saturados e/ou alterados, encontrados na literatura geofísica. Tais valores também são referenciados por trabalhos anteriores realizados na região.

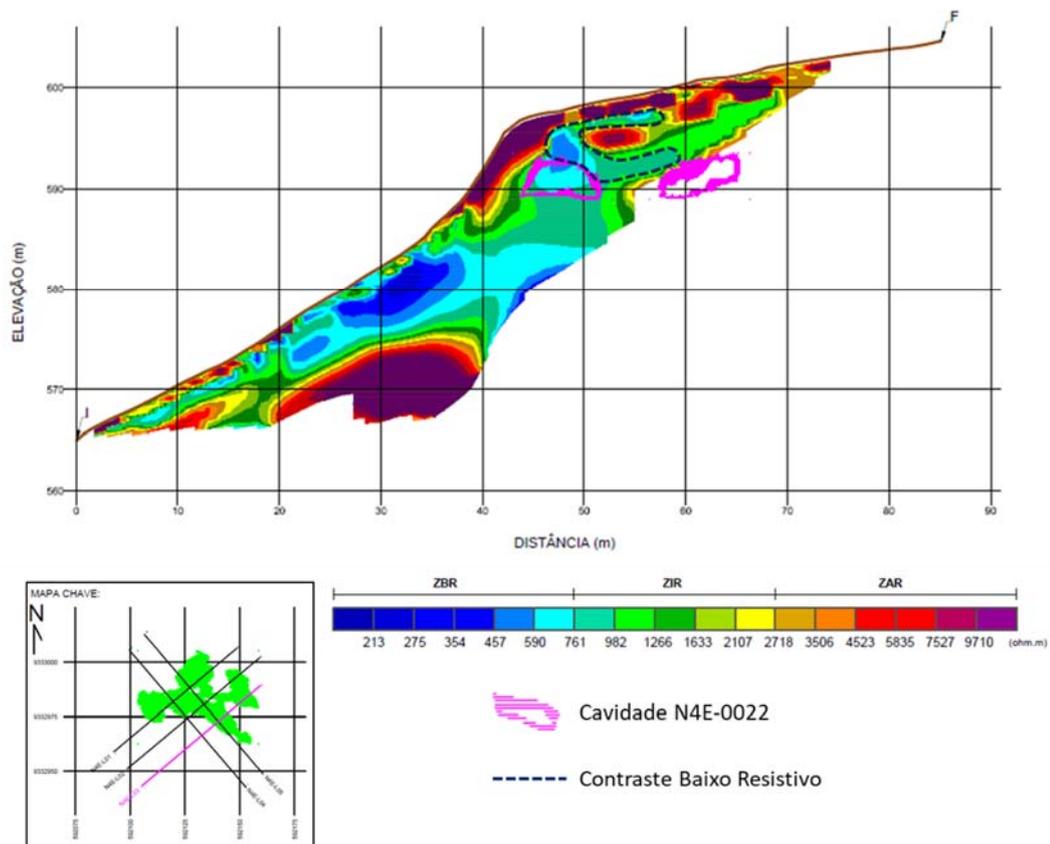


Figura 6.15 - Anomalias de Contraste Baixo Resistivo associadas à cavidade N4E-0022, evidenciadas por linhas pretas pontilhadas.

As anomalias associadas a processos de instabilização do teto da cavidade (Contraste Angular e Contraste Baixo Resistivo) foram identificadas e extrapoladas a todas as seções geoeletricas adquiridas. Em seguida, foram inseridas no *software* de modelamento (Leapfrog Geo ®) por meio das seguintes etapas:

- Inserção da nuvem de pontos dos dados elétricos coletados de todas as seções geofísicas, seus atributos de coordenadas (X, Y e Z) assim como a respectiva resistividade aparente (RES) associada àquele ponto (Figura 6.16A);
- Categorização dos pontos associados à instabilização do teto por meio das definições de Contraste Baixo Resistivo e Contraste Angular (Figura 6.16B);
- Individualização dos pontos categorizados (Figura 6.16C);
- Modelamento implícito dos pontos categorizados (associados às instabilizações) (Figura 6.16D).

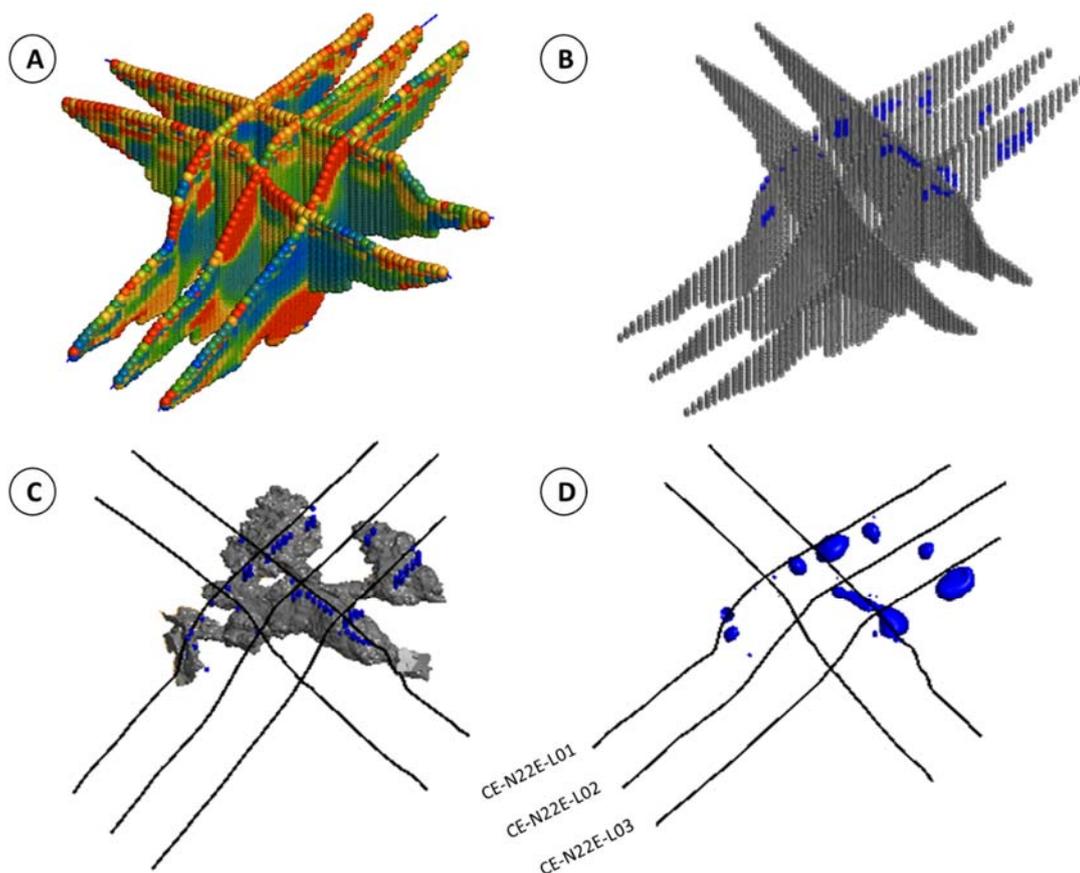


Figura 6.16 - Processo de modelamento implícito dos dados geoeletricos relacionados a zonas de instabilizações do teto da cavidade N4E-0022. (A): Nuvem de pontos contendo os atributos de coordenadas X, Y, Z e resistividade aparente associada; (B): Categorização de pontos relacionados a zonas com maior propensão à instabilização; (C): Individualização dos pontos categorizados; (D): Modelamento das superfícies de maior instabilidade a partir dos pontos categorizados.

As anomalias geofísicas (contrastes elétricos) que configuram regiões de possíveis instabilizações geotécnicas nas porções do teto da cavidade N4E-0022 podem ser observadas no mapa da Figura 6.17. Tais indicações revelam necessidade de maior

atenção geomecânica principalmente no Salão Principal e Salão Leste, em virtude da maior concentração de pontos instáveis mapeados indiretamente pelo método geofísico da Eletrorresistividade (CE).

É importante salientar que as assinaturas geofísicas características de possíveis instabilizações de teto apresentaram forte concordância com observações realizadas em campo. Regiões com maior empoçamento/gotejamento coincidem com os valores atribuídos a anomalias mais condutivas. Em outras cavidades, os valores condutivos provenientes de levantamentos geolétricos também elucidaram regiões instáveis e que coincidiram, posteriormente, com deslocamentos de blocos (como, por exemplo, a cavidade N4E-0026).

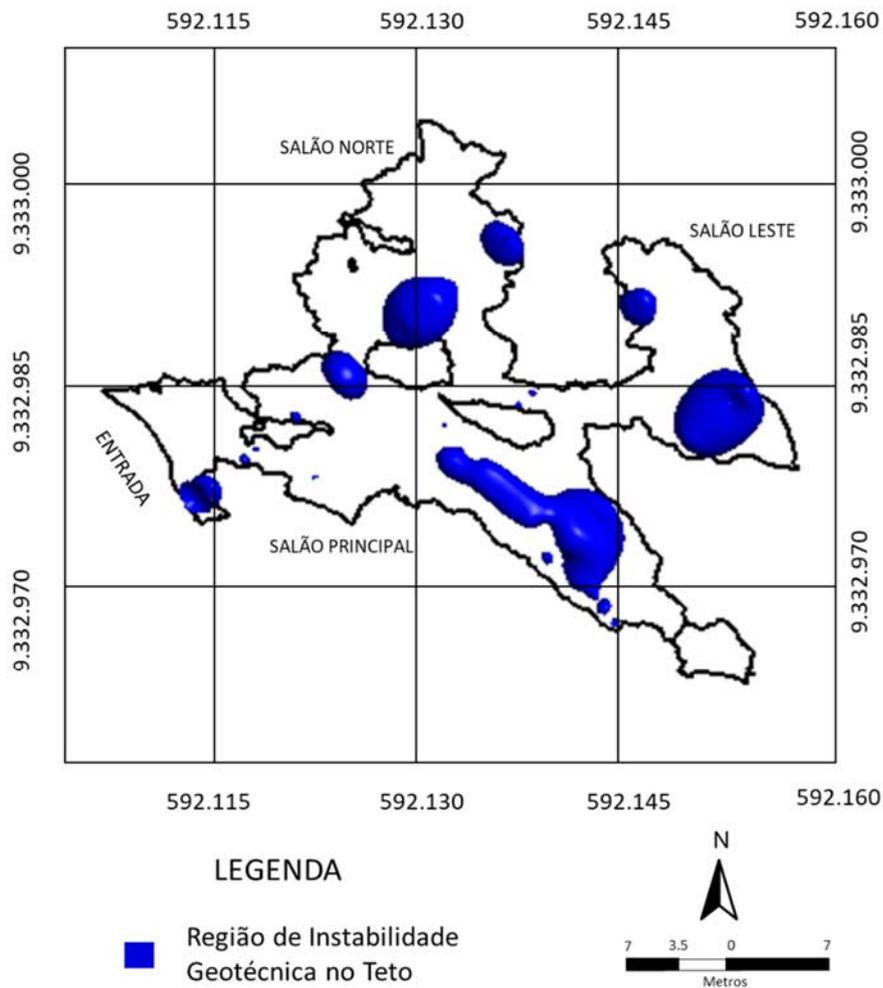


Figura 6.17 - Mapa de pontos/zonas indicativas de instabilizações de teto da cavidade N4E-0022, por meio de dados geolétricos.

Na própria cavidade N4E-0022, uma das anomalias geofísicas presentes no Salão Norte apresenta coincidência com um dos pontos de fragilidade identificados pelo mapeamento geoestrutural realizado pela Vale S.A. Tais pontos estão em contínuo monitoramento estrutural conforme exemplo de registro fotográfico do monitoramento realizado entre agosto de 2016 e maio de 2017 (Figura 6.18).

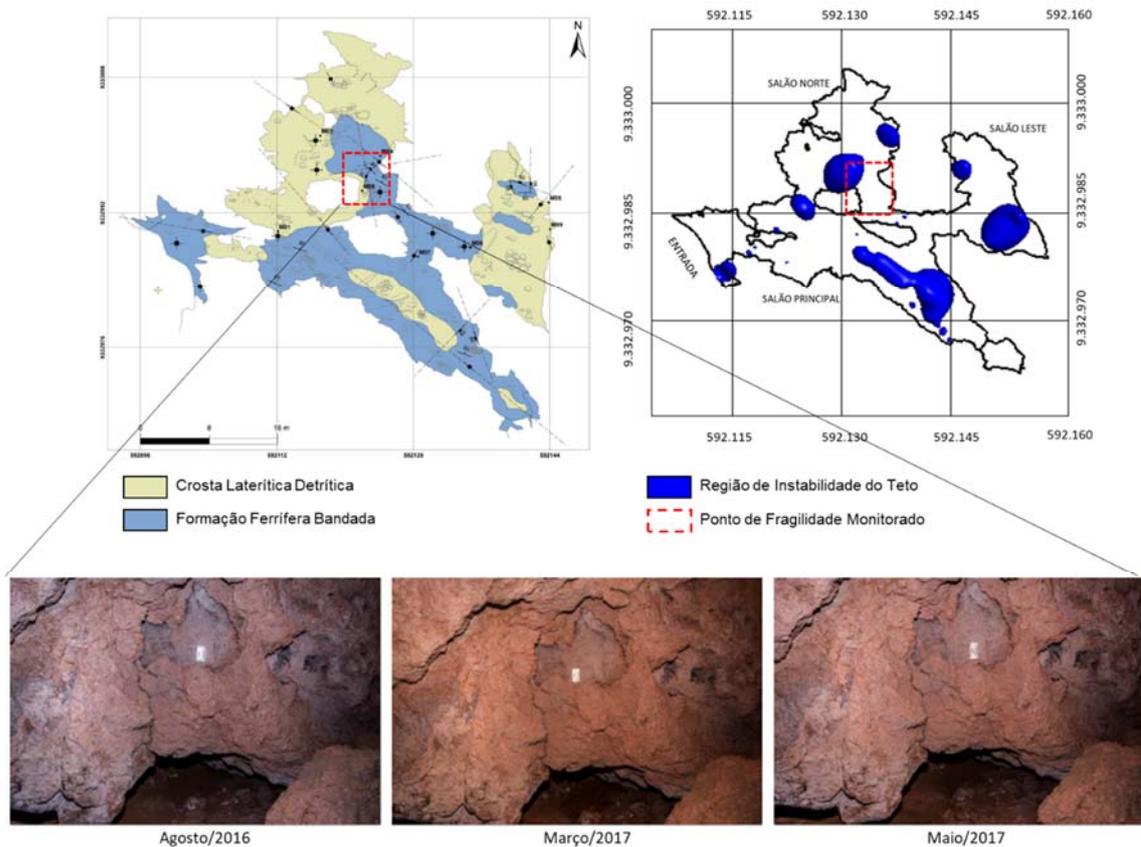


Figura 6.18 - Coincidência entre um dos pontos de fragilidade identificados pelo mapeamento geoestrutural e anomalia geofísica.

O mapa de anomalias com indicações de instabilizações de teto da cavidade N4E-0022, elaborado pela geofísica, também foi comparado com o mapa de classificação geomecânica RMR da mesma cavidade (Figura 6.19). O mapa comparativo revelou correspondências entre os vãos classificados como maciço muito ruim a regular (Salão Leste, Salão Principal e parte do Salão Norte) com regiões elucidadas pela geofísica rasa como de maior fragilidade estrutural.

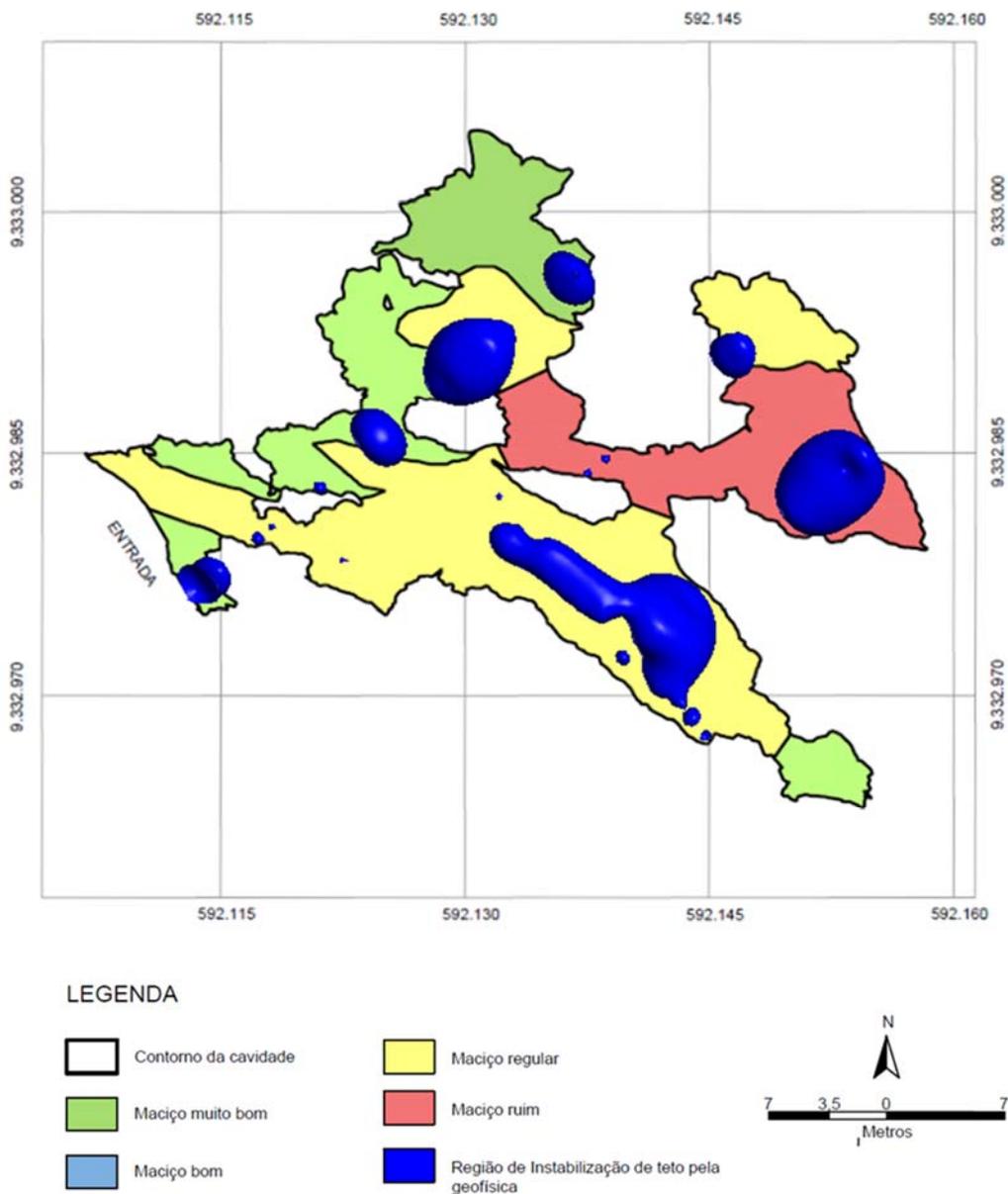


Figura 6.19 - Mapa comparativo entre a classificação geomecânica RMR da cavidade N4E-0022 (Vale S.A.) e o mapa de pontos/zonas indicativas de instabilizações de teto da mesma cavidade, por meio de dados geolétricos.

6.1.4. Avaliação da Resistência à Compressão Uniaxial

Por meio da análise das principais características dos horizontes de intemperismo (*e.g.* porosidade, grau de intemperismo) foi possível prever/inferir as assinaturas geolétricas dos subtipos intempéricos existentes na cavidade N4E-0022: CLD (Crosta Laterítica Detrítica), CLF (Crosta Laterítica Ferruginosa), FFL (Formação Ferrífera Laterítica), LFA (Laterita Ferro-Aluminosa) e SAPRF (Saprolito de Formação Ferrífera).

A resposta geofísica frente a cada litotipo existente também foi corroborada pelos estudos de Barbosa (2018), cuja calibração dos dados geofísicos ocorreu por meio da realização de uma Seção Controle de Eletrorresistividade (CE) em bancada com face rochosa exposta. Juntamente com a realização da geofísica e suas respostas frente ao perfil de alteração (Tabela 6.2), diversos testes *in situ* e laboratoriais forneceram valores de referência para a resistência à compressão uniaxial dos litotipos. Assim, foi possível correlacionar, qualitativamente, assinaturas geoeletricas obtidas pelas seções de Eletrorresistividade (CE) com os valores de referência da resistência à compressão uniaxial ensaiados (*in situ*) nos diversos litotipos existentes.

As seguintes etapas esquematizam, de modo resumido, o processo interpretativo realizado:

- Etapa 1: Extrapolação gráfica (explícita) das correlações entre assinaturas geofísicas e respectivo litotipo correspondente para todas as seções geofísicas adquiridas na cavidade N4E-0022, em ambiente 2D (Figuras 6.20 a 6.24);
- Etapa 2: Inserção das seções geofísicas invertidas em *software* de modelamento implícito (Figura 6.25A) juntamente com os pontos de construção do dado geoeletrico (Figura 6.25B) e seus respectivos atributos intrínsecos X (Coordenada X), Y (Coordenada Y) e RES (Resistividade Aparente);
- Etapa 3: Categorização dos pontos de resistividade aparente em CLD (Crosta Laterítica Detrítica), CLF (Crosta Laterítica Ferruginosa), FFL (Formação Ferrífera Laterítica), LFA (Laterita Ferro-Aluminosa) e SAPRF (Saprolito de Formação Ferrífera) em função da diferenciação explícita gerada na Etapa 1 (Figura 6.25C);
- Etapa 4: Modelamento implícito dos pontos categorizados em sólidos representativos dos litotipos existentes (Figura 6.25D);
- Etapa 5: O modelamento do bloco diagrama contendo os litotipos existentes na cavidade N4E-0022 e áreas adjacentes permitiu a inferência com os dados correlatos de resistência à compressão uniaxial *in situ* obtida pelo martelo de Schmidt (Tabela 3.8) no mapeamento geológico-geotécnico de detalhe, em perfil realizado pela equipe Vale S.A.

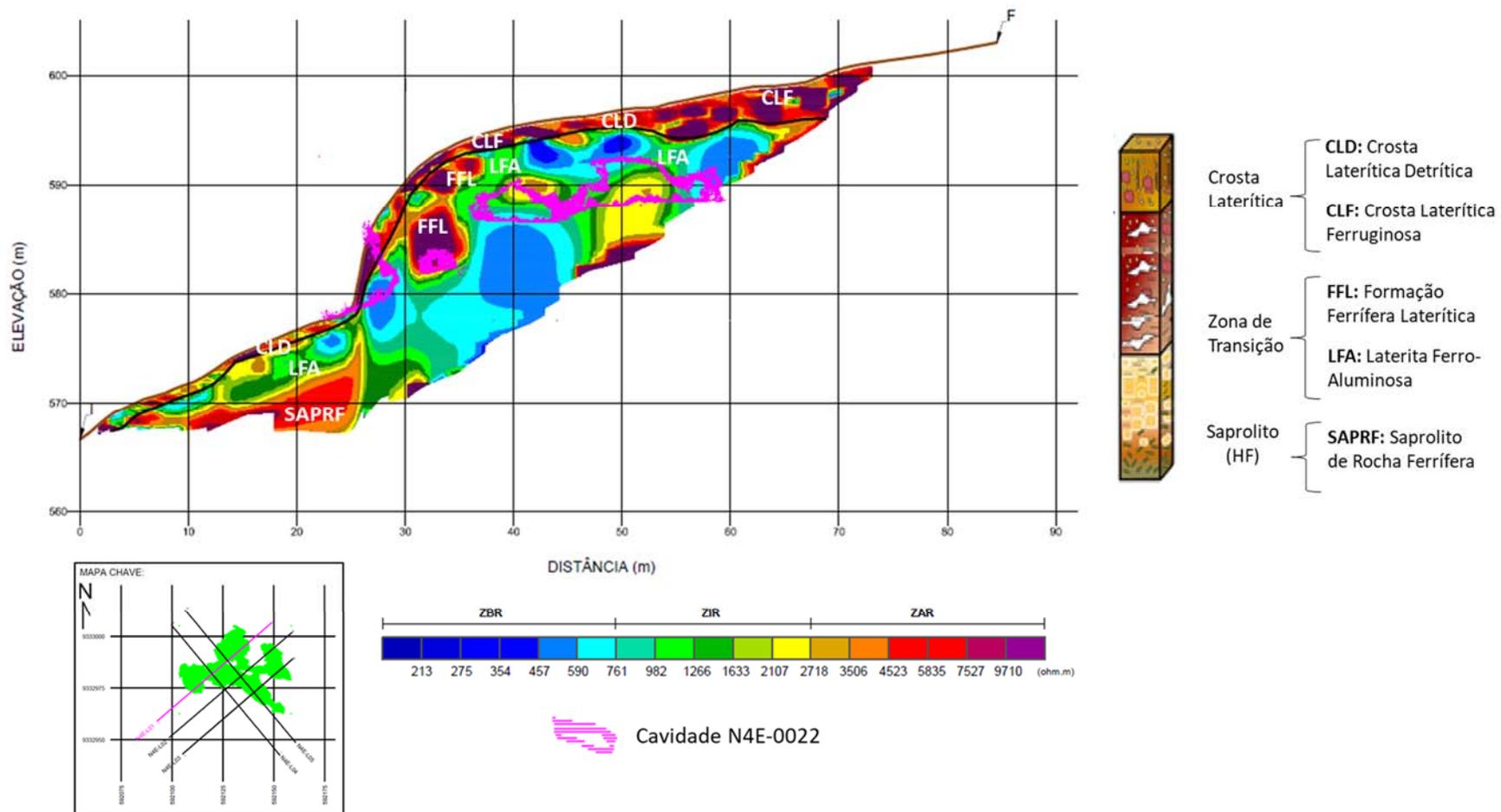


Figura 6.20 - Seção CE-N22E-L01. Interpretação dos litotipos pertencentes ao horizonte de intemperismo através da correlação de assinaturas geofísicas.

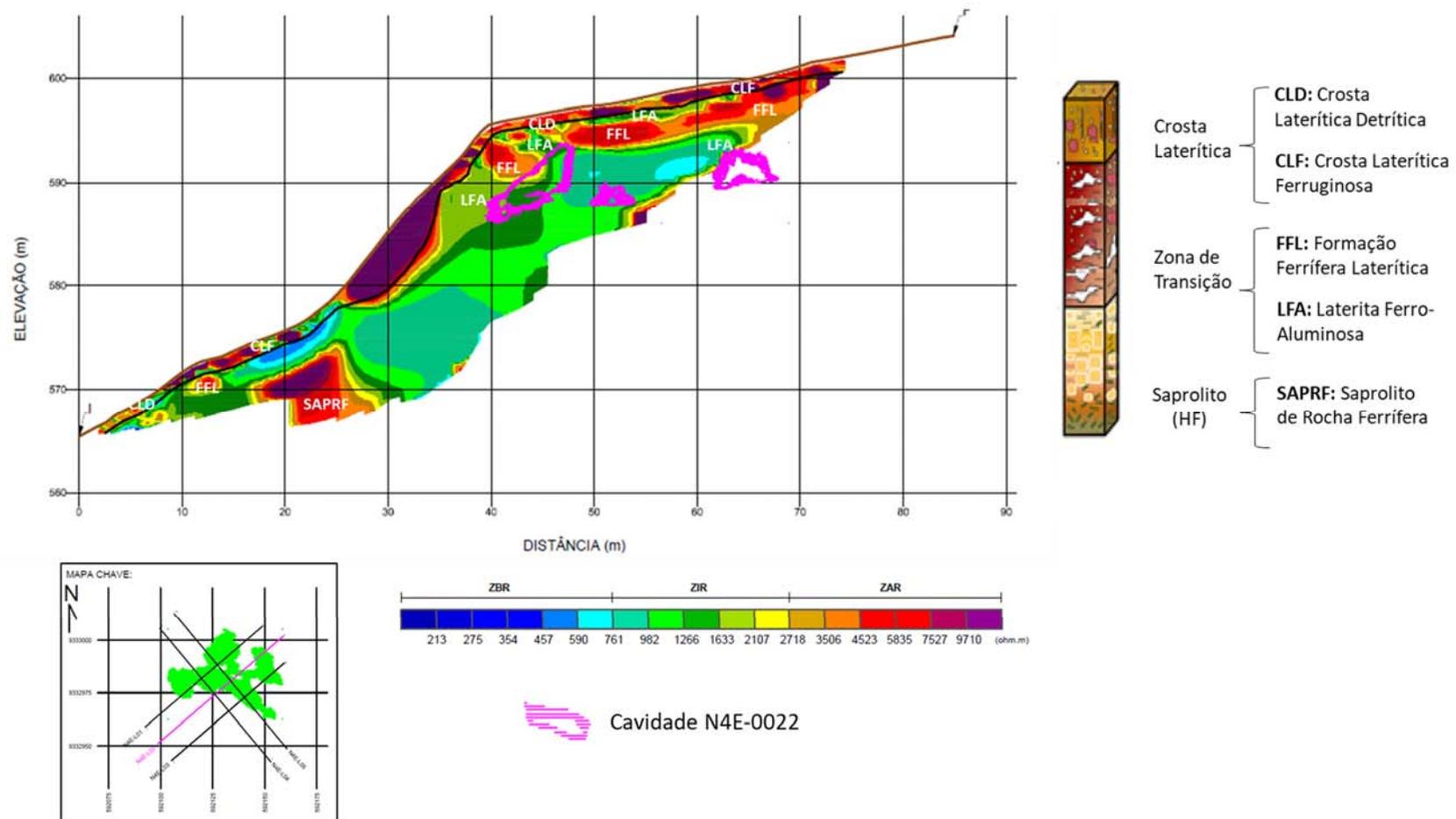


Figura 6.21 - Seção CE-N22E-L02. Interpretação dos litotipos pertencentes ao horizonte de intemperismo através da correlação de assinaturas geofísicas.

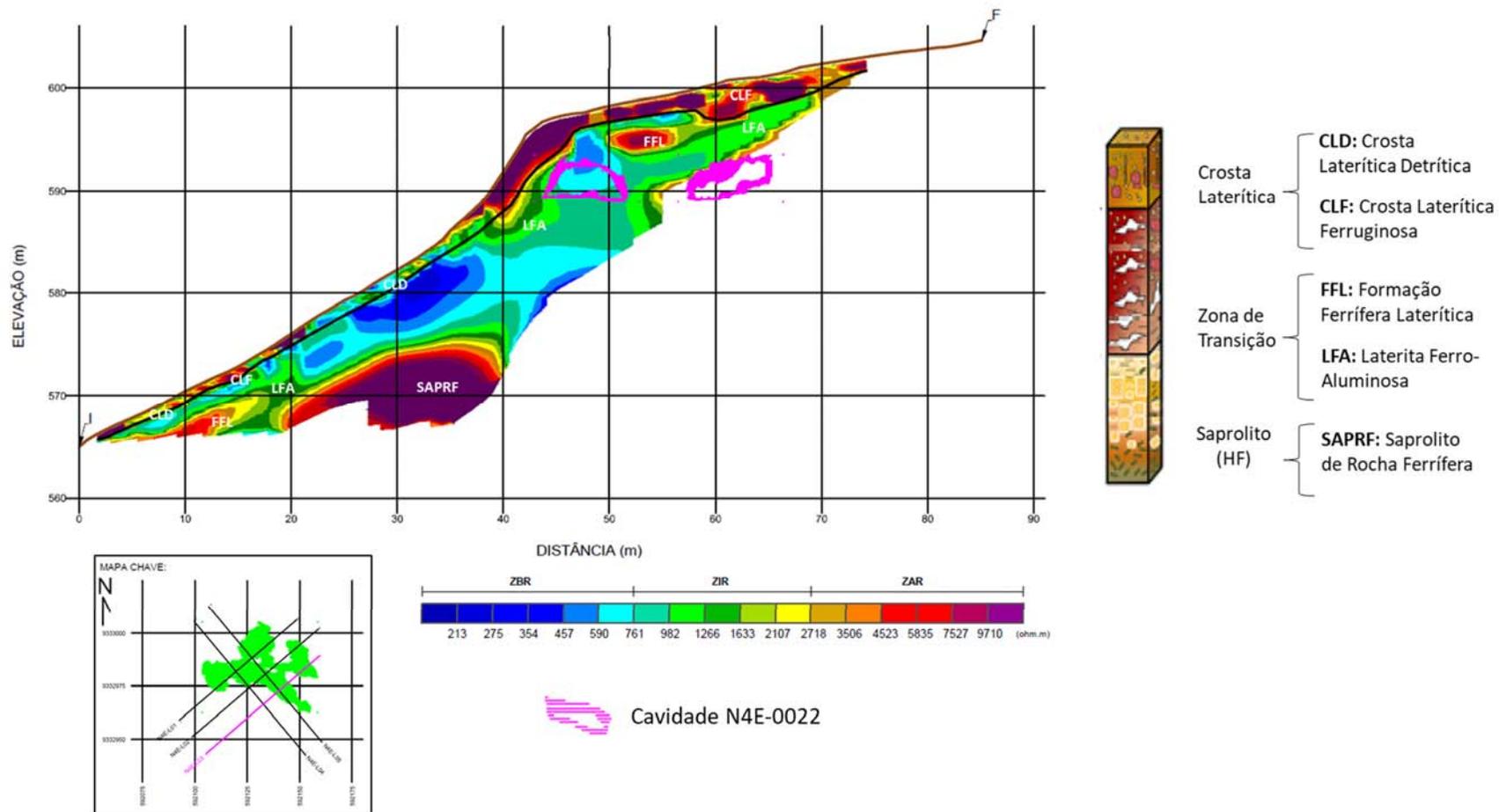


Figura 6.22 - Seção CE-N22E-L03. Interpretação dos litotipos pertencentes ao horizonte de intemperismo através da correlação de assinaturas geofísicas.

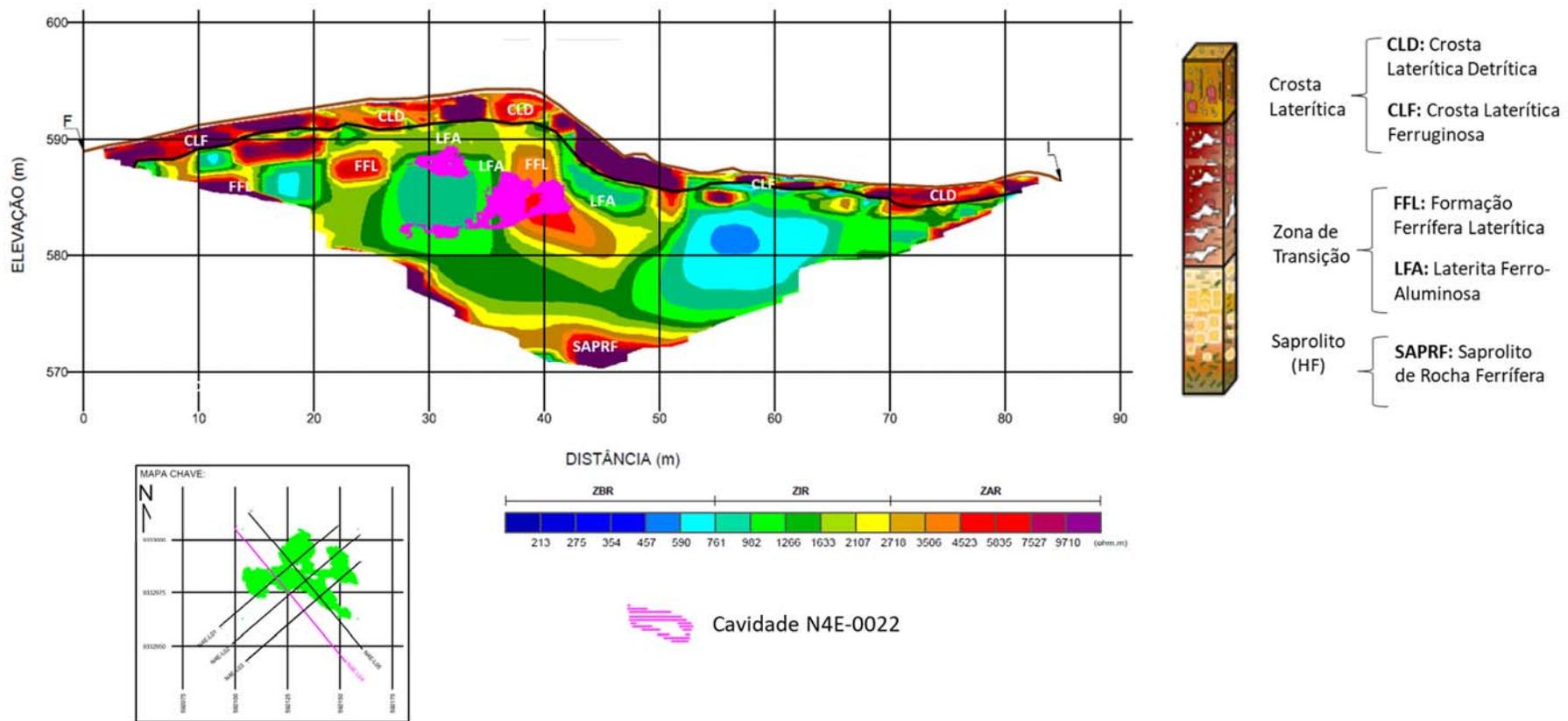


Figura 6.23 - Seção CE-N22E-L04. Interpretação dos litotipos pertencentes ao horizonte de intemperismo através da correlação de assinaturas geofísicas.

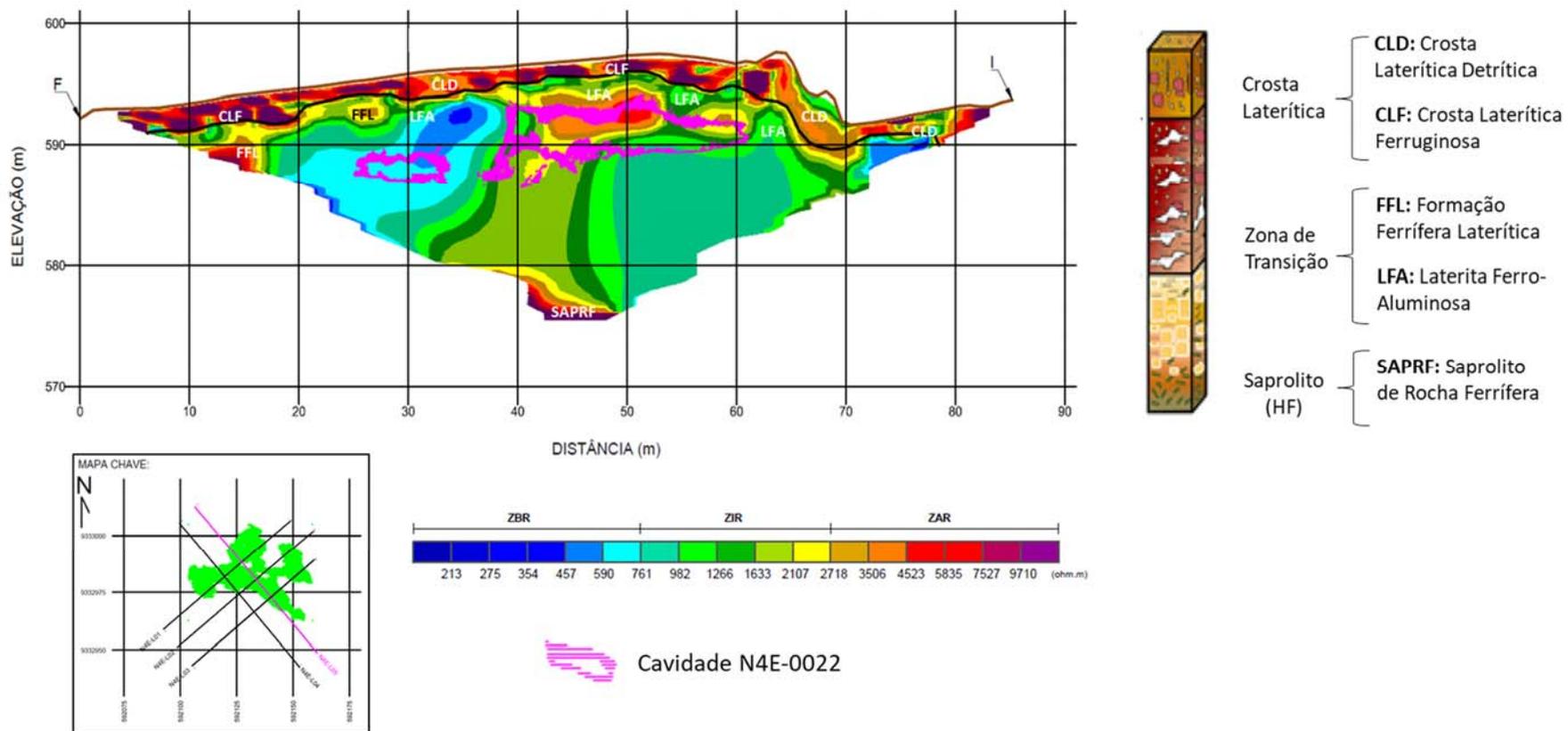
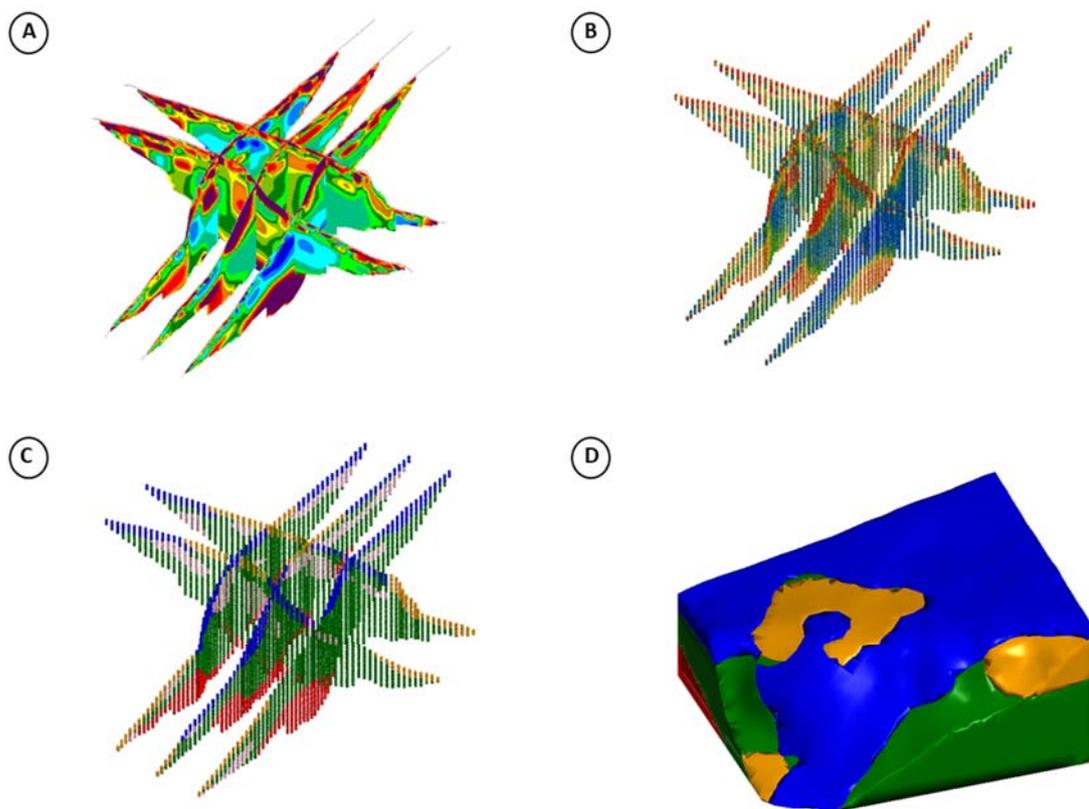


Figura 6.24 - Seção CE-N22E-L05. Interpretação dos litotipos pertencentes ao horizonte de intemperismo através da correlação de assinaturas geofísicas.



DOMÍNIOS LITOGEO MECÂNICOS	
Crosta Laterítica	 Crosta Laterítica Detrítica (CLD)
	 Crosta Laterítica Ferruginosa (CLF)
Zona de Transição	 Formação Ferrífera Laterítica (FFL)
	 Laterita Ferro-Aluminosa (LFA)
Saprolito (HF)	 Saprolito de Formação Ferrífera (SAPRF)

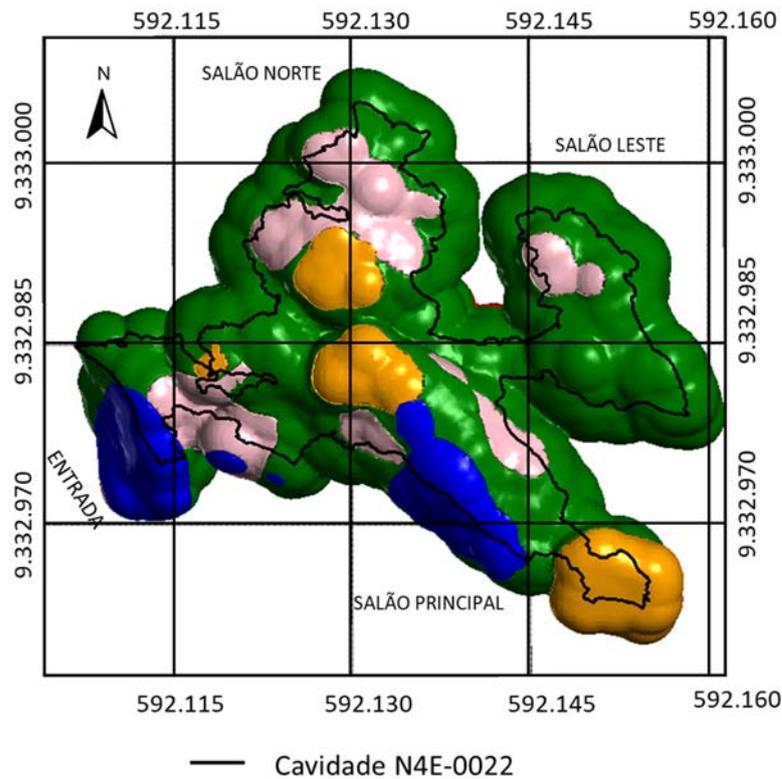
Figura 6.25 - Evolução do processo interpretativo para associação entre caracterização litogeomecânica dos litotipos e assinaturas geolétricas obtidas na cavidade N4E-0022. (A): Seções de Eletroresistividade (CE) invertidas; (B): Pontos contendo informações de coordenadas e resistividade aparente; (C): Categorização de pontos em virtude das correlações entre assinaturas geofísicas e litotipos de laterização; (D): Bloco diagrama como resultado do modelamento implícito realizado.

A Tabela 6.2 apresenta as correlações entre as respostas geolétricas obtidas pelo mapeamento geofísico em relação aos litotipos principais existentes assim como uma abordagem qualitativa de resistência à compressão uniaxial (martelo de Schmidt).

Tabela 6.2 - Assinaturas geolétricas dos litotipos de horizontes intempéricos e correlações com resistência à compressão uniaxial.

Horizonte de Intemperismo	Litotipo	Sigla	Características Físicas	Mapeamento Geofísico		
				Domínio Geolétrico	Assinaturas Geolétricas	Resistência à Compressão Uniaxial
Crosta Laterítica	Crosta Laterítica Detrítica	CLD	Aspecto poroso e pouco poroso. Aparência conglomerática composta por clastos angulosos a sub-angulosos em matriz formada por óxido-hidróxido de ferro. Ocorrem, em geral, nas porções mais baixas dos perfis.	ZAR (Zonas de Alta Resistividade)	Zonas contínuas de Alta Resistividades aparente. Valores entre 2.700 ohm.m e 7.500 ohm.m.	Alta
	Crosta Laterítica Ferruginosa	CLF	Aspecto brechóide garante as mais elevadas resistividades aparentes (> porosidade e espaços com presença de ar). Ocupam, principalmente, as porções mais elevadas nos platôs.		Zonas descontínuas de Alta Resistividades aparente. Valores superiores a 7.500 ohm.m	Muito Alta
Transição	Formação Ferrífera Laterítica	FFL	Bandas de óxido-hidróxido de ferro intercaladas com bandas avermelhadas e porosas.	ZIR (Zonas de Resistividade Intermediárias)	Zonas locais de Alta Resistividade Aparente com valores acima de 2.700 ohm.m.	Regular a Alta
	Laterita Ferro-Aluminosa	LFA	Forte alteração e presença de matriz terrígena silto-arenosa. Altamente susceptível a processos intempéricos.		Zonas de Resistividades Intermediárias. Valores abaixo de 2700 ohm.m	Baixa
Saprolito	Saprolito de Rocha Ferrífera	SAPRF	Presença de rocha ferrífera (FFB), Hematita Friável (HF), Hematita Compacta (HC) e Jaspilito (Jp).	ZAR (Zonas de Alta Resistividade)	Zonas Contínuas de Alta Resistividade Aparente. Valores superiores a 7.500 ohm.m	Variável

A partir das análises e ponderações realizadas, pode-se construir mapas associativos entre as assinaturas geofísicas obtidas pelos dados elétricos (*ranges* de resistividade aparente) e a resistência à compressão uniaxial. O *slice* correspondente à porção entre o teto da cavidade e a superfície do terreno considerou um *buffer*² da cavidade para sua construção. Tal região mostra-se de grande interesse em virtude da alta susceptibilidade à instabilidade estrutural e pode ser visualizado através do mapa da Figura 6.26.



DOMÍNIOS LITOGEOMECÂNICOS		
Horizonte	Litotipos	Resistência à Compressão Uniaxial*
Crosta Laterítica	Crosta Laterítica Detrítica (CLD)	Alta (Mínimo de 21,5 Mpa)
	Crosta Laterítica Ferruginosa (CLF)	Muito Alta (Mínimo de 34,5 Mpa)
Zona de Transição	Formação Ferrífera Laterítica (FFL)	Regular a Alta (Mínimo de 17 Mpa)
	Laterita Ferro-Aluminosa (LFA)	Baixa (Mínimo de 16 Mpa)
Saprolito (HF)	Saprolito de Formação Ferrífera (SAPRF)	Variável

Figura 6.26 - Mapa de caracterização litogeomecânica dos litotipos existentes através do mapeamento geofísico indireto da cavidade N4E-0022. *Os valores de compressão uniaxial foram fornecidos pela Vale S.A. a partir de dados obtidos por martelo de Schmidt *in situ*.

² Extrapolação do contorno 3D da cavidade, através de *input* no *software* de modelamento numérico. Para a presente dissertação, considerou-se um *buffer* de 2.5 metros para com o entorno da cavidade.

A porção mostra-se de difícil acesso para o mapeamento geomecânico convencional e ensaios (*e.g.* sondagem mecânica) com características mais invasivas. O imageamento geofísico na região entre o teto da cavidade e a superfície permite a inferência/análise de informações em locais sem acesso/exposição direta (Figura 6.27).

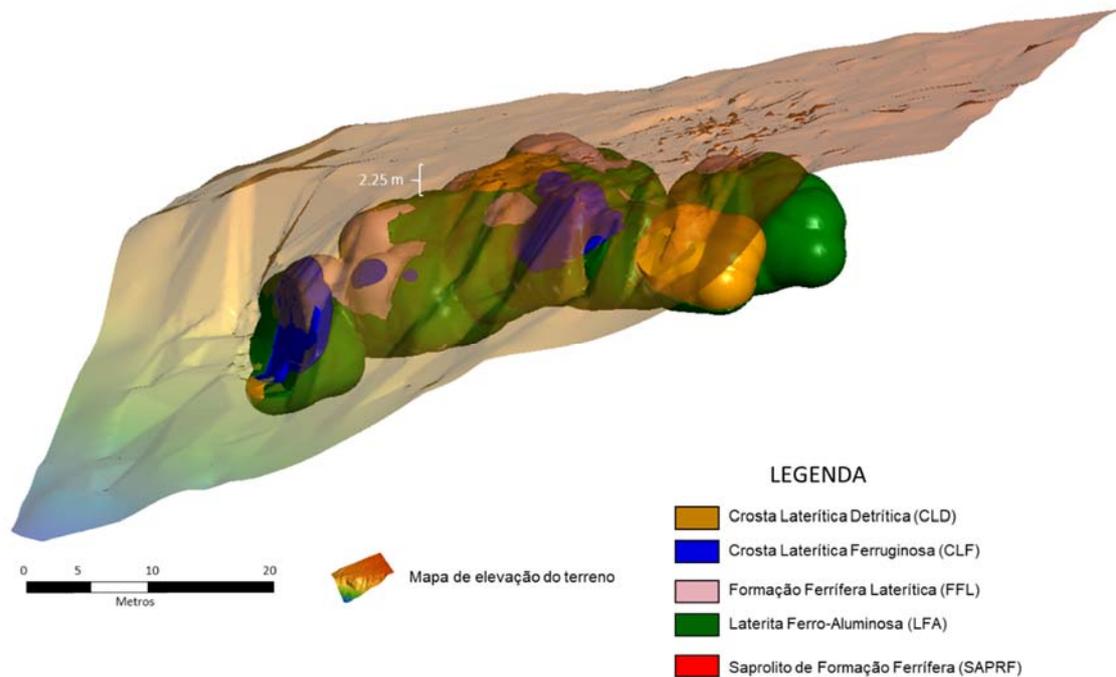


Figura 6.27 - Mapa de caracterização litogeomecânica na região compreendida entre o teto da cavidade N4E-0022 e a subsuperfície do terreno (2,25 metros).

As comparações com os mapas existentes de classificações geomecânicas da cavidade N4E-0022 (RMR e IGC) permitiram considerações satisfatórias com o mapa de caracterização litogeomecânica dos litotipos existentes obtido através do mapeamento geofísico indireto da cavidade N4E-0022 (Figura 6.28). O mapeamento geofísico elucidou a presença predominante do litotipo (LFA) no Salão Leste da cavidade. Tal litotipo é caracterizado pela menor resistência à compressão uniaxial dentre os materiais existentes. Em análise aos mapas de classificações geomecânicas (RMR e IGC), ambos revelaram presença de maciço ruim e alta susceptibilidade a esforços externos, respectivamente, para o referido salão.

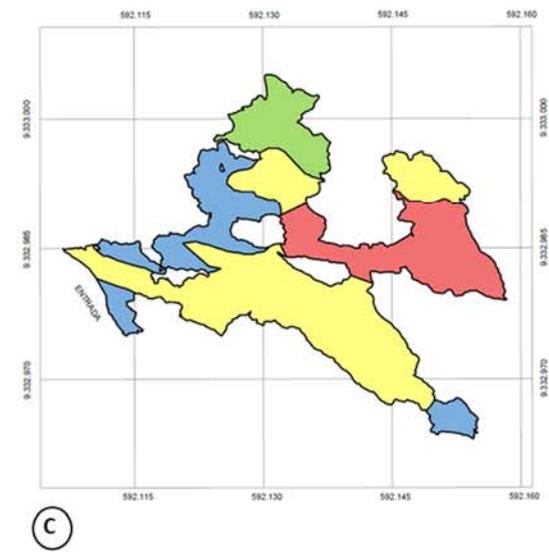
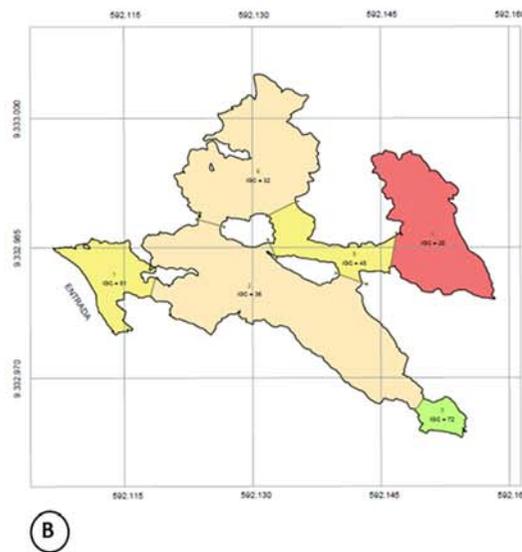
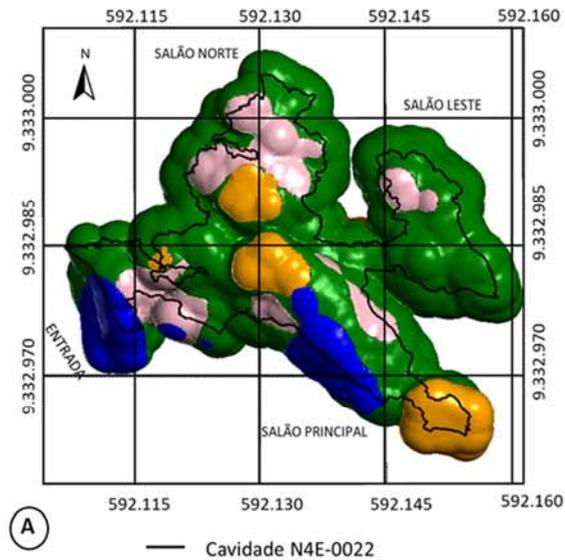
A porção extremo-sudeste do Salão Principal apresentou características geofísicas correspondentes à Crosta Laterítica Detrítica (CLD), cuja resistência à compressão uniaxial é estimada como alta. Tal porção é caracterizada pelos mapas de classificações

geomecânicas (RMR e IGC) como maciço bom e com baixa susceptibilidade a esforços externos, respectivamente.

A entrada da cavidade apresentou, em geral, características de maior estabilidade geotécnica pelos sistemas de classificações RMR e IGC. O mapeamento geofísico também indicou uma maior estabilidade, em virtude da concentração de litotipos (CLF e FFL), relacionados à maior resistência à compressão uniaxial.

O Salão Principal, em geral, apresentou presença de litotipo (LFA) caracterizado por baixos valores de resistência à compressão uniaxial. Em análise ao mapa de Índice Geotécnico de Cavernas (IGC) para a cavidade N4E-0022, tal região coincide satisfatoriamente com zonas de alta susceptibilidade a esforços externos. É importante destacar a elucidação, pela geofísica, da presença pontual de litotipos (CLD e CLF) caracterizados pela alta resistência à compressão uniaxial neste salão.

Desta forma, a geofísica poderia fomentar e avançar em estudos localizados de classificação do maciço, uma vez que possibilita compartimentar o salão em domínios geomecânicos mais individualizados.



DOMÍNIOS LITOGEMEACNICOS		
Horizonte	Litotipos	Resistência à Compressão Uniaxial*
Crosta Laterítica	Crosta Laterítica Detritica (CLD)	Alta (Mínimo de 21,5 Mpa)
	Crosta Laterítica Ferruginosa (CLF)	Muito Alta (Mínimo de 34,5 Mpa)
Zona de Transição	Formação Ferrífera Laterítica (FFL)	Regular a Alta (Mínimo de 17 Mpa)
	Laterita Ferro-Aluminosa (LFA)	Baixa (Mínimo de 16 Mpa)
Saprolito (HF)	Saprolito de Formação Ferrífera (SAPRF)	Variável

Faixa do IGC	Susceptibilidade a esforços externos
$IGC > 80$	Muito baixa
$60 < IGC \leq 80$	Baixa
$40 < IGC \leq 60$	Moderada
$20 < IGC \leq 40$	Alta
$IGC < 20$	Muito alta

	Contorno da cavidade		Maciço regular
	Maciço muito bom		Maciço ruim
	Maciço bom		

Figura 6.28 - Comparação entre as classificações geomecânicas RMR e IGC da cavidade N4E-0022 com o mapa de caracterização litogeomecânica dos litotipos existentes através do mapeamento geofísico indireto da cavidade. (A): Mapa de caracterização geomecânica com base no levantamento geofísico; (B): Mapa de Classificação Geomecânica IGC (BRANDI, 2018); (C): Mapa de Classificação Geomecânica RMR (Vale S.A.).

6.2. GROUND PENETRATING RADAR (GPR)

Para a interpretação dos dados de GPR foram utilizados conceitos de radar-estratigrafia (RIBEIRO, 2001), com individualização das diferentes fácies presentes em cada seção de GPR, em termos de estrutura interna dos refletores, tais como: forma, mergulho e relação de continuidade.

A decisão de associar um conjunto de reflexões a uma determinada litologia ou a uma determinada feição material, em geral, é estabelecida a partir de critérios que levam em conta o conhecimento prévio, especialmente sobre os modelos reais de estruturas e feições similares, que ocorrem na área de trabalho. É também de grande relevância o conhecimento da resposta do método geofísico ao meio em questão.

A interpretação de GPR buscou rastrear terminações de refletores e, desta forma, definir compartimentos formados por diferentes materiais segundo a terminologia de definição e descrição de radar fácies de Mitchum *et al.* (1977), Campbell (1967) e Allen (1982). Descontinuidades geológicas (foliações, bandamentos, acamamentos, falhas e fraturas) apresentam-se como interrupções nos refletores que se destacam entre as reflexões associadas ao acamamento natural.

A análise dos dados Eletromagnéticos (GPR) permitiu concluir que a antena de 250 MHz, equipamento PulseEKKO Pro, apresentou os melhores resultados da campanha. Tais respostas podem estar associadas a melhor resolução apresentada em subsuperfície assim como facilidade na operação do equipamento, cujo posicionamento mais rente ao terreno acaba por subtrair ruídos e ondas aéreas ao radargrama. As seções são apresentadas por meio de uma paleta de tons de vermelho e preto e alcançaram, aproximadamente, 20 metros em profundidade.

Em todas as seções analisadas, os refletores tenderam a ser planos, por vezes com mergulho, relativamente regulares, e moderadamente contínuos a descontínuos. Tais refletores também apresentaram descontinuidades que podem estar associadas a planos de fraqueza, com medidas variadas de mergulho e direção.

De modo similar ao realizado com as interpretações de Eletrorresistividade (CE), as análises realizadas pelos dados de GPR (*Ground Penetrating Radar*) foram segmentadas de acordo com as seguintes aplicações:

- Análises de Instabilizações do Teto;
- Identificação de Planos de Descontinuidades.

6.2.1. Análises de Instabilizações do Teto

Em algumas seções pertencentes à cavidade N4E-0022, foi possível perceber a existência de zonas com atenuação (α) dos refletores localizadas acima dos locais com identificação de cavidades (*e.g.* seção L-01, PulseEKKO Pro). Tais regiões, melhor mapeadas nesta frequência em virtude da alta resolução em subsuperfície, foram destacadas por tratarem de regiões propícias a instabilizações (Figura 6.29).

Porções caracterizadas por atenuação de sinal eletromagnético podem indicar presença de água e/ou umidade assim como material alterado/intemperizado, processos de intemperismo associados assim como fluxo hídrico oriundo de uma maior concentração de descontinuidades. Essas características sugerem zonas de maior possibilidade de instabilizações do teto. Zonas de maior atenuação do sinal eletromagnético constituem, portanto, fatores de previsibilidade de zonas com indicativos de instabilidade geotécnica que devem ser considerados em uma classificação geomecânica mais precisa.

Regiões atenuadas nos dados de GPR e zonas de maior condutividade elétrica (Contraste Baixo Resistivo) nos dados geoeletricos (Item 6.1.3) apresentaram satisfatória correspondência e corroboram para uma interpretação coerente e mais próxima da realidade geotécnica da cavidade. A Figura 6.30 apresenta a correspondência entre as assinaturas geofísicas resultantes dos diferentes métodos adquiridos em uma mesma posição na cavidade N4E-0022.

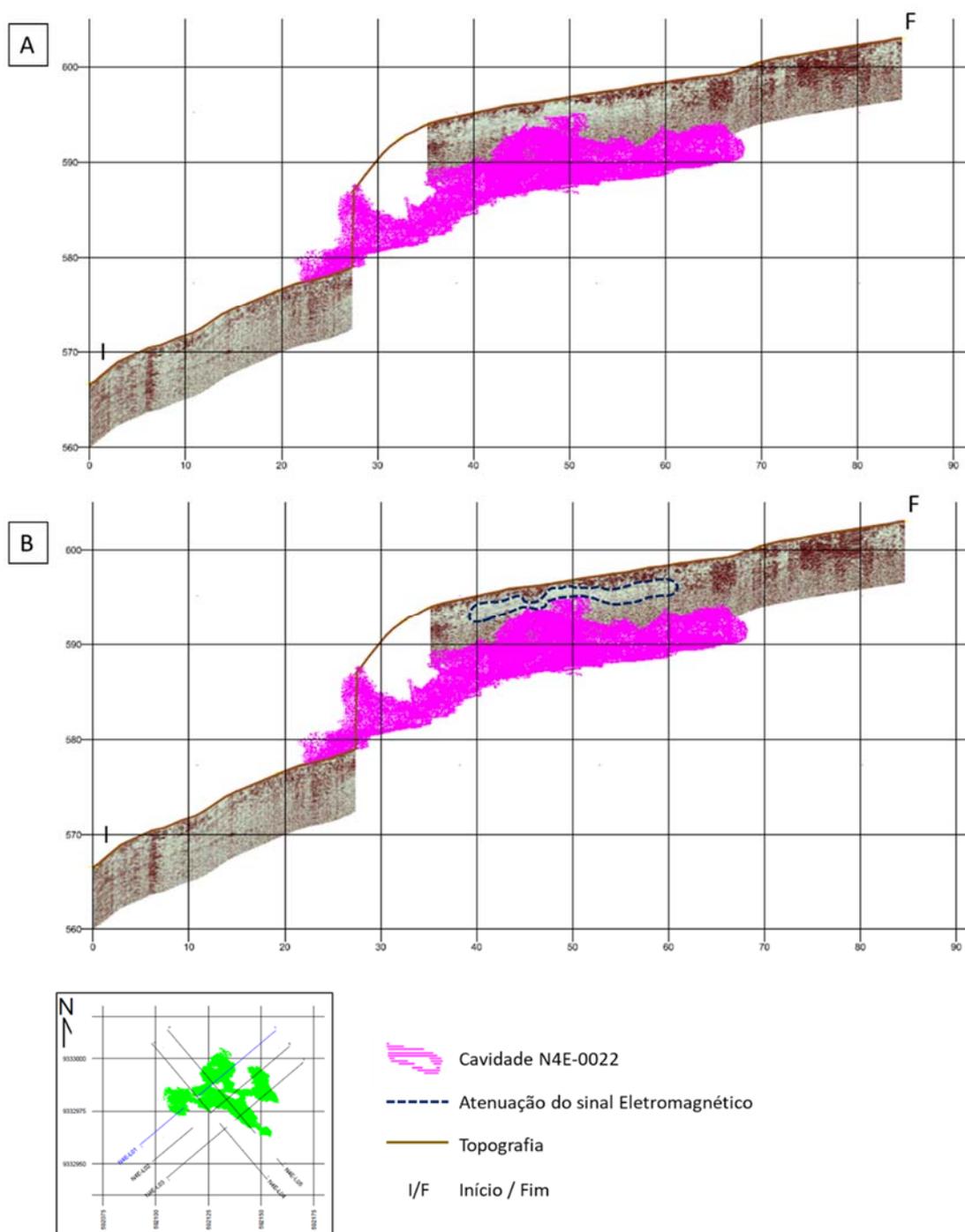


Figura 6.29 - Atenuação do sinal Eletromagnético associado à previsibilidade de zonas com indicativos de instabilidade geotécnica no teto da cavidade N4E-0022. Seção de GPR adquirida com antena de 250 MHz (PulseEKKO Pro). (A): Dado sem interpretação; (B): Dado com interpretação. É importante ressaltar que, em virtude do terreno exacerbadamente acidentado e impossibilidades operacionais, os trechos mais críticos (taludes íngremes) das seções de GPR tiveram sua aquisição de dados interrompida por questões de segurança.

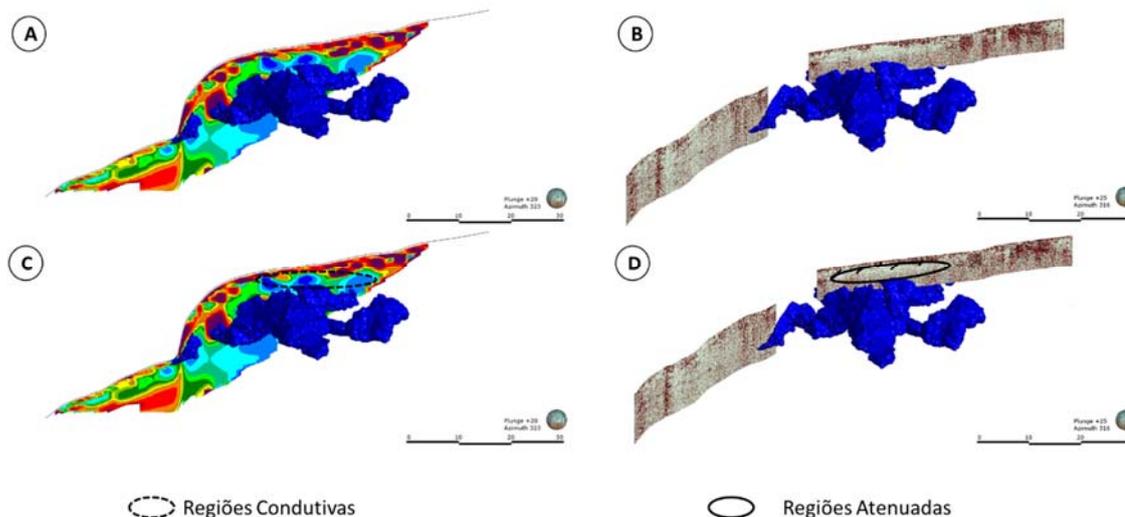


Figura 6.30 - Correspondência entre assinaturas geofísicas em uma mesma seção adquirida com os diferentes métodos geofísicos. (A): Seção de Eletrorresistividade (CE) sem interpretação; (B): Seção de GPR sem interpretação; (C): Seção de Eletrorresistividade (CE) com interpretação; (D): Seção de GPR com interpretação.

6.2.2. Identificação de Planos de Descontinuidades

A partir da análise das seções de GPR pertencentes à cavidade N4E-0022, adquiridas através do equipamento PulseEKKO Pro com frequência central da antena de 250 MHz, foi possível a identificação de descontinuidades destacadas por meio de um conjunto de planos em cor verde nos perfis 2D (*e.g.* seção GPR-N22E-L01, Figura 6.31).

As descontinuidades interpretadas concentram-se nas porções superiores do perfil, ou seja, nas regiões próximas ao teto das cavidades, e apresentam direções de mergulho bidirecional, alguns deles, encontram-se na forma de feições em cunha. Tais planos podem estar associados a possíveis superfícies de deslocamento, que induzem a gênese e desenvolvimento de cavidades e, por isso, constituem importantes feições no mapeamento geofísico. Esses locais de mudança textural e descontinuidades constituem caminhos favoráveis para que os processos espeleogenéticos ocorram.

As seções foram também dispostas em ambiente tridimensional (Leapfrog Geo[®]) assim como as respectivas interpretações realizadas em cada seção adquirida, de forma a destacar as estruturas de descontinuidades interpretadas graficamente através dos resultados com frequência de 250 MHz (Figura 6.32).

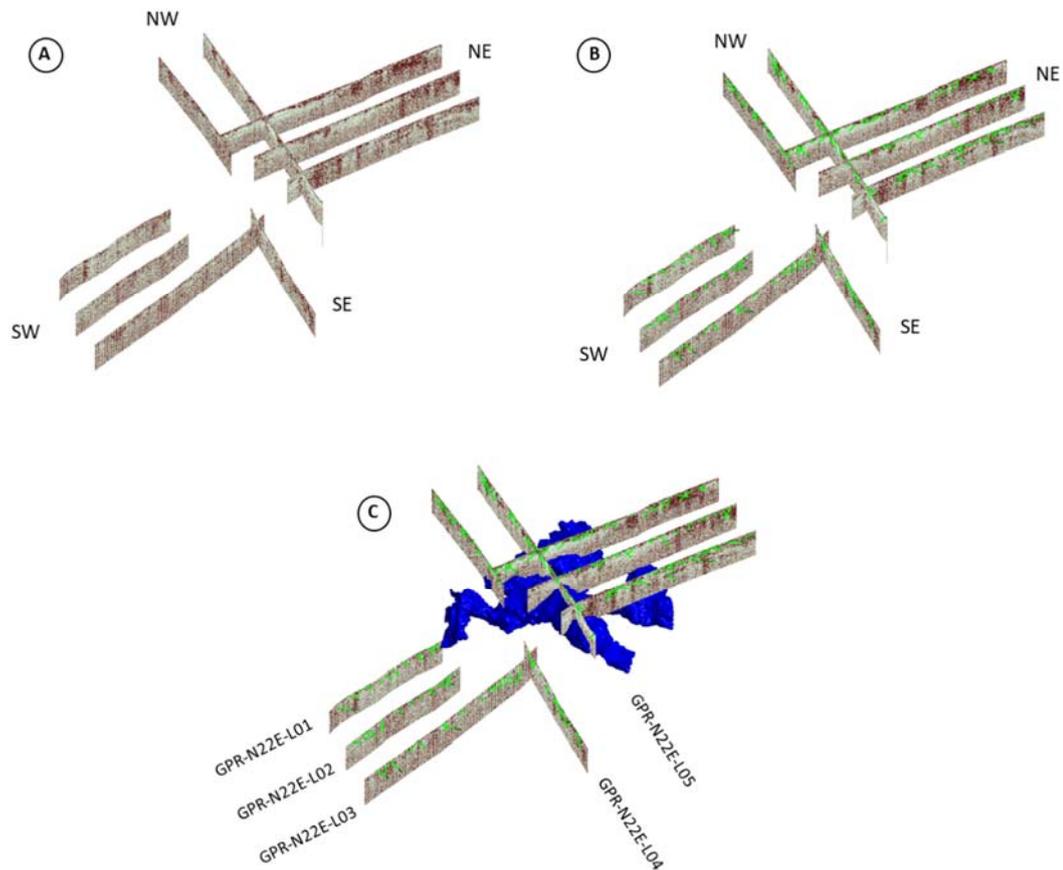


Figura 6.32 – (A): Seções de GPR com antena central de 250 MHz em ambiente tridimensional; (B): Descontinuidades interpretadas pela análise dos radargramas; (C): Visualização com identificação da cavidade N4E-0022.

Os radargramas da cavidade N4E-0022 foram analisados considerando planos nas direções gerais NW-SE (para as seções N22E-L01 a N22E-L03, Figura 6.33A) e NE-SW (para as seções N22E-L04 e N22E-L05, Figura 6.33B), perpendiculares às direções de aquisição, ou seja, NE-SW (N22E-L01 a N22E-L03) e NW-SE (N22E-L04 e N22E-L05). A Figura 6.33C apresenta a integração de alguns planos representativos das principais descontinuidades mapeadas pelas seções geofísicas. Vale ressaltar que os planos estão limitados aos mergulhos identificados nos radargramas, sendo assim, outros planos podem ocorrer, com direções diferentes, mas não podem ser identificados nas imagens, pelas condições inerentes ao método.

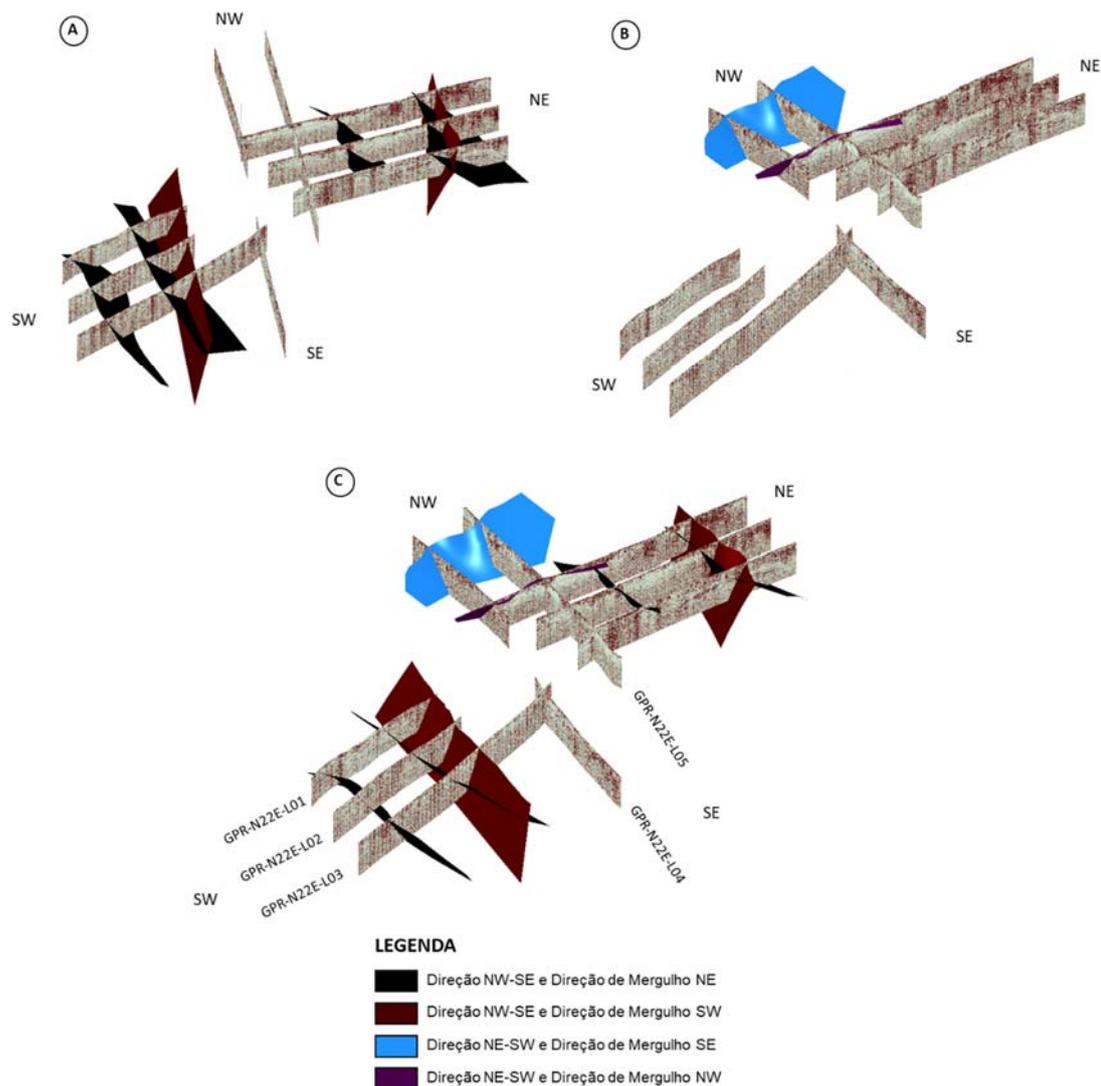


Figura 6.33 – (A): Planos representativos nas direções gerais NW-SE, para as seções N22E-L01 a N22E-L03; (B): Planos representativos nas direções gerais NE-SW, para as seções N22E-L04 a N22E-L05; (C): Planos representativos para todas as seções geofísicas mapeadas, destaque para possíveis feições em cunha.

Os planos de descontinuidades mapeados indiretamente pelo GPR foram inseridos em estereogramas por meio dos respectivos pontos polares para a realização de ponderações estruturais do ambiente. Pela análise do estereograma de contorno (Figura 6.34) contendo todas as medidas interpretadas pela geofísica foi possível perceber que as descontinuidades exibem duas direções principais e considerável dispersão de ângulos de mergulhos. Tais descontinuidades formam padrões de traços em forma de X, sendo as direções mais abundantes NW-SE ($\cong 230/51$ e $50/51$) e NE-SW ($\cong 150/55$ e $330/55$). As direções de mergulho, mesmo com grande variação, tendem a apresentar maior densidade de resultados subverticalizados ou com alto ângulo de caimento, entre 50° e 60° .

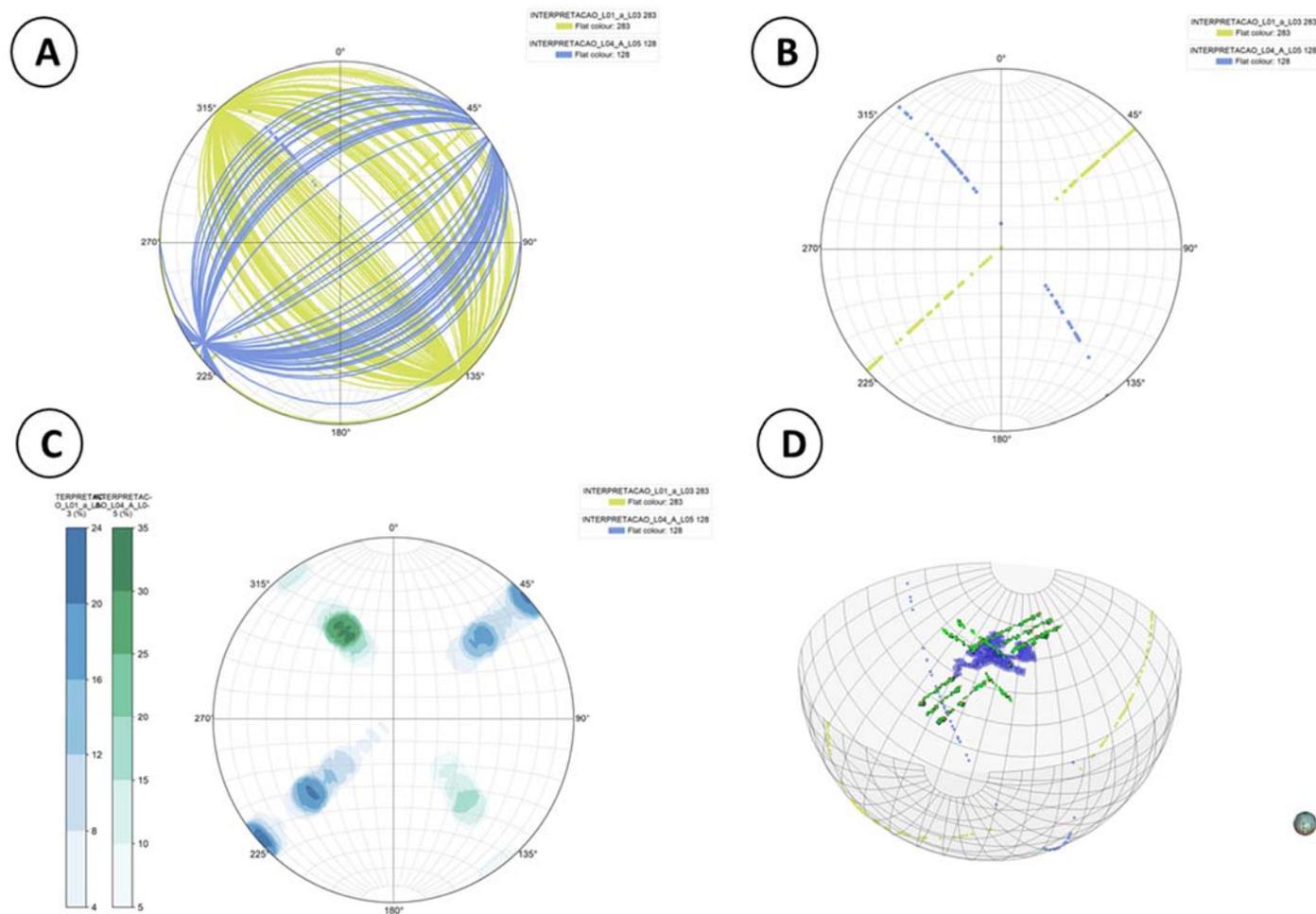


Figura 6.34 – (A): Modo de visualização dos planos interpretados pelo GPR; (B): Modo de visualização dos pontos polares (N = 311 polos); (C): Modo de visualização dos contornos; (D): Modo de visualização tridimensional da rede de Schmidt do contexto da cavidade N4E-0022.

7. CONCLUSÕES E PROPOSIÇÕES COMPLEMENTARES

7.1. PRINCIPAIS CONCLUSÕES

A utilização de geofísica rasa aplicada a cavidades hospedadas em terrenos ferríferos tem mostrado crescimento exponencial dado à demanda do setor econômico assim, como ao atendimento às questões relacionadas ao licenciamento ambiental.

A geofísica gerou imagens contínuas na região da cavidade N4E-0022 e seu entorno, apresentando-se como uma alternativa complementar na previsibilidade de zonas geotecnicamente instáveis, principalmente em locais de difícil acesso aos métodos convencionais. Essa ampla amostragem espacial foi feita de forma não invasiva e pode contribuir, futuramente, para uma otimização significativa dos trabalhos de monitoramento geoestrutural, não só pela indicação mais precisa dos pontos e/ou zonas de instabilidade estrutural, mas também na quantidade de instrumentos geotécnicos tradicionais e seu posicionamento no interior da cavidade.

É importante ressaltar que os métodos geofísicos não substituem as medidas diretas, mas fornecem indicadores indiretos contínuos em 2D ou 3D que, uma vez calibrados com dados oriundos de investigações diretas, permitem uma avaliação espacial mais completa. A comparação entre os métodos geofísicos e as investigações diretas (*e.g.* furos de sondagens rotativa, perfilagem geofísica, mapeamento em face de talude) serviram para balizar as respostas geofísicas à realidade espeleológica do local, fornecendo insumos técnicos satisfatórios para a construção de modelos mais precisos.

O entendimento de quais informações são retiradas de cada uma das metodologias (diretas e indiretas) e inseridas na análise integrada, estágio mais avançado do processo, depende da interpretação conjunta dos dados, qualificando as feições detectadas e

correlacionando-as aos aspectos geológicos intrínsecos. A partir desse modelo, é possível perceber as relações entre os materiais interpretados e correlacioná-los a situações geotecnicamente possíveis e fundadas.

Em relação aos resultados geoeletricos, foi possível realizar ponderações para a identificação do perfil de laterização e seus litotipos, análises de instabilização estrutural de teto e avaliação de resistência à compressão uniaxial da cavidade e maciço de entorno:

1. Identificação do Perfil de Laterização e Litotipos: Por meio dos perfis geoeletricos foi possível diferenciar os horizontes lateríticos típicos da região dos platôs de Carajás relacionados: Crosta Laterítica, Horizonte de Transição e Saprolito, assim como os litotipos associados (Crosta Laterítica Detrítica, Crosta Laterítica Ferruginosa, Formação Ferrífera Laterítica, Laterita Ferro-Aluminosa e Saprolito de Rocha Ferrífera);
2. Caracterização e Detalhamento do Horizonte de Transição: O estudo do modelo hipotético de retroanálise elaborado neste trabalho permitiu concluir que a resposta do Horizonte de Transição frente ao método da Eletrorresistividade (CE) depende, diretamente, das condições de contorno (como, por exemplo, a presença de uma camada mais condutiva) assim como a resistividade das rochas no entorno. Portanto, para as questões de identificação de vazios em subsuperfície, os resultados demonstraram a dificuldade do reconhecimento de vãos nos terrenos ferruginosos em virtude da ambiguidade das possíveis interpretações;
3. Análise de Instabilização Estrutural de Teto: A análise do mapa de prováveis instabilizações elaborado pelas assinaturas geoeletricas e a comparação com o mapa litoestrutural do teto da cavidade N4E-0022 mostraram que a maior parte das anomalias elucidadas encontra-se no domínio mapeado por Crosta Laterítica, justamente em regiões de contato entre a Formação Ferrífera (Horizonte de Transição) e a Canga Detrítica. A característica composicional (*e.g.* matriz mais argilosa) e/ou estrutural (*e.g.* microfraturas) da canga acaba por reter umidade/água nestes contatos, desenvolvendo pontos de maior fragilidade e alteração nas interfaces com o horizonte inferior. Tais horizontes mostram-se como principais reguladores na gênese de cavidades.
4. Avaliação de Resistência à Compressão Uniaxial: A geofísica mostrou-se como uma ferramenta de possibilidades satisfatórias e favoráveis ao auxílio/suporte para os

principais sistemas de classificação geomecânica. Também revelou como um instrumento adicional para validação/caracterização da resistência à compressão uniaxial, principalmente em regiões onde a viabilidade operacional/física é limitada a ensaios expeditos de campo e de pouca precisão. É importante ressaltar que, mesmo fornecendo informações de resistência à compressão uniaxial inferidas indiretamente, tal parâmetro constitui apenas um de vários requisitos que alimentam os sistemas de classificação geomecânica existentes e aplicados a cavidades (*e.g.* RMR, Sistema Q, IGC).

Em relação aos resultados de GPR, foi possível estabelecer análises de instabilizações de teto e a identificação de planos de descontinuidades, mediante as seguintes conclusões:

1. Análise da Instabilidade Estrutural de Teto: As regiões atenuadas nos dados de GPR e zonas de maior condutividade elétrica (Contraste Baixo Resistivo) nos dados geoeletricos apresentaram satisfatória correspondência com zonas de baixa instabilidade no teto. Portanto, corroboraram para uma interpretação coerente e mais próxima da realidade geotécnica da cavidade;
2. Identificação de Planos de Descontinuidades: O padrão NW-SE é distinguível como principal direção de fraqueza desta região mapeada, o que pode ser verificado também nos traços de relevo em imagem aérea (*trends* regionais), assim como referências bibliográficas de cunho regional e local (N50W/subvertical, N60W/subvertical e N70W/subvertical). Portanto, encontra-se em consonância com a expectativa estrutural do local e pode ser considerado como o *trend* mais persistente e abundante, que acaba por controlar a percolação de água no setor assim como o desenvolvimento/expansão da cavidade. O padrão NE-SW é, subordinadamente, menos significativo, mas aparece com considerável presença nos mapeamentos estruturais locais (N40E/65SE). Desta forma, também apresenta influência no direcionamento das cavidades, em todas as escalas.

A interpretação conjunta dos métodos geofísicos (Eletrorresistividade e GPR) aplicados à espeleologia mostrou-se satisfatória e de grande potencial elucidativo a partir do fato que esses métodos trabalham com princípios físicos diferenciados, comparando e confirmando feições correspondentes ou relatando possíveis discordâncias com a realidade, que possam ocorrer. Os avanços em geotecnologias, tanto para as aquisições

geofísicas quanto para o modelamento numérico dos dados adquiridos, configuram importantes ferramentas de apoio aos estudos espeleológicos, principalmente em locais onde as investigações mais invasivas (como, por exemplo, sondagens rotativas) são cerceadas e o mapeamento direto torna-se difícil pelas condições físicas do meio.

7.2. SUGESTÕES DE PESQUISAS COMPLEMENTARES

Como potenciais estudos complementares ao escopo da pesquisa desenvolvida neste trabalho, são feitas as seguintes recomendações:

1. Aumentar a extensão das seções de Eletrorresistividade (CE) na cavidade N4E-0022, de modo a possibilitar o imageamento de maiores profundidades e, conseqüentemente, alcançar salões em que as cavidades estão realmente inseridas. Sugere-se o espaçamento entre eletrodos de 2,8 metros, tornando o perfil com o comprimento total de 175 metros, aproximadamente, satisfatório para imagear as feições de interesse para a campanha geofísica;
2. Aferir o mapeamento geotécnico da cavidade com o Índice Geotécnico de Cavernas (IGC), utilizando-se como inputs as informações obtidas através dos métodos geofísicos combinados (Elétrico e Eletromagnético), de forma a potencializar a indicação de pontos/zonas de instabilidade estrutural de teto e descontinuidades com geometrias desfavoráveis. Desta forma, o mapeamento avançado dos vãos com utilização do IGC poderá ser desenvolvido de modo mais detalhado e preciso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, J. C. (2005). Radar de Penetração no Solo (GPR): Aspectos geofísicos e geodésicos, processamento e análises em pavimento flexível. Dissertação de mestrado. Recife, Pernambuco, Brasil;
- ALLEN, J. R. L. (1982). *Sedimentary Structures: their character and physical basis. Vol. 1, Developments in sedimentology*, Vol. 30A, Elsevier, Amsterdam: 593 p;
- AMARAL, G. (1974). Geologia Pré-cambriana da Região Amazônica. 1974. 212 f. Tese (Livre Docência) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo;
- AMORIM, L. F.; LUZZI, L. A. C.; TAPIA, C. C. H.; BARBOSA, M. R.; REZENDE, A. F. (2016). Influência do posicionamento de geofones e sua interferência na acurácia de resultados sísmográficos em cavidades naturais subterrâneas. *In: 48º Congresso Brasileiro de Geologia*, Porto Alegre;
- ANNAN, A. P.; COSWAY, S. W. (1992). *Ground penetrating radar survey design. Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, Vol. 2, pp. 329-352;
- ARAÚJO, O. J. B.; MAIA, R. G. N. (1991). Serra dos Carajás: folha SB.22-Z-A. Estado do Pará. Escala 1:250.000. Texto explicativo. Brasília: DNPM/CPRM. 164 p. il. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil (PLGB);
- ARAÚJO, R. N. (2016). Levantamento de parâmetros geomecânicos de uma cavidade natural subterrânea utilizando tecnologias de *laser scanner* 3D e realidade virtual. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Escola de Minas (Núcleo de Geotecnia), Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto – MG;
- AULER, A.; PILÓ, L. B.; PARKER, C. W.; SENKO, J. M.; SASOWSKY I. D.; BARTON, H. A. (2014). *Hypogene cave patterns in iron ore caves: convergence of forms or processes?* Karst Waters Institute. Special Publication, 18: 15-19;
- AULER, A. S.; PILÓ, L. B. (2015). *Caves and Mining in Brazil: The dilemma of cave preservation within a mining context. In: Hydrogeological and environmental investigations in Karst Systems*. Tuscaloosa: Springer. p. 487-496;
- BARBOSA, M. R.; DE PAULA, R. G.; BRAGA, M. A.; BRANDI, I. V.; CLAUVER, C.; MATOS, J.; SEBASTIÃO, C. (2016a). Aplicação do Método *Ground Penetrating Radar* (GPR) no Mapeamento Geoestrutural de Cavidades Naturais Subterrâneas em Terrenos Ferríferos – Estudo de Caso da Mina N4E, Carajás. *In: Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas - SBMR*, Belo Horizonte;
- BARBOSA, M. R.; DE PAULA, R. G.; BRAGA, M. A.; BRANDI, I. V.; CLAUVER, C.; MATOS, J.; DIAS, L.S.O. (2016b). Métodos Geofísicos Aplicados a Coberturas Lateríticas com Feições Pseudocársticas na Mina de Ferro N4E, Carajás. *In: VII Simpósio Brasileiro de Geofísica – SimBGF*, Ouro Preto. MG;

- BARBOSA, M. R.; BRAGA, M. A. S.; BRANDI, I. V.; DE PAULA, R. G.; ARAÚJO, R. N.; PROSDOCIMI, G. A. S.; DIAS, L. S. O. (2017). Geofísica Rasa na Investigação Geológica-Geotécnica de Cavidades Naturais Subterrâneas na Mina de Ferro N4E, Carajás. In: *15th International Congress of the Brazilian Geophysical Society*, Rio de Janeiro;
- BARBOSA, M. R. (2018). GEOFÍSICA ESPELEOLÓGICA -Metodologia para Aplicação de Eletorresistividade na Investigação de Instabilidade Litoestrutural de Teto em Cavidades Ferríferas. Caverna N4E-0026, Mina N4EN, Carajás, PA, Brasil. Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Tese de Pós-Doutorado, 97p.;
- BASU, A. & Aydin, A. (2005). *Predicting uniaxial compressive strength by point load test: Significance of cone penetration. Rock Mechanics and Rock Engineering*;
- BEISIEGEL, V. R. *et al.* (1973). Geologia e recursos minerais da Serra dos Carajás. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 3, n. 4, p. 215-242;
- BIENIAWSKI, Z. (1989). *Engineering Rock Mass Classification: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. [s.l.] John Wiley & Sons;
- BORGES, W. R. (2002). Investigações geofísicas na borda da Bacia Sedimentar de São Paulo, utilizando-se GPR e Eletorresistividade. Dissertação de Mestrado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 153 pp;
- BRAGA, A. C. O. (2006). Métodos da eletorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de água subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática. 2006. 121 f. Tese (Livre Docência) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro;
- BRAGA, M. A. (2009). Aplicação de aerogravimetria gravimétrica 3D-FTG na prospecção de minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero (MG) e modelagem 2D e 3D para estimativa de massa do depósito de ferro de N1 em Carajás (PA). UFRJ, *Brazil*, Ph.D. Thesis, p. 271;
- BRAGA, A. A. J.; FIORI, A. P.; GONÇALVES, D. F.; COSTA, F. R. (2017). Influência estrutural sobre cavernas em formações ferríferas, Carajás - PA. *Geonomos*, v. 25, p. 24-39;
- BRANDI, I. V.; ARAÚJO, R. N.; FRIGO, F. G. (2016). Estudos geomecânicos de uma cavidade em formação ferrífera localizada no município de Itabirito (MG). Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Anais... In: XVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA. Belo Horizonte/MG - Brasil: Sociedade Brasileira de Mecânica das Rochas;

- BRANDI, I. V. (2018). Índice Geotécnico de Cavernas em Terrenos Ferríferos. 2018. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Tese de Doutorado, 186 p. (no prelo);
- BRASIL (1988). Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília: Senado Federal;
- BRASIL (2004). Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução do CONAMA N° 347, de 13 de setembro de 2004. Dispõe sobre a proteção do patrimônio espeleológico. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 13 set. 2004;
- BRASIL (2008). Decreto Federal Nr. 6.640, de 07 de novembro de 2008. Fornece nova redação ao Decreto Nr. 99.556, de outubro de 1990, e estabelece critérios para a análise da relevância das cavidades naturais subterrâneas;
- BRASIL (2009). Ministério do Meio Ambiente. Instrução Normativa n° 02, de 20 de agosto de 2009. Institui a metodologia de classificação do grau de relevância de cavidades naturais subterrâneas. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, n. 160, p. 68-69, 21 ago;
- BRASIL (2017). Instrução Normativa n° 01 de 24 de janeiro de 2017. Estabelecer procedimentos para definição de outras formas de compensação ao impacto negativo irreversível em cavidades naturais subterrâneas com grau de relevância alto, Ministério do Meio Ambiente, ICMBio;
- BRASIL (2017). Instrução Normativa n° 02 de 30 de agosto de 2017. Define a metodologia para a classificação do grau de relevância das cavidades naturais subterrâneas, conforme previsto no art. 5° do Decreto n° 99.556, de 1° de outubro de 1990, Ministério do Meio Ambiente, ICMBio;
- BROWN, E. T. (1981). *Rock Characterization Testing and Monitoring - ISRM Suggested Methods*. Pergamon Press. Great Britain. 211p;
- CALUX, A. S. (2013). Gênese e desenvolvimento de cavidades naturais subterrâneas em rochas ferríferas no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais/Instituto de Geociências. 220 p;
- CAMPBELL, C. V. (1967). *Lamina, laminaset, bed and bedset*. – In: *Sedimentology*, 8: p. 7-26;
- CARDARELLI, E.; CERCATO, M.; CERRETO, A.; DI FILIPPO, G. (2010). *Electrical resistivity and seismic refraction tomography to detect buried cavities*, *Geophysical Prospecting*, 58(4), 685-695;
- CARDOSO, L. H. (2016). Investigação geofísica na prospecção de cavidades naturais em litotipos ferríferos na região de mariana, sudeste do Quadrilátero Ferrífero, Brasil. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola de Minas (Departamento

de Engenharia de Minas - DEMIN), Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto – MG;

CARNEIRO, C. C. (2005). Interpretação de Dados de Sensores Remotos e Aerogeofísicos como Ferramenta na Análise Estrutural da Área Centro-Oeste do Sistema Transcorrente Carajás (PA). Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 86 p;

CARMO, F. F.; SALGADO, A. A. R.; JACOBI, C. M. (2011). Novo sítio espeleológico em sistemas ferruginosos, no Vale do Rio Peixe Bravo, norte de Minas Gerais, Brasil. *Espeleo-Tema*, 22: 25-39;

CARSTE (CARSTE CONSULTORES ASSOCIADOS LTDA.), (2013). EIA – Global Serra Norte. Diagnóstico e Análise de Relevância. Belo Horizonte, 300p.;

CASTRO, P. T. A. (2008). Cangas: a influência da geodiversidade na biodiversidade. *In: Simpósio Afloramentos Ferruginosos no Quadrilátero Ferrífero: Biodiversidade, Conservação e Perspectivas de Sustentabilidade*. Belo Horizonte, 30-51 p. CD;

CECAV - Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Caverna. (2012). Brasil ultrapassa 10.000 cavernas conhecidas. *Espeleo Info*. Boletim Eletrônico do CECV, Brasília - Ano 3. Edição Especial;

CECAV - Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Caverna. (2018). Anuário estatístico do patrimônio espeleológico brasileiro 2018. Brasília, Ano 1, Número 1, 17 p;

CHALIKAKIS, K.; PLAGNES, V.; GUERIN, R.; VALOIS, R.; BOSCH, F. P. (2011): *Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: an overview*. *Hydrogeology Journal*, 19, 1169–1180;

CHEMALE, F. JR.; QUADE, H.; SANTANA, F. C. (1987). *Economic and structural geology of the Itabira Iron District, Minas Gerais, Brazil*. *Zbl. Geol. Paläontol.*, VI (7/8): 743 – 752;

COELHO, A.; PILÓ L. B.; AULER, A.; BESSI, R. (2010). Espeleologia da área do Projeto Apolo, Quadrilátero Ferrífero, MG. *Carste Consultores Associados*, 179 p. Inédito;

COOK, K. L.; VAN NOSTRAND, R. G. (1954): *Interpretation of resistivity data over filled sinks*. *Geophysical Prospecting*, 21, 716–723;

COSTA L. P. (2007). Caracterização das sequências metavulcanossedimentares da porção leste da Província Mineral Carajás, Pará. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais, 113p;

COSTA R. T. (2007). Análise de dados de cargabilidade, resistividade elétrica e susceptibilidade magnética na Mina do Brucutu, MG. Instituto de Geociências,

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Dissertação de Mestrado, 122p;

- CVRD/CMM. Distrito Ferrífero da Serra dos Carajás. (1972). *In: Congresso Brasileiro de Geologia*, 26. Resumos das Comunicações. Belém: SBG - Núcleo Norte. v. 2, p. 78-80;
- DALSTRA, H.; FLIS, M. (2008). *High-grade iron ore exploration in an increasingly steel-hungry world: The past, current and future role of exploration models and technological advances. Reviews in Economic Geology*, 15: 393–409;
- DANIELS, J. J., J. BROWER, F.; BAUMGARTNER. (1998). *High-resolution GPR at Brookhaven National Laboratory to delineate complex subsurface targets, J. Environmental & Engineering Geophysics*, 3, 1, 1-6;
- DAVIS, J. & ANNAN, A., (1989). *Ground-penetrating radar for highresolution mapping of soil and rock stratigraphy. Geophysics. Prospect.*, 37, 531-551;
- DIAS, C. R. C.; MUNARO, P.; DUTRA, G.; PROUS, X.; BRANDI, I. V. (2014). Adequação da área de influência em cavidades naturais subterrâneas situadas na área diretamente afetada por lavra de minério de ferro em serra norte, Carajás, PA. *In: 47º Congresso Brasileiro de Geologia*, Rio de Janeiro. P;
- DOCEGEO (RIO DOCE GEOLOGIA E MINERAÇÃO). (1988). Revisão litoestratigráfica da província mineral de Carajás. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 35, Belém. Província Mineral de Carajás – Litoestratigrafia e principais depósitos minerais: Anexo aos anais... CVRD/SBG: p.11-59;
- DORR, J. V. N. (1964). *Supergene iron ores of Minas Gerais, Brazil. Econ. Geol.*, 59 (7): 1203 – 1240;
- DUTRA, G. (2013). Síntese dos processos de gênese de cavidades em litologias de ferro. *In: RASTEIRO, M. A.; MORATO, L. (orgs.) Congresso Brasileiro de Espeleologia*, 32, 2013. Barreiras, BA. Anais... Campinas: SBE, p. 415- 426;
- DUTRA, G. (2017). Análise de susceptibilidade de duas cavidades em litologia de ferro na Serra do Gandarela, MG. Estudo de caso: AP_0009 e AP_0038. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, p. 89;
- DUTTA, N.; BOSE, R.; SAIKIA, B. (1970): *Detection of solution channels in limestone by electrical resistivity method. Geophysical Prospecting*, 18, 405–414;
- EICHLER, J. (1967). *Das physikalische Millieu bei der Verwitterung von Itabiriten in Minas Gerais/Brasilien. Chemie der Erde*, 26 (2): 119 – 132;
- FRANCSIK, T. & NYARI, Z. (1999). *Processing of geoelectric cavity detection data using deconvolution filtering method. In: Proceedings for the EAGE 61st Conference and Technical Exhibition*, Helsinki, Finland;

- FIGUEIREDO E SILVA R. C. (2009). Evolução e gênese do minério de ferro hidrotermal nos depósitos da Serra Norte, Província Mineral de Carajás. Tese de Doutorado, UFMG, Belo Horizonte. pp 236;
- FLIS, M. (2008). *Advances in geophysics applied to the search for banded iron formation-related, high-grade hematite iron ore. Reviews in Economic Geology*, 15: 381–392;
- FONSECA, L. (2014). Avaliação de métodos de perfilação geofísica na pesquisa de minério de ferro – estudo de caso: definição de contatos litológicos na Mina de Capanema, MG. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Escola de Minas (Núcleo de Geotecnia), Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto – MG;
- GANDOLFO, O. C. B. (2007). Um estudo do imageamento geoeletrico na investigação rasa. 2007. 215f. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo;
- GAMA, M. F. P.; BARBOSA, M. R.; BRANDI, I. V.; BRAGA, M. A. S. (2018). Caminhamento elétrico aplicado ao mapeamento de cavidades naturais em minério de ferro, Carajás (PA). In: 49º Congresso Brasileiro de Geologia, Rio de Janeiro;
- GIBBS, A. K. *et al.* (1986). *Age and composition of the Grão Pará Group volcanics, Serra dos Carajás. Revista Brasileira de Geociências*, v. 16, n. 2, p. 201-211;
- GIBBS, A. K.; WIRTH, K. R. (1990). *Geologic setting of the Serra dos Carajás iron deposits. In: CHAUVEL, J.J. et al. (Ed.). Ancient Banded Iron Formations (Regional Presentations). Athens, Greece: Theophrastus Publications, S.A., p. 83-102;*
- GONÇALVES, L. (2013). Estudo geoarqueológico com Georadar. Aplicação aos contextos arqueológicos da Pré-História recente à Proto-História do NW de Portugal. Dissertação de Doutorado, Universidade do Minho, Portugal;
- GONCALVES, D. F.; DE PAULA, R. G.; BARBOSA, M. R.; TELES, C. A. S.; MAURITY, C. W.; MACAMBIRA, J. B. (2016). *Lateritic terrains and the evolution of pseudokarstic features - case study in the iron ore Mine N4E, Carajás Region - Pará, Brazil. In: 24th World Mining Congress, Rio de Janeiro. 24th World Mining Congress - Sustainability in Mining. Brasília: Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM, 2016. v. 3. p. 242-251;*
- GOVERNO DO ESTADO DE MINAS GERAIS (2016). Decreto Estadual nº 47.041 de 31 de agosto de 2016. Dispõe os critérios para a compensação e a indenização dos impactos e danos causados em cavidades naturais subterrâneas, SEMAD, SUPRAM;
- GREENFIELD, R. J. (1979): *Review of geophysical approaches to the detection of karst. Bull. Assoc. Eng. Geol.*, 16, 393–408;
- GUILD, P. W. (1957). *Geology and Mineral Resources of the Congonhas District. United States Geological Survey Professional Paper 290*, 90 p;

- HARARI, Z., (1996). *Ground-penetrating radar (GPR) for imaging stratigraphic features and groundwater in sand dunes. Journal of Applied Geophysics*, 36: 43-52;
- HENWOOD, W. J. (1871). *On the gold mines of Minas Gerais. – In: Observations on metalliferous deposits. Transactions of the Royal Geological Society of Cornwall* 8: 168-370;
- HILAIRE, S. (1974). *A Viagem pelo Distrito dos Diamantes e Litoral do Brasil*. Trad; Loenam de Azevedo Penna. Belo Horizonte/São Paulo: Editora Itatiaia/USP, 233p;
- HILL, C. A., & FORTI, P., (1997). *Cave minerals of the world (2nd ed.): National Speleological Society*, Huntsville, Alabama, 463 p;
- HÜHN, S. R. B. *et al.* (1999). Descoberta do depósito Cu (Au) Cristalino: geologia e mineralização associada – região da Serra do rabo – Carajás – PA. *In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA*, 6., 1999, Manaus. Resumos expandidos... Manaus: SBG-Núcleo Norte, p. 140-143;
- ISRM. (2007). *The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006*. R. Ulusay & J.A. Hudson (Eds).628 p;
- JOL, H. M. & BRISTOW, C. S. (2003). *GPR in sediments: advice on data collection, basic processing and interpretation, a good practice guide. In: Bristow C.S. & Jol H.M. (eds). Ground Penetrating Radar in Sediments. Geological Society Special Publications*, 9-27 p;
- KATZ, O.; RECHES, Z.; ROEGIERS, J. C. (2000). *Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt hammer. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 37 (4), 723 e 728;
- KELLER, G. V. (1987). *Rock and mineral properties. Investigations in Geophysics, nº 3. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Society of Exploration Geophysicists*, Ed. Misac N. Nabighian, Vol. 1, pp. 13-51;
- LINDENMAYER, Z. G.; ALMEIDA, D. P. M.; LAUX, J. H. (1994). Contribuição a petrologia dos basaltos da Serra Sul, Grupo Grão Pará, Serra dos Carajás. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 38, Camboriú. Resumos expandidos... Camboriú: SBG, 1994a. p. 41-42;
- LIMA, P. H. A.; SOARES, J. A.; ROSA, I. B. C.; CARVALHO, R. F.; BRAGA, M. A.; SILVA, M. D. (2013). *Petrofísica de Minério de Ferro. Sociedade Bras. De Geofísica, 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society*, Rio de Janeiro;
- LOKE, M. H. (2000). *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: a practical guide to 2-D and 3-D surveys*. Austin, 61 p;
- LOPES, G. S.; REZENDE, A. F.; ARRANO, C. C. G.; VERAS, E. S.; AMORIM, L. F. M.; VILALOBOS, M. (2018). *Modelo de Onda Elemental para la Protección de*

Cavidades Naturales em peraciones Mineras. In: 13th Blasting Conference ASIEX. Santiago, Chile;

- MACAMBIRA, J. B. (2003). O ambiente deposicional da Formação Carajás e uma proposta de modelo evolutivo para a Bacia Grão Pará. 2003. 217 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas;
- MACHADO, N.; LINDENMAYER, Z. G.; KROGH, T. E. (1991). U-Pb *Geochronology of archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon Shield, Brazil. Precambrian Research*, v. 49, p. 329-354;
- MANNEY, R.; ROTH, M. J. S.; NYQUIST, J. E. (2005). *Exploring Directional Differences in Resistivity Results in Karst. In: Proceedings for SAGEEP*, Oakland, California, 2005. p. 1117-1124;
- MAURITY, C. W.; KOTSCHOUBEY, B. (1994). Evolução das feições pseudocársticas na cobertura intempérica do platô N-1, Serra dos Carajás - PA. *In: IV Simpósio de Geologia da Amazônia, SBG, Belém*. p. 353-355;
- MAURITY, C. W.; KOTSCHOUBEY, B. (1995). Evolução recente da cobertura de alteração no Platô N1 – Serra dos Carajás - PA. Degradação, pseudocarstificação, espeleotemas. *Boletim do Museu Paraense Emilio Goeldi. Série Ciências da Terra* 7: 331-362;
- MCFARLANE, M. J.; TWIDALE, C. R. (1987). *Karstic features associated with tropical weathering profiles. Zeitschrift fur Geomorphologie Suppl. Bd*, 64: 73-95;
- MCMECHAN, G. A.; LOUKS, R.; ZENG, X. (1998). *Ground Penetrating Radar Imaging of a Collapsed Paleocave System in the Ellenburger Dolomite, Central Texas. Journal of Applied Geophysics*, 39: 1–10;
- MELO, A. T.; SUN, J.; LI, Y. (2017). *Geophysical inversions applied to 3D geology characterization of an iron oxide copper-gold deposit in Brazil. Geophysics*, v. 82, p. K1-K13;
- MEIRELES *et al.* (1984). Geologia das folhas Carajás e Rio Verde, Província Mineral dos Carajás, estado do Pará. *In: Congresso Brasileiro de Geologia. Anais. Rio de Janeiro: SBG, 1984. v.5. 2164-2174 p;*
- MEIRELLES, M. R.; DARDENNE, M. A. (1991). Vulcanismo basáltico de afinidade shoshonítica e ambiente de arco arqueano, Grupo Grão-Pará, Serra dos Carajás, Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 21, n. 1, p. 41-50;
- MILITZER, H.; ROSLER, R.; LOSCH, W. (1979): *Theoretical and experimental investigations for cavity research with geoelectrical resistivity methods. Geophysical Prospecting*, 27, 640–652;
- MITCHUM, R. M. JR.; VAIL, P. R.; THOMPSON, S. (1977). *Seismic stratigraphy and global changes of sea-level, part-2: the depositional sequence as a basic unit for*

stratigraphic analysis. In: PAYTON, C.E. (ed), Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon Exploration. American Association of Petroleum Geologists Memoir, 26: p. 53-62;

MORGAN, F. D.; SHI, D.; VICHABIAN, Y.; SOGADE, J.; RODI, W. (1999). *Resistivity in Cave Exploration. In: Proceedings for SAGEEP, Oakland, California, 1999. p. 303-308;*

NOCE, T. S. (2016). Proposta de zoneamento geotécnico de cavidades naturais em formações ferríferas. 2016. 207 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto - MG, 2016;

NOGUEIRA, P. V.; ROCHA, M. P.; BORGES, W. R.; SILVA, A. M.; ASSIS, L. M. (2016). *Study of iron deposit using seismic refraction and resistivity in Carajás Mineral Province, Brazil. Journal of Applied Geophysics, v. 133, p. 116-122;*

NUNES, C. M. F., (2002). Aplicações do GPR (Ground Penetrating Radar) na caracterização de perfis de alteração de rochas gnáissicas do Rio de Janeiro, dissertação de mestrado, DEC, PUC-Rio, RJ;

OLDENBURG, D. W.; JONES, F. H. M. (2007). *Inversion for Applied Geophysics; Learning resources about geophysical inversion. University of British Columbia, Geophysical Inversion Facility;*

OLHOEFT, G. R. (2000). *Maximizing the information return from ground penetrating radar: J. Applied Geophysics, 43, 175-187;*

OLSZEWSKI, W. J. *et al.* (1989). *The age, origin, and tectonics of the Grão Pará Group and associated rocks, Serra dos Carajás, Brazil: Archean continental volcanism and rifting. Precambrian Research, v. 42, p. 229-254;*

PALMER, A. N. (2009). *Cave Geology*. 2nd edition. Dayton, Ohio: Cave books. 454 p;

PARASNIS, D. S. (1997). *Principles of Applied Geophysics*, Fifth edition. Chapman & Hall, London 121–155;

PARKER, C. W.; AULER, A. S.; SENKO, J.; SASOWSKY, I. D.; PILÓ, L. B.; SMITH, M.; JOHNSTON, M.; BARTON, H. (2013). *Microbial iron cycling and biospeleogenesis: cave development in the Carajás Formation, Brazil. ICS Proceedings. Prague, 442-446;*

PELLERIN, L. (2002). *Applications of Electrical and Electromagnetic Methods for Environmental and Geotechnical Investigations. Surveys in Geophysics, 23, 101-132;*

PEREIRA, M. C. (2012). Aspectos Genéticos e Morfológicos das Cavidades Naturais da Serra da Piedade – Quadrilátero Ferrífero/MG. Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais/Instituto de Geociências. 149 p;

- PEREIRA, W. R. (2017). Perfilagem Geofísica Aplicada à Determinação de Parâmetros Geomecânicos em Maciços Rochosos. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 214 p.;
- PILÓ, L. B.; AULER, A. S. (2005). Cavernas de Minério de Ferro e Canga de Capão Xavier, Quadrilátero Ferrífero, MG. *O Carste*, 17: 92-105;
- PILÓ, L. B.; AULER, A. S. (2009). Geoespeleologia das cavernas em rochas ferríferas da região de Carajás, PA. *In: Congresso Brasileiro de Espeleologia*, 30, Montes Claros. SBE. Anais... p. 181-186;
- PILÓ, L. B.; AULER, A. S. (2011). Mineralogia dos espeleotemas das cavernas ferríferas da região de Carajás, PA. *In: Seminário Vale de Geologia do Minério de Ferro e I Seminário de Espeleologia*. Belo Horizonte. Anais... p. 80-81;
- PILÓ, L. B.; AULER, A. (2011). Introdução à Espeleologia. *In: CECAV. III Curso de Espeleologia e Licenciamento Ambiental*. Brasília: CECAV/ Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, Cap. 1, p. 7- 23;
- PILÓ, L. B.; AULER, A. S.; COELHO, A.; SCHERER, R. (2013). Indícios de bioerosão (paleotocas) em cavernas ferríferas da região de Carajás, Pará. *In: Simpósio Mineiro do Carste – Carste e Cavernas: Minas de Informações*, 2, CNKC/IGC-UFMG. Belo Horizonte. Resumos e pôsteres... p. 39-40;
- PINHEIRO, R. V. L.; HENRIQUES, A. L.; SILVEIRA, L. T.; MAURITY, C. W. (1985). Considerações Preliminares sobre a Espeleologia da Serra dos Carajás (PA). Grupo Espeleológico Paraense. Relatório Inédito, 38p;
- PINHEIRO, R. V. L.; MAURITY, C. W. (1988). As cavernas em rochas intempéricas da Serra dos Carajás (PA) – Brasil. *Anais 1º Congresso de Espeleologia da América Latina e do Caribe*, Belo Horizonte, pp. 179-186;
- PINHEIRO, R. V. L. (1997). *Reactivation history of the Carajás and Cinzento strike-slip systems, Amazon, Brazil*. 1997. 408 f. Tese (Doutorado) - University of Durham, England;
- PISSIS, A. (1842). *Mémoire sur la position géologique des terrains de la partie australe du Brésil, et sur les soulèvements que à diverses époques ont changé le relief de cette contrée*. *Comptes Rend. Acad. Sci. Paris*, 14:1044-1046;
- PORSANI, J. L. (1999). *Ground Penetrating Radar (GPR): Proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado SP*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro - SP, 145p;
- PORSANI, J. L. (2002). Método GPR: Aplicações em geologia, geotecnia, médio ambiente e planejamento urbano. IV Escola de Verão de Geofísica Apostila de curso. IAG, Universidade de São Paulo;

- PROSDOCIMI, G. A. S.; BARBOSA, M. R.; BRANDI, I. V.; BRAGA, M. A. S. (2018). Estudo de cavidade natural em formação ferrífera por meio da integração de métodos geofísicos rasos, Complexo Carajás, Brasil. *In: 49º Congresso Brasileiro de Geologia*, Rio de Janeiro;
- PUTISKA, R.; DOST'AL, I.; KUSNIRAK, D. (2012): *Determination of dipping contacts using electrical resistivity tomography. Contrib. Geophys. Geod.*, 42, 2, 161–180;
- REBOLEIRA, A. S. P. S. (2012). *Biodiversity and conservation of subterranean fauna of Portuguese karst*. Tese de Doutorado. Departamento de Biologia, Universidade de Aveiro. 333 pp;
- RIBEIRO, C. C., (2008). Geologia, geometalurgia, controles e gênese dos depósitos de fósforo, terras raras e titânio do Complexo Carbonatítico de Catalão I, GO, Universidade de Brasília, Brasília;
- ROBER, A.; DE BOSSET, C., (1994). *Application du géoradar à la localisation de cavités, de nids de gravier et de zone karstiques. Journal of Applied Geophysics*, Vol. 31, 197-204 *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 31, 197-204;
- ROBINSON, S; MICHAUD, Y. (1999). *Ground penetrating radar. In: Handbook of Geophysical Techniques for Geomorphic and Environmental Research*. Gilbert, B. Editor, Open file 3731, Geological Survey of Canada, p. 69-102;
- ROSIÈRE, C. A.; CHEMALE, F., JR. (2001). Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero – uma visão geral e discussão. *Geonomos*, 8(2): 27-43;
- SANTOS, J. O. S. (2003). Geotectônica do Escudo das Guianas e Brasil-Central. *In: BIZZI, L.A. et al. (Ed.). Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas e SIG*. Brasília: CPRM-Serviço Geológico do Brasil. p. 169-226, il;
- SANTOS JÚNIOR, E. J. (2017). Modelagem estocástica aplicada na estimativa do raio de proteção de cavidades naturais subterrâneas. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto – MG;
- SHERIFF, R. E. (1991). *Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics*, vol. 3, SEG, Tulsa;
- SILVA, G. G. *et al.* (1974). Geologia. *In: BRASIL*. Departamento Nacional da Produção Mineral. Projeto Radam. Folha SB. 22 - Araguaia e parte da folha SC. 22 - Tocantins: geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro. il. p. I/3- I/143. (Levantamentos de recursos naturais, 4);
- SILVA, M. G. *et al.* (2005). Geologia e mineralizações de Fe- Cu-Au do alvo GT-46 (Igarapé Cinzento), Carajás. *In: MARINI, O. J.; QUEIROZ, E. T.; RAMOS, B. W. (Ed.). Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia*. Brasília: DNPM/CT-Mineral/ ADIMB, 2005. p. 97-151;

- SIMMONS, G. C. (1963). *Canga caves in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. The National Speleological Society Bulletin 25: 66-72;
- SIMMONS, G. C. (1964). *Leucophosphite, a new occurrence in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. The American Mineralogist 49: 377-386;
- SMITH, D. L. (1986): *Application of the pole–dipole resistivity technique to the detection of solution cavities beneath highways*. *Geophysics*, 51, 833–837;
- SOUZA, A. M. (2006). *Uso do GPR na Geração de Modelos Estáticos para o Planejamento de Lavrar de Minerais Pesados Depositados em Dunas Eólicas*. Universidade Federal do Rio Grande do Norte/Programa de Pós-Graduação em Geofísica e Geodinâmica, Natal. Dissertação de Mestrado. 83p;
- SOUZA, F. C. R.; CARMO, F. F. (2015). *Geossistemas Ferruginosos no Brasil in: Geossistemas Ferruginosos do Brasil*, p. 47 – 76, 2015;
- SOUZA, B. E. V. F. (2018). *Caracterização da Capacidade de Armazenamento e de Transmissão de Água em Distintos Maciços de Canga do Quadrilátero Ferrífero (MG)*. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 126 p.;
- SZUNYOGH, G. (2010). *Stability Assessment of Caves and its Results*. *Óbuda University e Bulletin*, 1(1): 243-252;
- TASSINI, R. (1947). *Verdades Históricas e Pré-Históricas de Belo Horizonte antes Curral Del Rey*. Edição do autor;
- TEIXEIRA, J. B. G.; OHMOTO, H.; EGGLER, D. H. (1997). *Elemental and oxygen isotope variations in Archean mafic rocks associated with the banded iron-formation at the N4 iron deposit, Carajás, Brazil*. In: COSTA, M. L.; ANGÉLICA, R. S. (Coord.). *Contribuições à geologia da Amazônia*. Belém: FINEP/SBG. p. 161-203;
- TOLBERT, G. E.; TREMAINE, J. W.; MELCHER, G. C.; GOMES, C. B. (1971). *The recently discovered Serra dos Carajás iron deposits, northern Brazil*. *Economic Geology* 66: 985-994;
- TOPP, G.; DAVIS, J.; ANNAN, A. P. (1980). *Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines*. *Wat. Resources Res.*, 16, 574-582;
- VASQUEZ, M. L.; ROSA-COSTA, L. T. da (Org.). (2008). *Geologia e recursos minerais do Estado do Pará: texto explicativo do mapa geológico e de recursos minerais do Estado do Pará*. Belém: CPRM. 328 p. il. color. escala 1:1.000.000. Programa Geologia do Brasil (PGB);
- VALENTIM, R. F. (2016). *Classificação geomecânica da cavidade natural subterrânea BRU_0005, município de São Gonçalo do Rio Abaixo, MG*. 2016. 151 f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Escola de Minas (Núcleo de Geotecnia), Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto – MG;

VINCENZ, A. (1968): *Resistivity investigations of limestone aquifers in Jamaica*. geophysics, 33, 980–994;

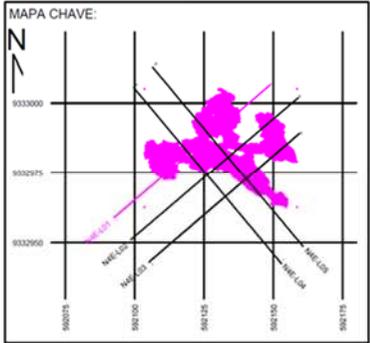
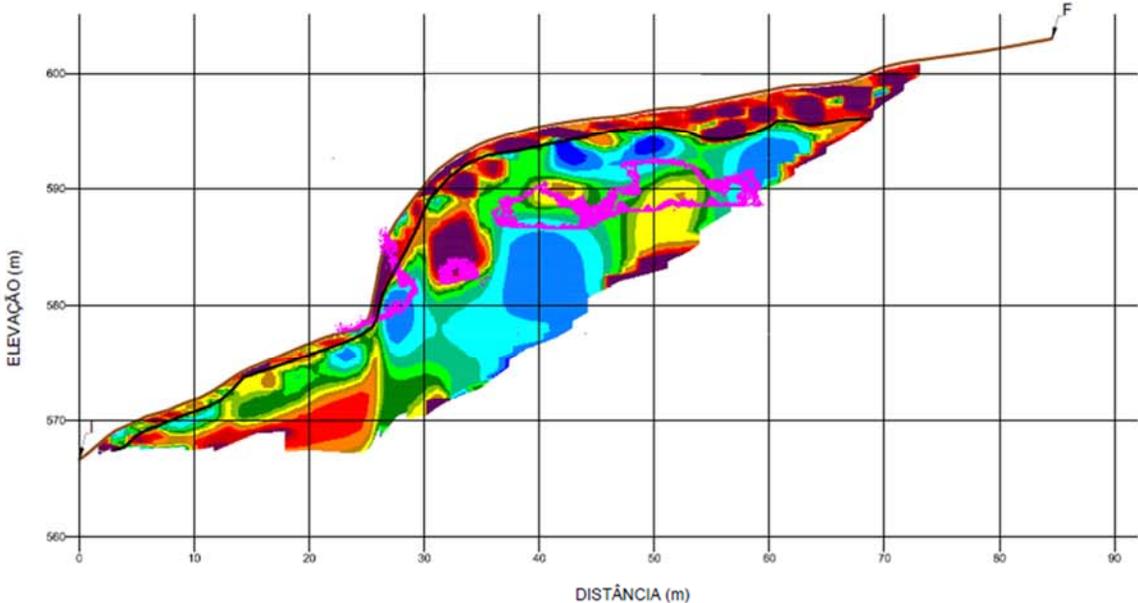
WARD, S. H. (1990). *Resistivity and induced polarization methods: in Geotechnical and Environmental Geophysics*, Vol. 1, Ward, S. H., ed: Society of Exploration Geophysicists;

WOODWARD, J.; ASHWORTH, P. J.; BEST, J. L.; SAMBROOK SMITH, G. H. & SIMPSON, C. J. (2003). *The use and application of GPR in sandy fluvial environments: methodological considerations*. [In:] C.S.Bristow & H.M. Jol (Eds): *Ground penetrating radar in sediments*. Geological Society, London, Special Publications 211, 127–142;

ZUCCHETTI, M. (2007). Rochas máficas do Grupo Grão Pará e sua relação com a mineralização dos depósitos de ferro N4 e N5, Carajás, PA. 2007. Tese (Doutorado em Geologia Econômica Aplicada) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

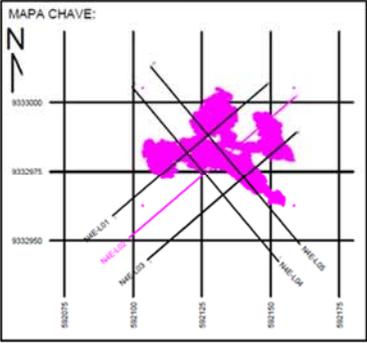
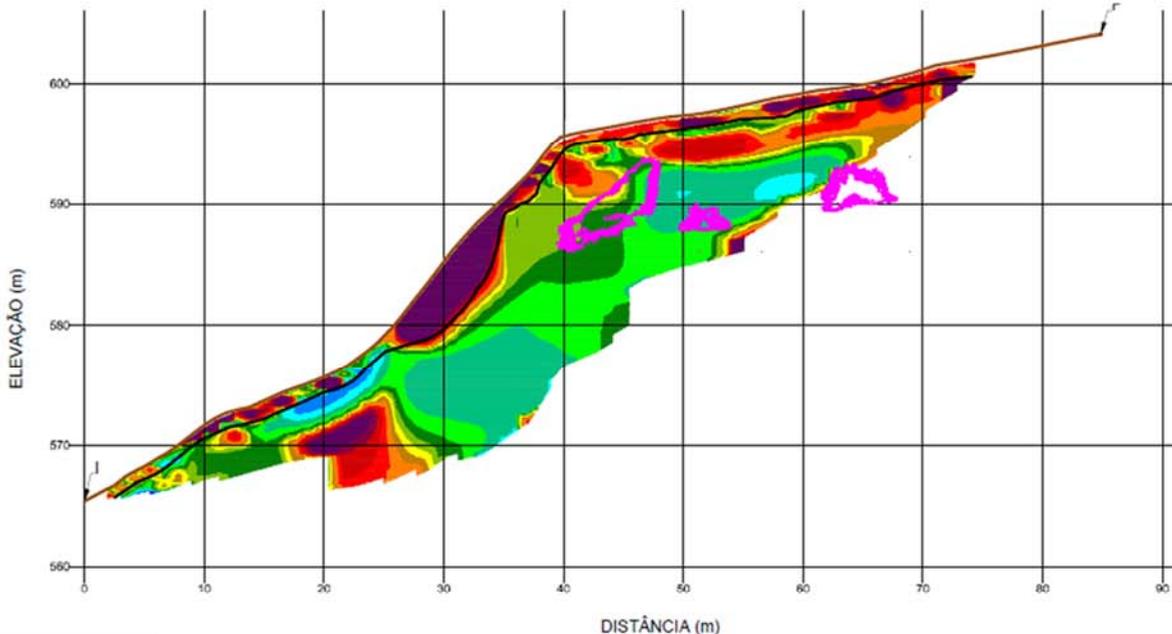
ANEXO I: SEÇÕES DE ELETORRESISTIVIDADE (CE)

SEÇÃO CE-N22E-L01



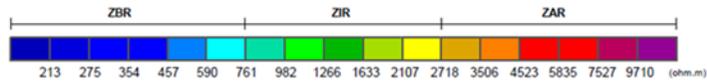
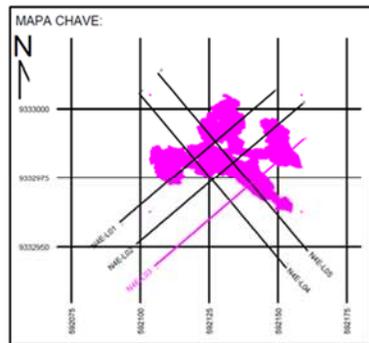
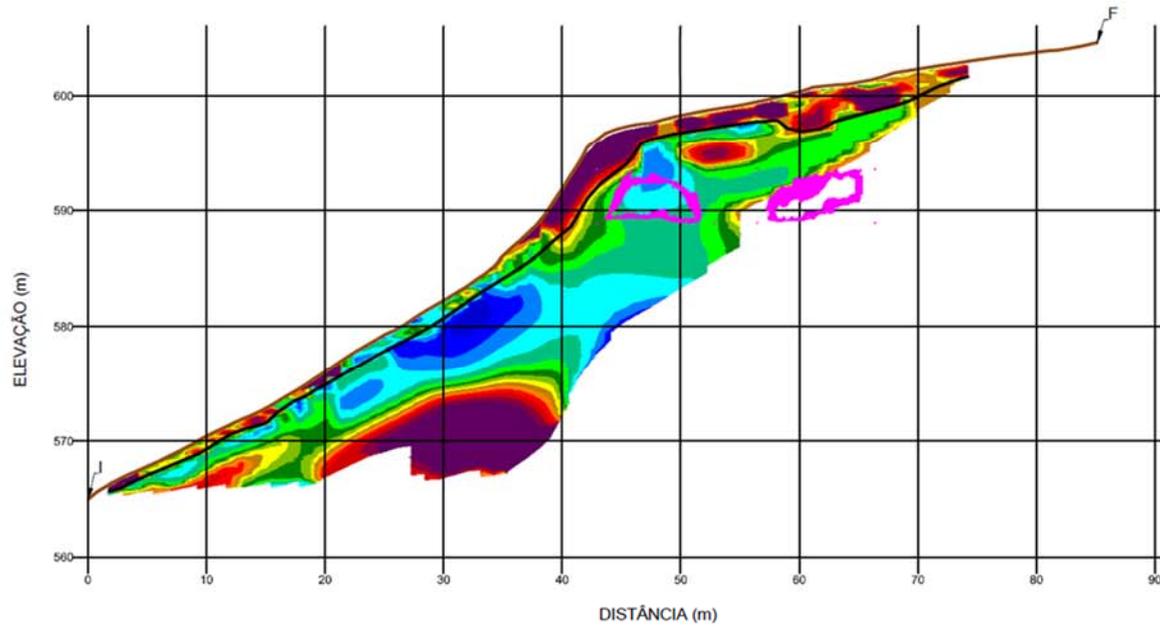
- CE
- Cavidade N4E-0022
- Topografia
- I/F Início / Fim

SEÇÃO CE-N22E-L02



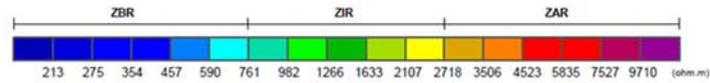
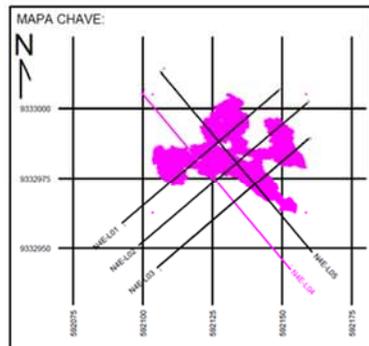
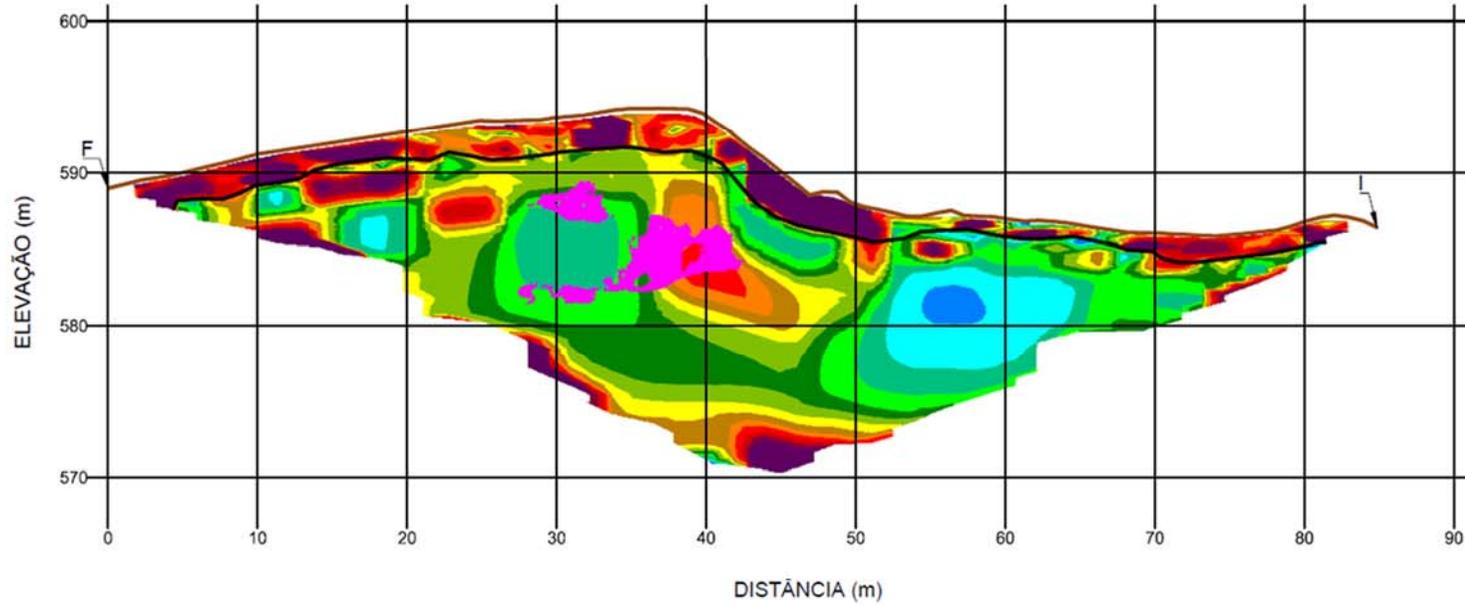
- CE
- █ Cavidade N4E-0022
- Topografia
- I/F Início / Fim

SEÇÃO CE-N22E-L03



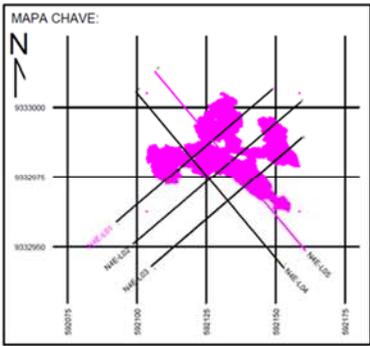
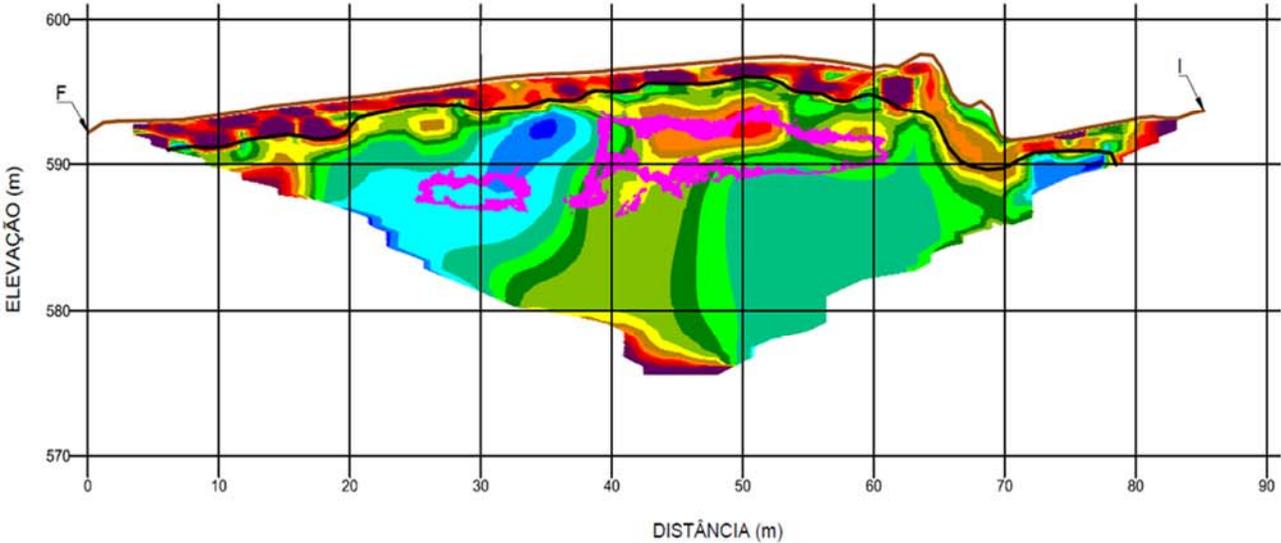
- CE
- ⬭ Cavidade N4E-0022
- Topografia
- I/F Início / Fim

SEÇÃO CE-N22E-L04



- CE
- Caverna N4E-0022
- Topografia
- Início / Fim

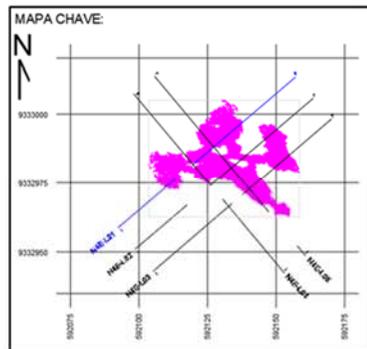
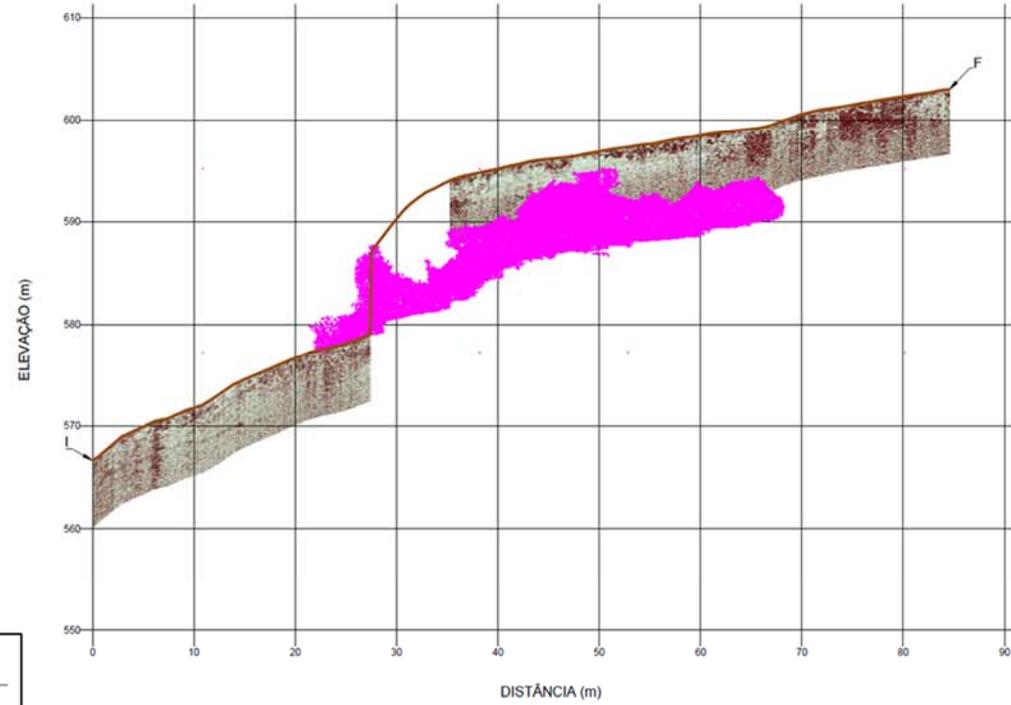
SEÇÃO CE-N22E-L05



- CE
- ⏏ Cavity N4E-0022
- Topografia
- I/F Início / Fim

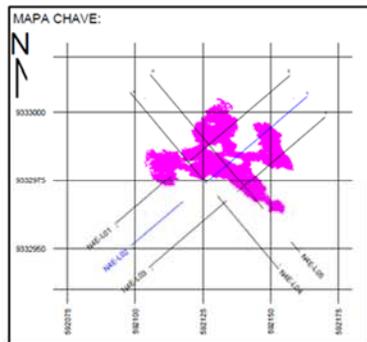
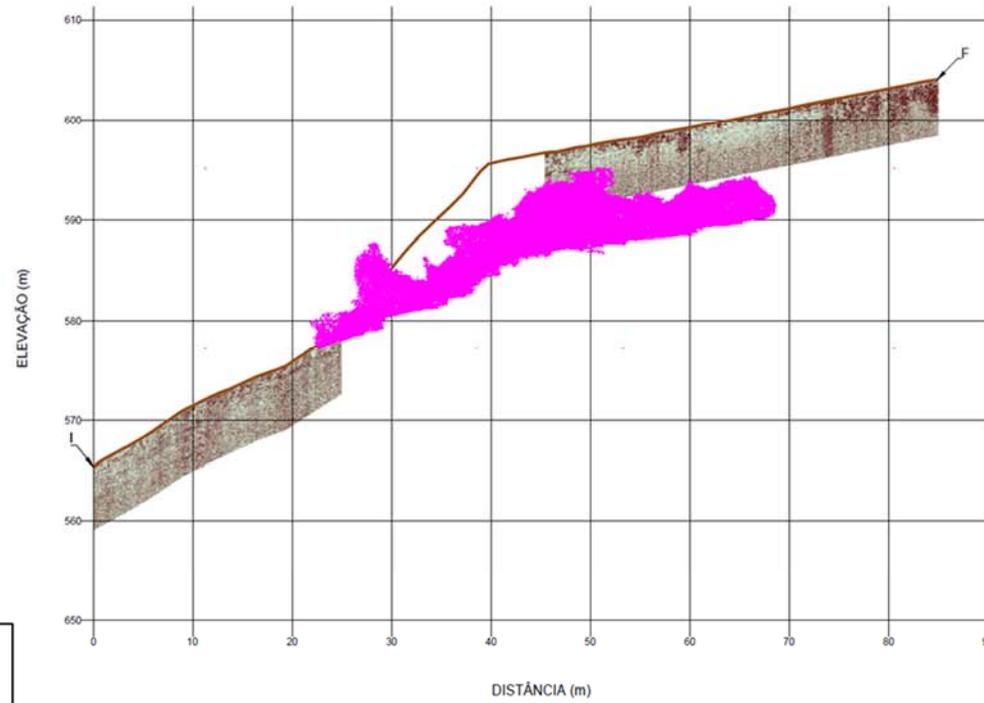
ANEXO II: SEÇÕES DE GPR (PULSEKKO PRO, ANTENA DE 250 MHZ)

SEÇÃO GPR-N22E-L01



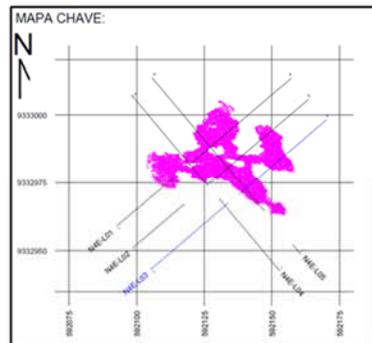
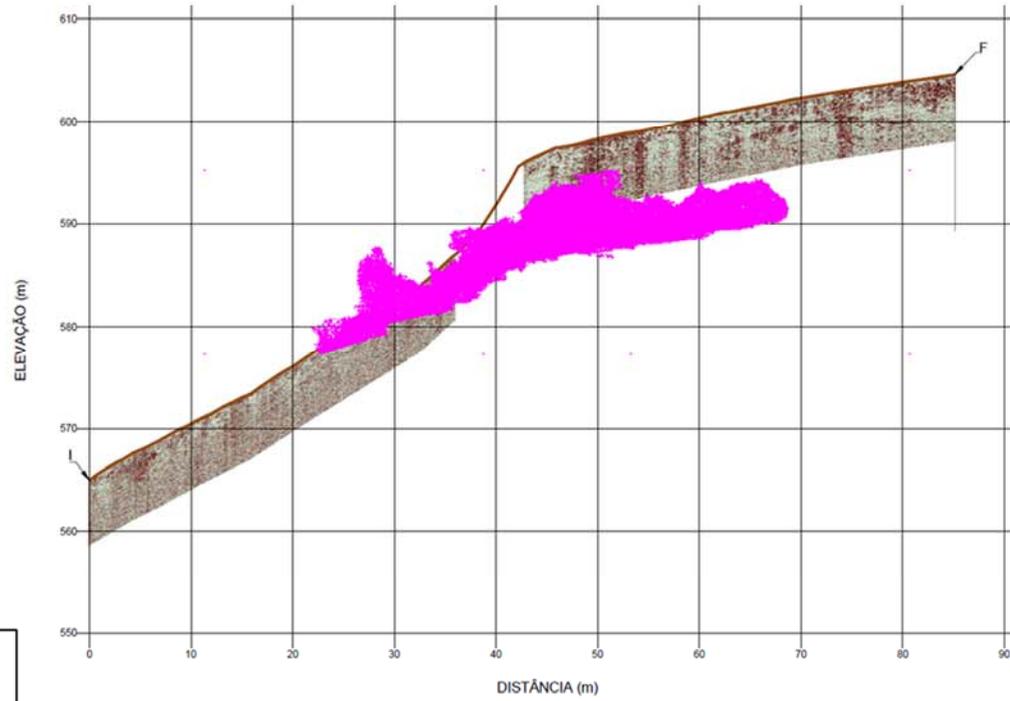
- GPR
- Topografia
- Cavidade N4E-0022
- I/F Início/ Fim

SEÇÃO GPR-N22E-L02



- GPR
- Topografia
- Cavity N4E-0022
- I/F Início / Fim

SEÇÃO GPR-N22E-L03



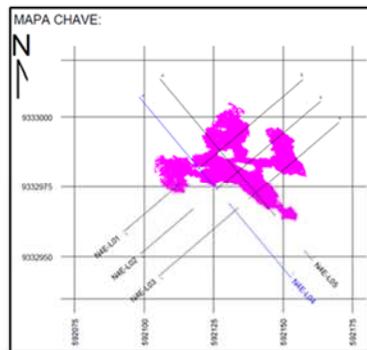
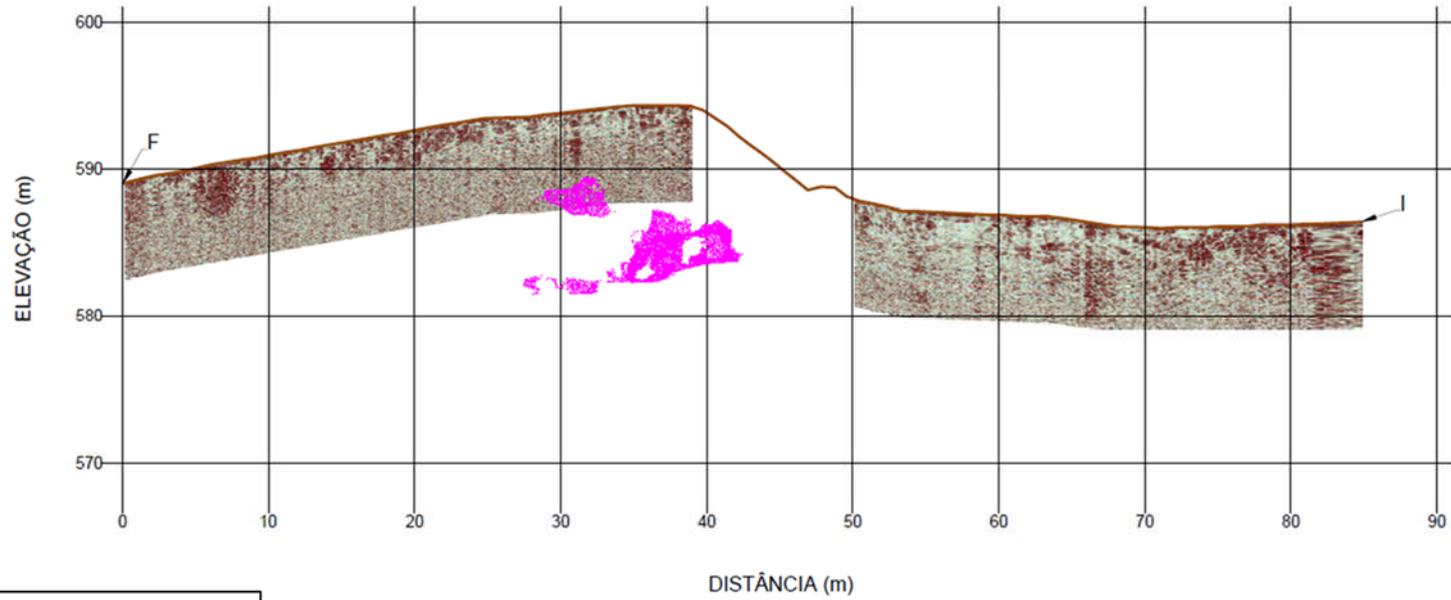
— GPR

█ Cavidade N4E-0022

— Topografia

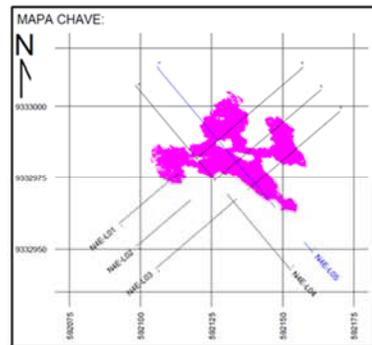
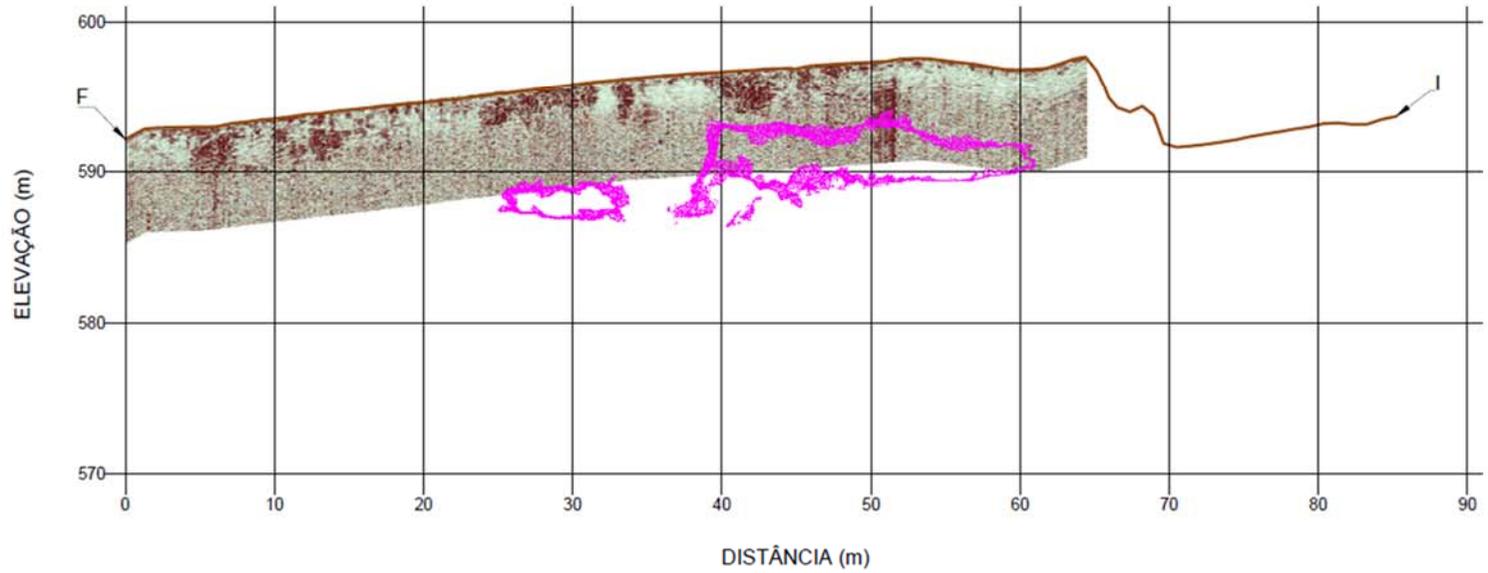
I/F Início / Fim

SEÇÃO GPR-N22E-L04



- GPR
- Topografia
- Cavidade N4E-002
- I/F Início / Fim

SEÇÃO GPR-N22E-L05



— GPR

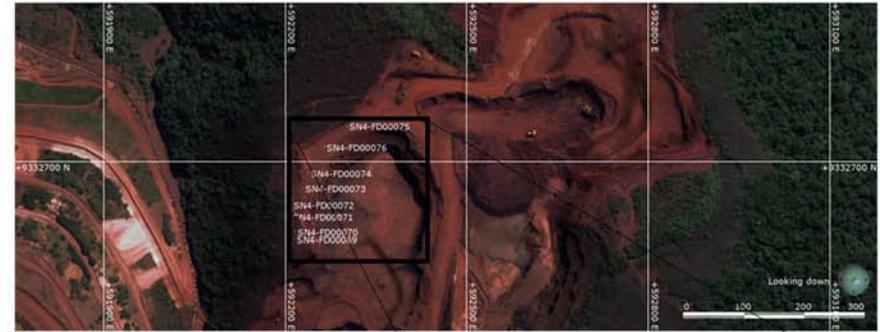
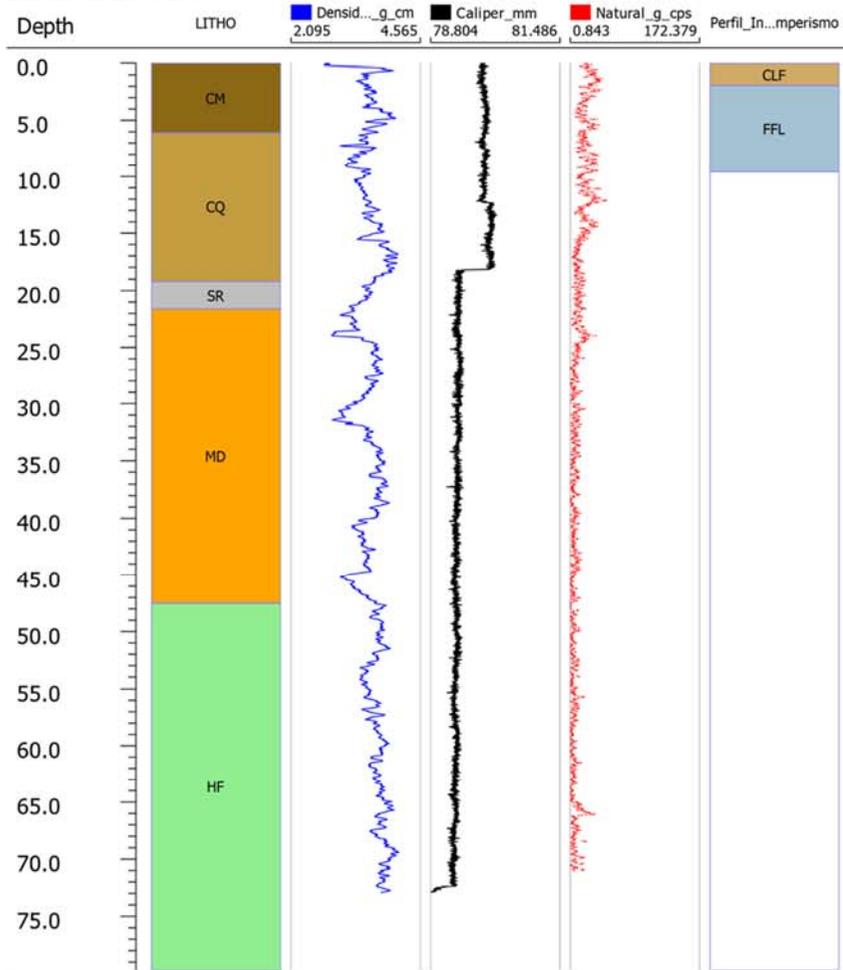
— Topografia

— Cavidade N4E-0022

I/F Início / Fim

**ANEXO III: SONDAGENS ROTATIVAS, PERFILAGEM GEOFÍSICA E
PERFIL DE INTEMPERISMO MAPEADO EM BANCADA**

SN4-FD00069



LEGENDA

● Sondagem SN4-FD00069

Sondagem Rotativa

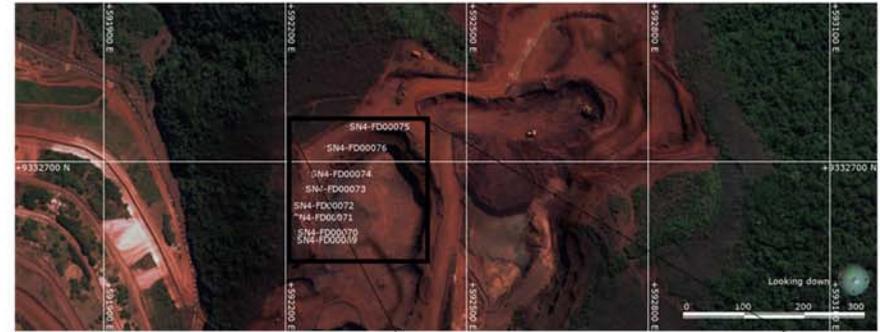
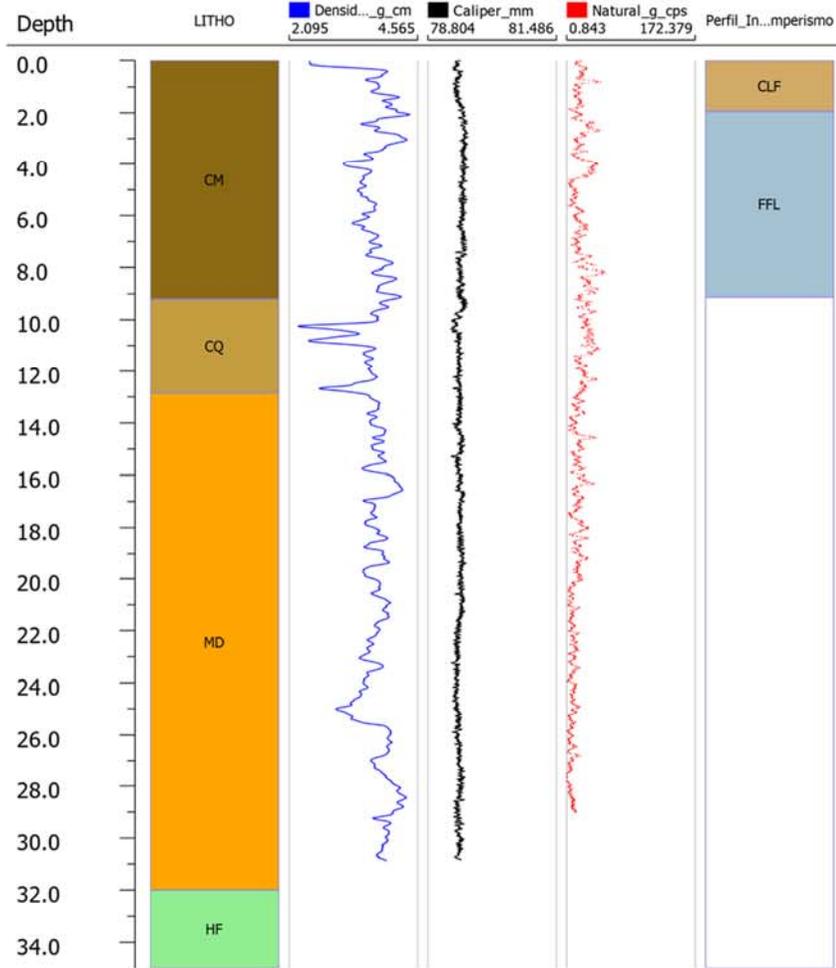
- CM Canga Minério
- CQ Canga Química
- SR Sem Recuperação
- MD Máfica Decomposta
- HF Hematita Friável

Perfil de Intemperismo (Map. Bancada)

- CLF Crosta Laterítica Ferruginosa
- FFL Formação Ferrífera Laterítica



SN4-FD00070



LEGENDA

● Sondagem SN4-FD00070

Sondagem Rotativa

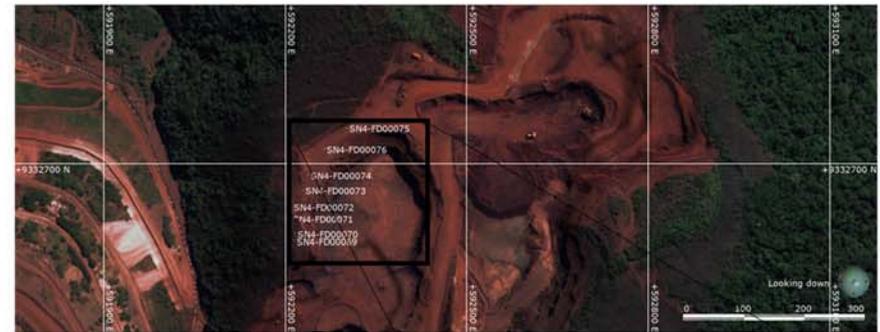
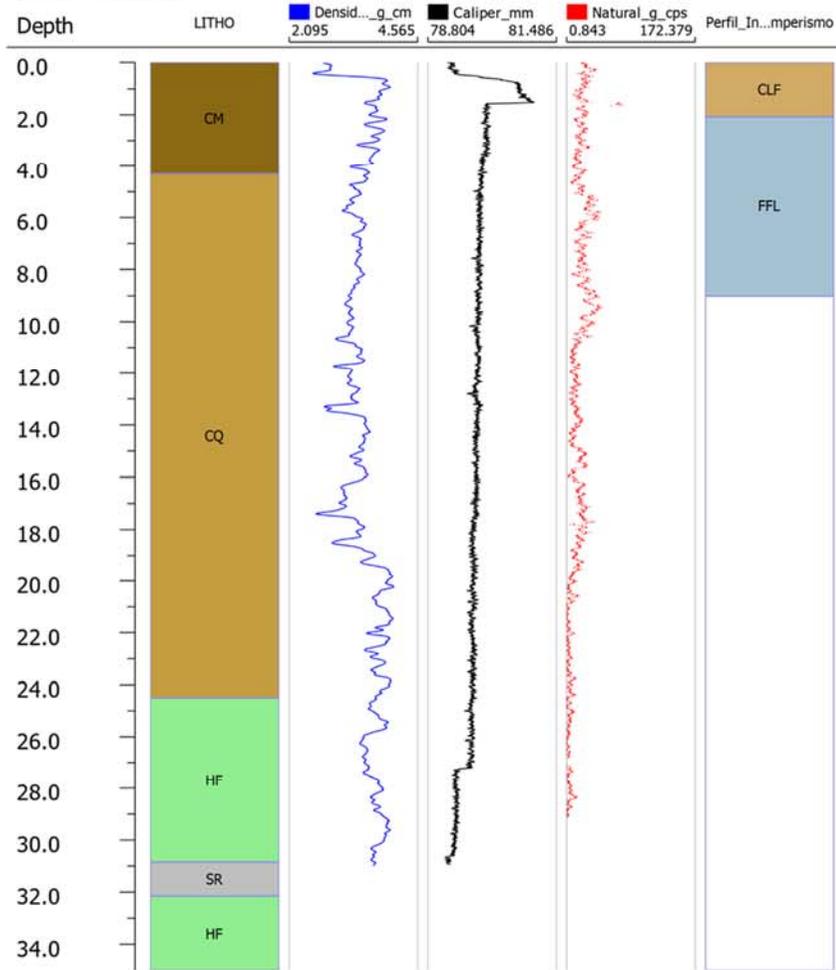
- CM Canga Minério
- CQ Canga Química
- SR Sem Recuperação
- MD Máfica Decomposta
- HF Hematita Friável

Perfil de Intemperismo (Map. Bancada)

- CLF Crosta Laterítica Ferruginosa
- FFL Formação Ferrífera Laterítica



SN4-FD00071



LEGENDA

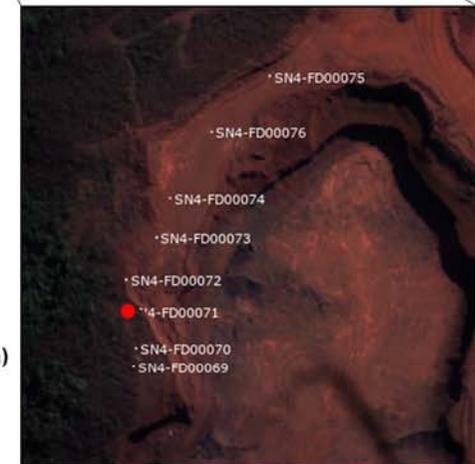
● Sondagem SN4-FD00071

Sondagem Rotativa

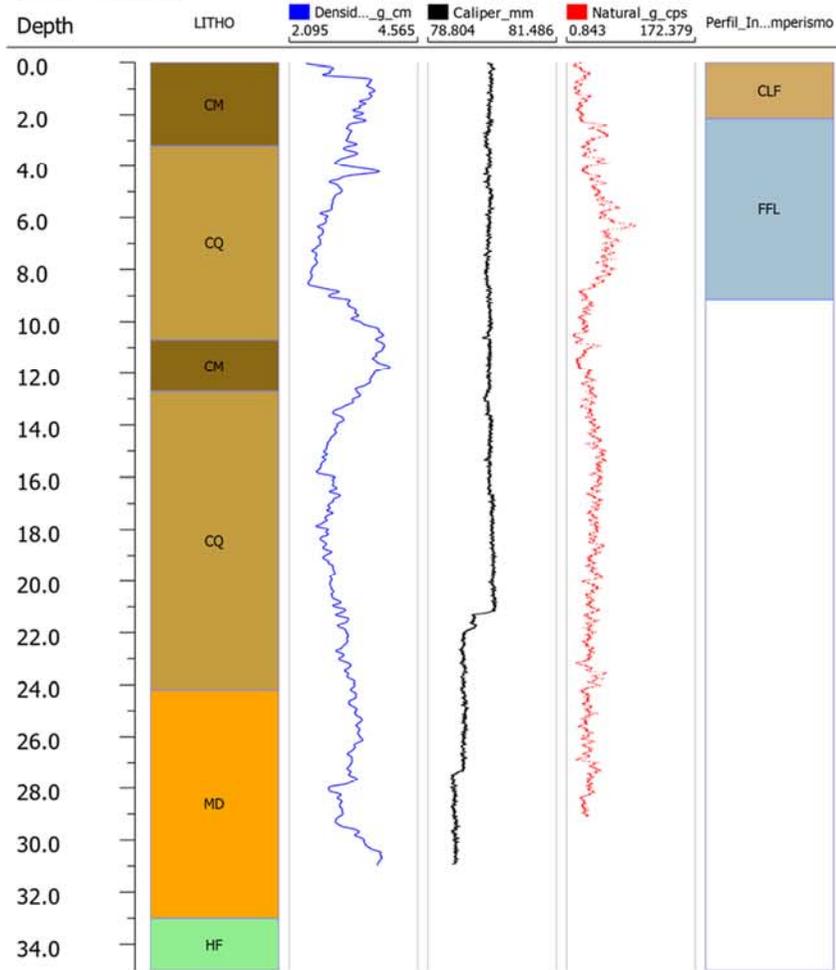
- CM Canga Minério
- CQ Canga Química
- SR Sem Recuperação
- MD Máfica Decomposta
- HF Hematita Friável

Perfil de Intemperismo (Map. Bancada)

- CLF Crosta Laterítica Ferruginosa
- FFL Formação Ferrífera Laterítica



SN4-FD00072



LEGENDA

● Sondagem SN4-FD00072

Sondagem Rotativa

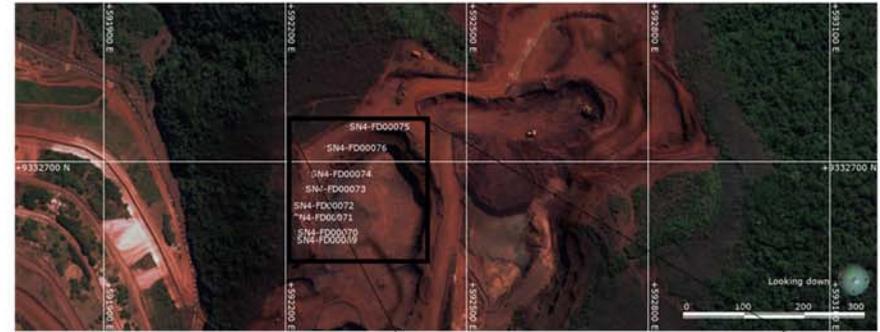
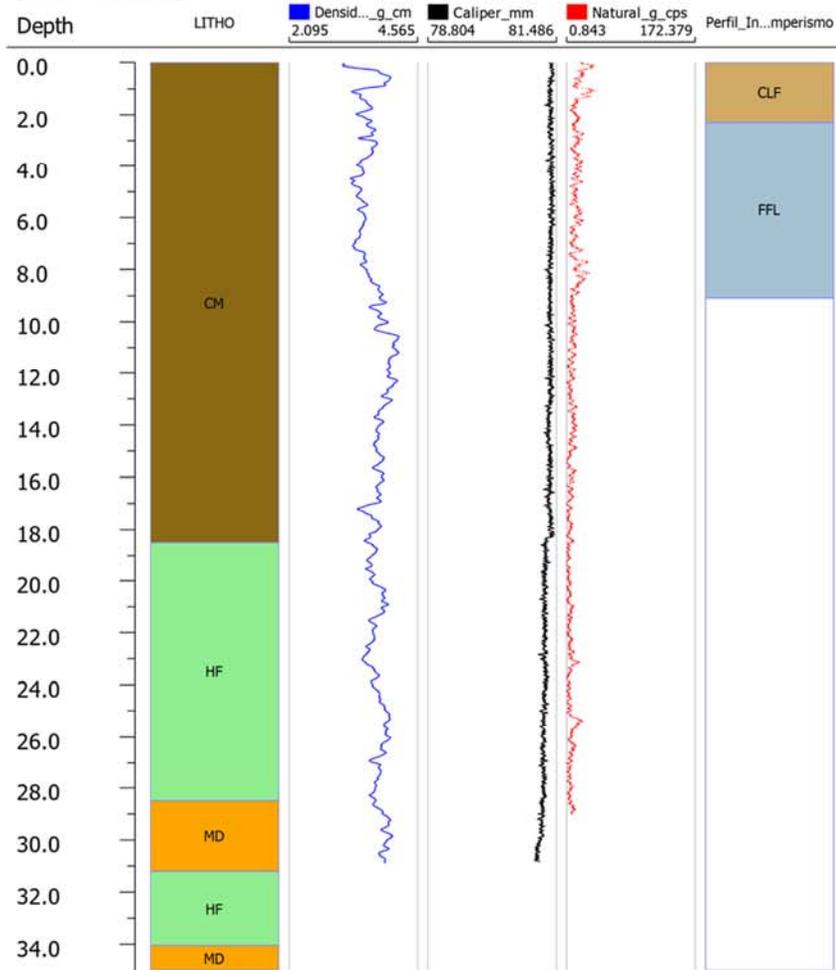
- CM Canga Minério
- CQ Canga Química
- SR Sem Recuperação
- MD Máfica Decomposta
- HF Hematita Friável

Perfil de Intemperismo (Map. Bancada)

- CLF Crosta Laterítica Ferruginosa
- FFL Formação Ferrífera Laterítica



SN4-FD00073



LEGENDA

● Sondagem SN4-FD00073

Sondagem Rotativa

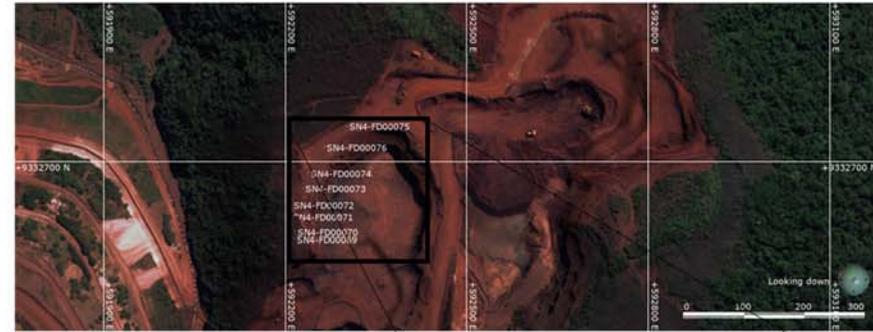
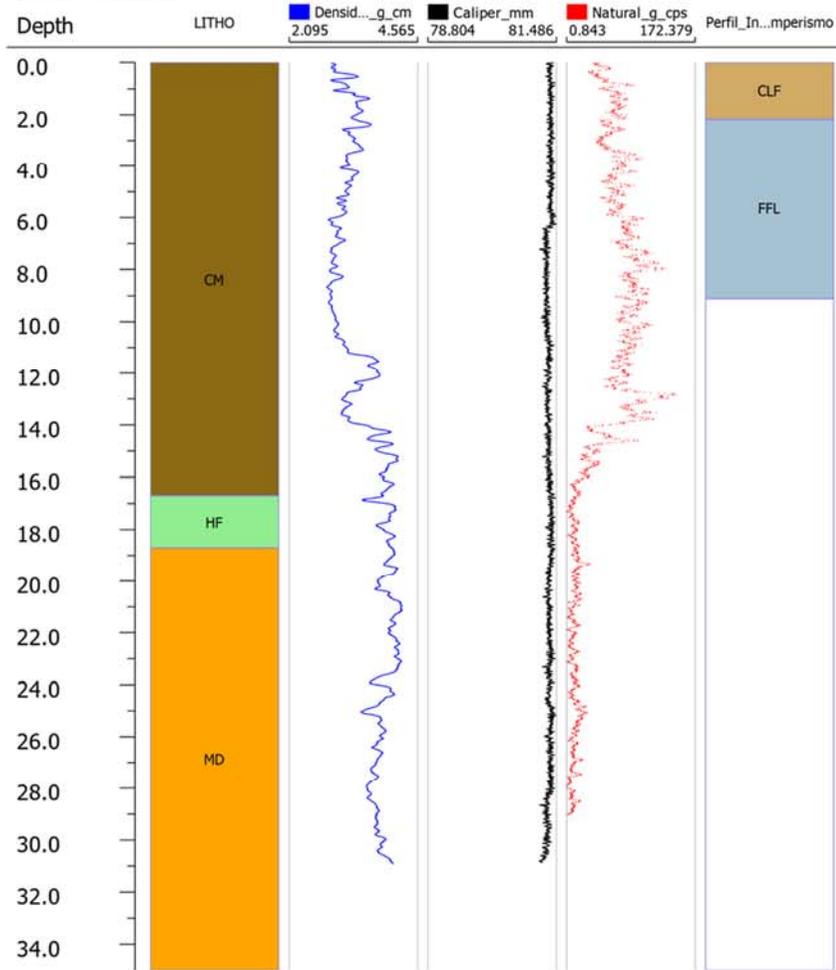
- CM Canga Minério
- CQ Canga Química
- SR Sem Recuperação
- MD Máfica Decomposta
- HF Hematita Friável

Perfil de Intemperismo (Map. Bancada)

- CLF Crosta Laterítica Ferruginosa
- FFL Formação Ferrífera Laterítica



SN4-FD00074



LEGENDA

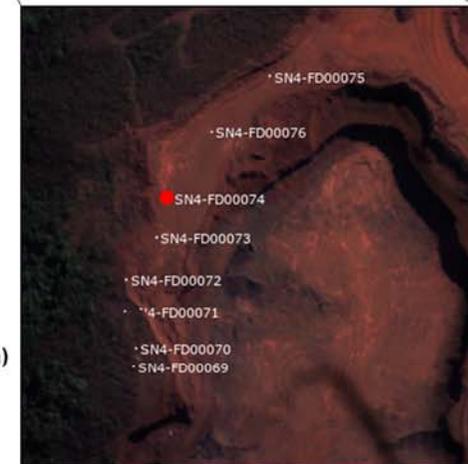
● Sondagem SN4-FD00074

Sondagem Rotativa

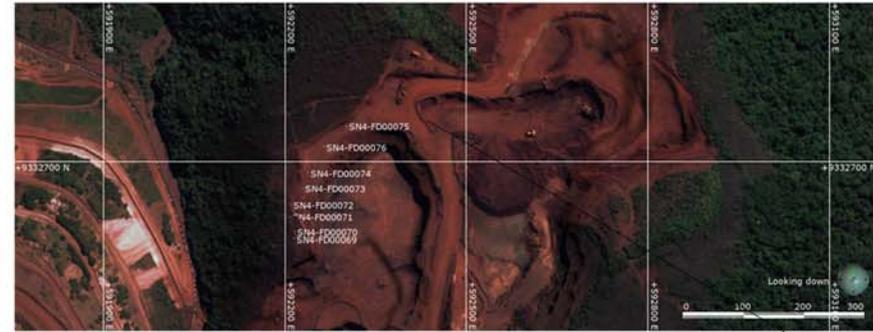
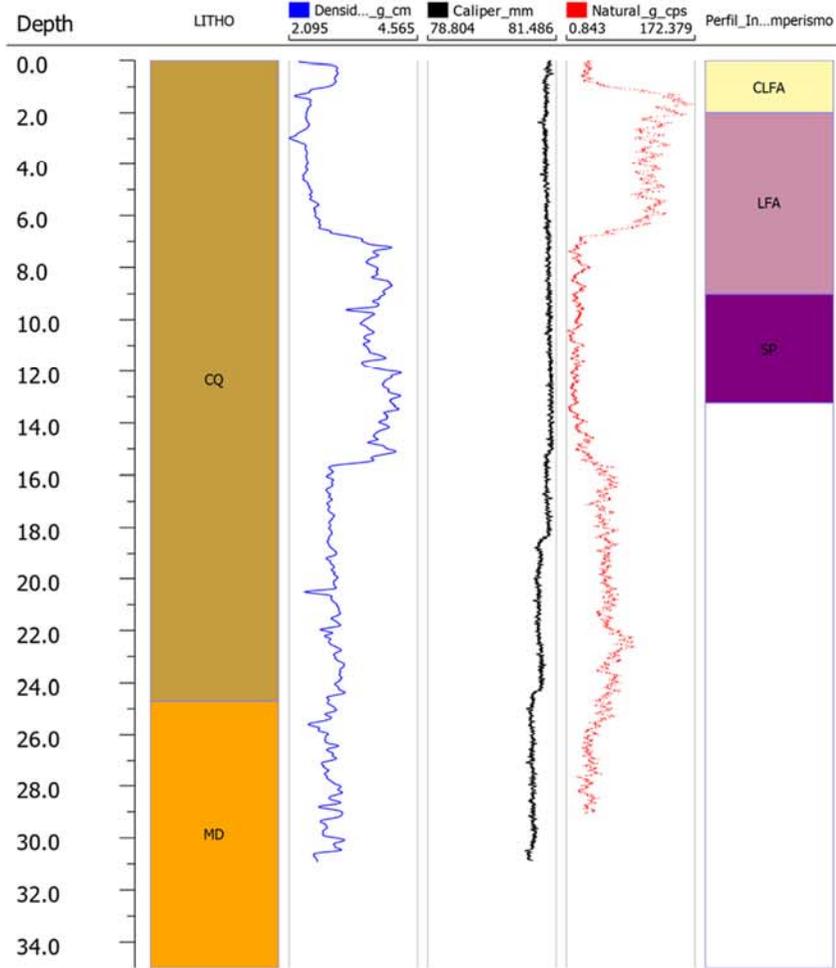
- CM Canga Minério
- CQ Canga Química
- SR Sem Recuperação
- MD Máfica Decomposta
- HF Hematita Friável

Perfil de Intemperismo (Map. Bancada)

- CLF Crosta Laterítica Ferruginosa
- FFL Formação Ferrífera Laterítica



SN4-FD00075



LEGENDA

- Sondagem SN4-FD00076
- Sondagem Rotativa**
- CM Canga Minério
- CQ Canga Química
- SR Sem Recuperação
- MD Máfica Decomposta
- HF Hematita Friável
- Perfil de Intemperismo (Map. Bancada)**
- CLFA Crosta Laterítica Ferro-Aluminosa
- LFA Laterita Ferro-Aluminosa
- SP Saproilito



