## REVISÕES

TE: TIPO EMISSÃO
A - PRELIMINAR
B - PARA APROVAÇÃO
C - PARA CONHECIMENTO
D - PARA COTAÇÃO
E - PARA CONSTRUÇÃO
F - CONFORME COMPRADO
G - CONFORME CONSTRUÍDO
H - CANCELADO

| Rev | TE | Descrição | Por | Ver. | Apr. | Aut. | Data |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | B | PARA APROVAÇÃO | DMI | ARB | OVC | OVC | 19/06/19 |
| 0 | C | PARA CONHECIMENTO | DMI | DRP/ ARB | OVC | OVC | 20/08/19 |
| 1 | C | PARA CONHECIMENTO | MGG | DCP | BF | GCL | 18/10/19 |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

# ÍNDICE

**ITEM DESCRIÇÃO PÁGINA**


**1.0 INTRODUÇÃO ..... 5**

**2.0 DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA ..... 6**

**3.0 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO ..... 7**

3.1 LOCALIZAÇÃO ..... 7

3.1 HISTÓRICO DE TRINCAS E RECLAMAÇÕES ..... 8

**4.0 ANÁLISE DE SUBSIDÊNCIA NO CJMV ..... 8**

4.1 MECANISMOS DA SUBSIDÊNCIA ..... 8

4.2 EVOLUÇÃO DO REBAIXAMENTO DE ÁGUA ..... 11

4.1 AVALIAÇÃO DA SUBSIDÊNCIA ALIADO AO REBAIXAMENTO DE ÁGUA ..... 16

4.2 AVALIAÇÃO DE RECALQUES E DANOS ESTRUTURAIS ..... 25

**5.0 AVALIAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA CAMADA SUPERFICIAL DO CJMV ..... 38**

**6.0 DIAGNÓSTICO DAS SUBSIDÊNCIAS NO CJMV ..... 41**

**7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 44**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Localização da área em estudo em Minas Gerais – Cava da mina Capão Xavier. 7
Figura 3.2: Cronologia de eventos na cava de Capão Xavier e entorno. ..... 8
Figura 4.1: Importância da informação sobre a subsidência do solo (Abidin et al., 2001). ..... 8
Figura 4.2: Tensões atuantes antes do bombeamento (Cabral et al., 2006). ..... 10
Figura 4.3: Tensões atuantes depois do bombeamento (Cabral et al., 2006). ..... 10
Figura 4.4: Instrumentação de piezometria no CJMV. ..... 13
Figura 4.5: Dados de monitoramento dos instrumentos locados nas proximidades do condomínio Jardim Monte Verde (Adaptado de VALE, 2018). ..... 14
Figura 4.6: Dados de monitoramento dos instrumentos PZ 02/02-A e PZ 02/02-B (Adaptado de VALE, 2018). ..... 15
Figura 4.7: Áreas delimitadas para análise dos dados do radar orbital - CVMJ. ..... 17
Figura 4.8: Evolução dos deslocamentos em função do tempo. ..... 18
Figura 4.9: Comparativo entre os dados de rebaixamento e deslocamentos da área 1 e área 2. ..... 21
Figura 4.10 – Curvas de deslocamentos por retroanálise. ..... 22
Figura 4.11 – Subdivisão do entorno em subáreas para análise de comportamento dos deslocamentos verticais aliado ao rebaixamento de água. ..... 23
Figura 4.12: Evolução dos deslocamentos e rebaixamento de água na BR-040. ..... 24
Figura 4.13: Evolução dos deslocamentos e rebaixamento de água no condomínio. ..... 24
Figura 4.14: Amostras argila vermelha. Fonte: Doc.[4]. ..... 26
Figura 4.15: Amostras argila branca. Fonte: UFMG, 2008. ..... 26
Figura 4.16 – Localização das amostras coletadas. (Fonte: Google Earth, acesso em 12/03/19 e imagem gerada correspondente a data de 31/05/2008). ..... 26
Figura 4.17 – Planta com a locação da seção FF'. ..... 27
Figura 4.18 - Seção FF'. ..... 28
Figura 4.19: Ensaio de adensamento na Argila Vermelha. (Adaptado de UFMG, 2008). ..... 30
Figura 4.20 – Esquemático de cálculo dos recalques para diversas espessuras de camadas. ..... 30
Figura 4.21 – Região de transição e formação de trincas – dados de monitoramento leste-oeste entre 2014 e 2015. ..... 33
Figura 4.22 – Espessuras das camadas sedimentares terciárias. ..... 34
Figura 4.23: Esquemático ilustrativo do processo de rebaixamento e recalque diferencial... 35
Figura 4.24 – Variação diferencial do rebaixamento de água para um comprimento L entre os pontos de apoio A e B. ..... 36
Figura 4.25: Distorções angulares críticas e danos estruturais (Bjerrum, 1963 e Vargas e Silva, 1973). ..... 37
Figura 4.26: Gráfico de rebaixamento de água e distorção angular. ..... 38
Figura 5.1: Representação esquemática dos minerais argilosos com os respectivos espaçamentos basais. (a) pirofilita-talco; (b) mica; (c) montimorilonita; (d) vermiculita; (e) clorita; (f) caulinita; (g) haloisita. ..... 39
Figura 5.2: Potenciais de expansão. (Adaptado de Skempton, 1953) ..... 40

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Documentos de referência. ..... 6
Tabela 4.1: Dados cadastrais instrumentos. ..... 12
Tabela 4.2: Dados de avaliação de rebaixamento de água - PZ 02/02-A e PZ 02/02-B. ..... 15
Tabela 4.3: Deslocamentos verticais – radar orbital. ..... 19
Tabela 4.4: Deslocamentos horizontais (EW) – radar orbital. ..... 19
Tabela 4.5: Estimativas de recalque no CJMV devido ao rebaixamento para diferentes espessuras de camadas. ..... 31
Tabela 4.6: Recalques diferenciais e distorções. ..... 37
Tabela 5.1: Composição mineralógica – Argila Vermelha. (UFMG, 2008) ..... 39
Tabela 5.2: Fases cristalinas identificadas. (UFMG, 2008) ..... 39
Tabela 5.3: Resultados dos ensaios de caracterização. (Adaptado de UFMG, 2008). ..... 40

# 1.0 INTRODUÇÃO

O presente relatório é parte integrante do plano de trabalho referente à Avaliação Geotécnica no Entorno da Cava de Capão Xavier e consiste na elaboração de um diagnóstico geológico e geotécnico da cava da mina Capão Xavier e seu entorno. O objetivo principal é avaliar a influência da operação, rebaixamento de água e exploração mineral na cava e correlação destes processos com o surgimento ou potencialização de trincas observadas no seu entorno, condomínio Jardim Monte Verde (CJMV) e BR-040.

Diante disso, foram contempladas no plano de trabalho diversas etapas, a saber:

- Etapa 1 - Consolidação de dados;
- Etapa 2 - Integração de dados disponíveis e geração ou validação de modelo geológico-geotécnico;
- Etapa 3 - Diagnóstico da cava atual;
- Etapa 4 – Avaliação de subsidência e caracterização do solo;
- Etapa 5 - Diagnóstico da cava final – avanço da lavra / escavação;
- Etapa 6 - Relatório final.

Neste contexto, este relatório corresponde à Etapa 4 – Avaliação de subsidência e caracterização do solo. A finalidade principal deste relatório é apresentar a avaliação da influência do rebaixamento de água no surgimento e/ou potencialização de trincas no entorno, assim como avaliação da mineralogia da camada de solo superficial ao condomínio Jardim Monte Verde.

Assim, o presente documento tem como principais objetivos:

- Apresentar estudos de avaliação de subsidências na região do condomínio Jardim Monte Verde (CJMV), assim como estimar os recalques na área de estudo;
- Apresentar a avaliação dos dados de satélite orbital;
- Apresentar a avaliação dos dados de rebaixamento de água;
- Apresentar um parecer sobre a influência da mineralogia da camada de solo superficial do CJMV.

## 2.0 DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

Os principais documentos de referências disponibilizados pela VALE e elaborados pela Tetra Tech que serviram como base para o estudo de avaliação de subsidência e caracterização do solo encontram-se apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Documentos de referência.

| Avaliação Geotécnica | | |
|---|---|---|
| **Nome / Descrição** | **Empresa** | **Data de elaboração** |
| [1] Relatório final - Caracterização físico-química e mecânica do estéril da mina Capão Xavier – VALE. | UFMG | Setembro de 2008 |
| [2] Relatório parcial - Caracterização físico-química e mecânica do estéril da mina Capão Xavier – VALE. | UFMG | Maio de 2008 |
| [3] Segundo relatório parcial - Caracterização físico-química e mecânica do estéril da mina Capão Xavier – VALE. | UFMG | Julho de 2008 |
| [4] Ensaio Geotécnico - Amostras – Documentos: RELAT-CPX - PC04-AM01-AG-V–UFMG; RELAT-CPX - PC04-AM01-AG-V–UFMG; RELAT-CPX - PC12-AM01-AG-B-UFMG; RELAT-CPX - PC20-AM01-AG-B–UFMG; RELAT-CPX - PC22-AM01-AG-V–UFMG. | UFMG | Setembro de 2008 |
| [5] Planilha de monitoramento de níveis piezométricos. Ref.: CPX_NÍVEL D'ÁGUA. | VALE | Fevereiro de 2019 |
| [6] Avaliações Geotécnicas no Entorno da Cava de Capão Xavier – Visita Técnica - Relatório Técnico. Ref.: 19531-DCPX-G01-RL001. | Tetra tech | Janeiro de 2019 |
| [7] Avaliações Geotécnicas no Entorno da Cava de Capão Xavier - Consolidação de Dados - Relatório Técnico. Ref.: 19531-DCPX-G01-RL002. | Tetra tech | Março de 2019 |
| [8] Avaliações Geotécnicas no Entorno da Cava de Capão Xavier – Geração do Modelo Geológico-Geotécnico - Relatório Técnico. Ref.: 19531-DCPX-G01-RL003. | Tetra tech | Junho de 2019 |
| [9] Dados de monitoramento de satélite orbital. | VALE | Maio de 2019 |

# 3.0 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

## 3.1 LOCALIZAÇÃO

A área de estudo do projeto corresponde à cava da Mina de Capão Xavier, pertencente à VALE, e seu entorno, localizada no município de Nova Lima, Minas Gerais. A Figura 3.1 apresenta a localização geográfica da área de estudo.

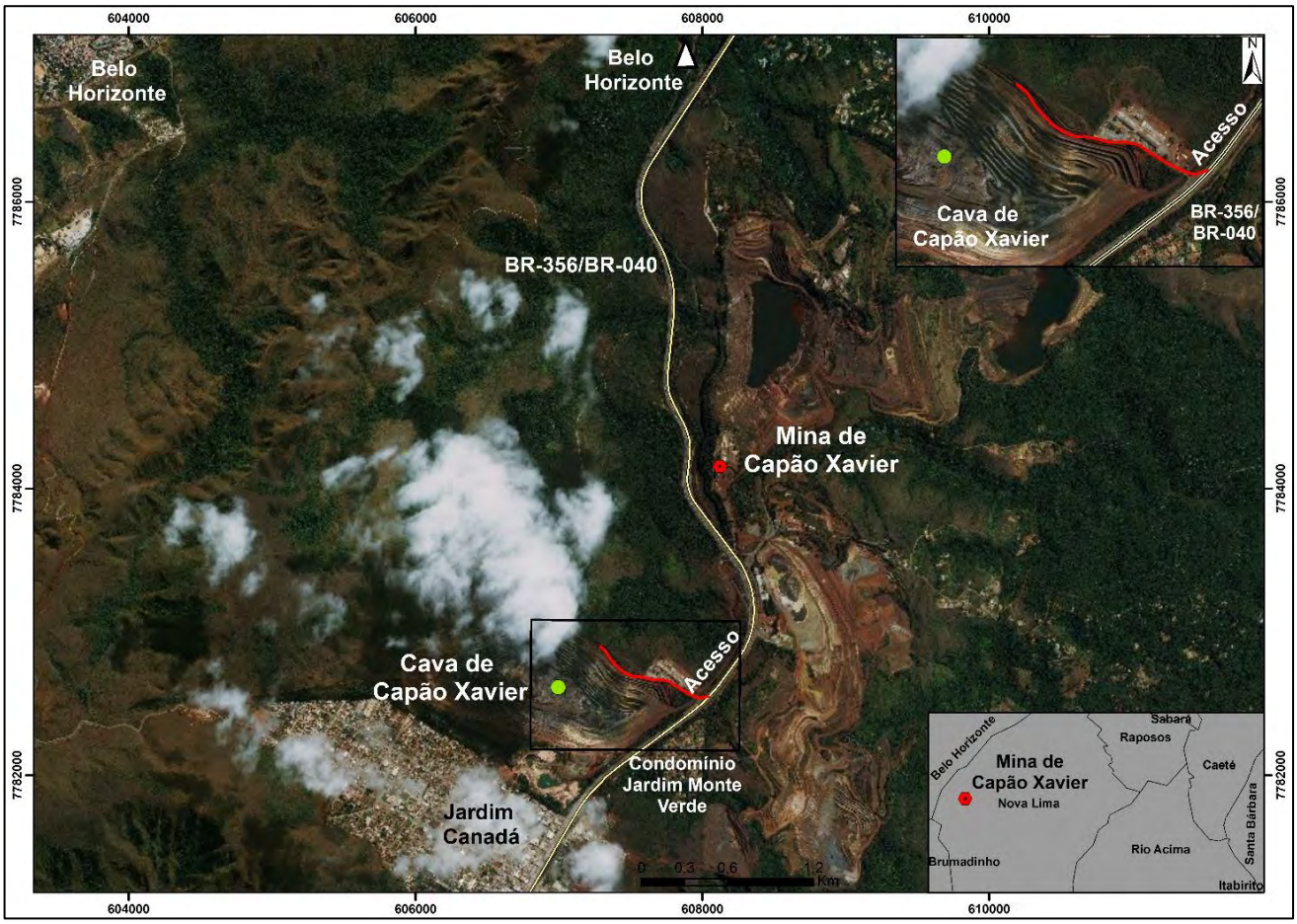


Figura 3.1: Localização da área em estudo em Minas Gerais – Cava da mina Capão Xavier.

A cava de Capão Xavier localiza-se a aproximadamente 17 km ao sul da capital mineira, Belo Horizonte. O acesso à área de estudo pode ser realizado pela BR-040, sentido Rio de Janeiro, situando-se nas imediações do Bairro Jardim Canadá, Nova Lima/MG.

O contexto geológico na região da cava e do entorno é apresentado no relatório 19531-DCPX-G01-RL003.

## 3.1 HISTÓRICO DE TRINCAS E RECLAMAÇÕES

Para melhor entendimento do histórico de formação e potencialização das trincas, assim como de reclamações do condomínio Jardim Monte Verde, a cronologia dos principais eventos é apresentada esquematicamente na Figura 3.2.

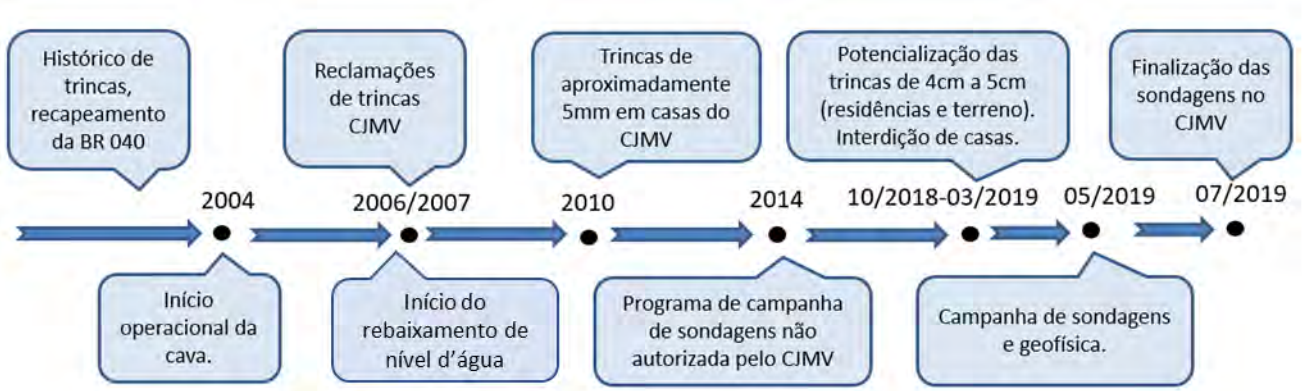


Figura 3.2: Cronologia de eventos na cava de Capão Xavier e entorno.

# 4.0 ANÁLISE DE SUBSIDÊNCIA NO CJMV

## 4.1 MECANISMOS DA SUBSIDÊNCIA

A subsidência é um fenômeno de rebaixamento da superfície do terreno devido a alterações ocorridas nas camadas subterrâneas, ou seja, redução do nível do terreno devido à remoção de suporte subterrâneo (Cabral et.al., 2006). Devido aos fatores apresentados na Figura 4.1, faz-se necessário o conhecimento aprofundado do fenômeno de forma a reconhecer sua ocorrência e aplicar medidas de prevenção e mitigação.

Figura 4.1: Importância da informação sobre a subsidência do solo (Abidin et al., 2001).

Do ponto de vista do mecanismo causador da subsidência do solo, segundo Mingnorance (2000), pode-se subdividir as ocorrências em cinco grupos:

- Devido à hidrocompactação;

- Devido à dissolução de rochas e sais;
- Devido à extração de água subterrânea;
- Devido à extração de petróleo ou gás;
- Devido à atividade de exploração mineral.

Dependendo da origem do processo, os diferentes tipos de subsidência têm características distintas com relação à extensão do fenômeno, condições geológicas favoráveis à sua ocorrência e máximas magnitudes atingidas.

Esse fenômeno pode causar consequências catastróficas quando ocorre em centros urbanos, como por exemplo, danos a pavimentos e edificações, causando rachaduras ou inviabilizando seu uso. Podendo, em último caso, gerar colapsos estruturais e perdas humanas.

O mecanismo de subsidência do solo ocorre em aquíferos sedimentares, e pode ser compreendido através do Princípio das Tensões Efetivas – PTE, proposto por TERZAGHI (1925):

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} p$$

Onde:

- $\sigma'_{ij}$ é uma componente do tensor de tensões efetivas;
- $\sigma_{ij}$ é uma componente do tensor de tensões totais;
- $\delta_{ij}$ é a função Delta de Kronecker;
- $p$ é a pressão no poro com fluido.

Tendo esse princípio como base, é possível entender que a exploração de água subterrânea acarretará em redução de carga piezométrica e poropressão. Dessa forma, a tensão efetiva aumenta, e a camada que antes era suportada pela matriz sólida e pelo fluido, passa a ser suportada apenas pela parte sólida. Caso essa matriz não tenha resistência estrutural suficiente, ela sofrerá rearranjo dos grão e partículas, que causará uma subsidência do solo.

No caso de solos granulares, a deformação é quase irrecuperável, porém, para solos argilosos, tal deformação pode ser elástica (reversível) ou plástica (irreversível), a depender da composição e formação desse solo. A Figura 4.2 e a Figura 4.3 ilustram as condições mecânicas descritas acima.

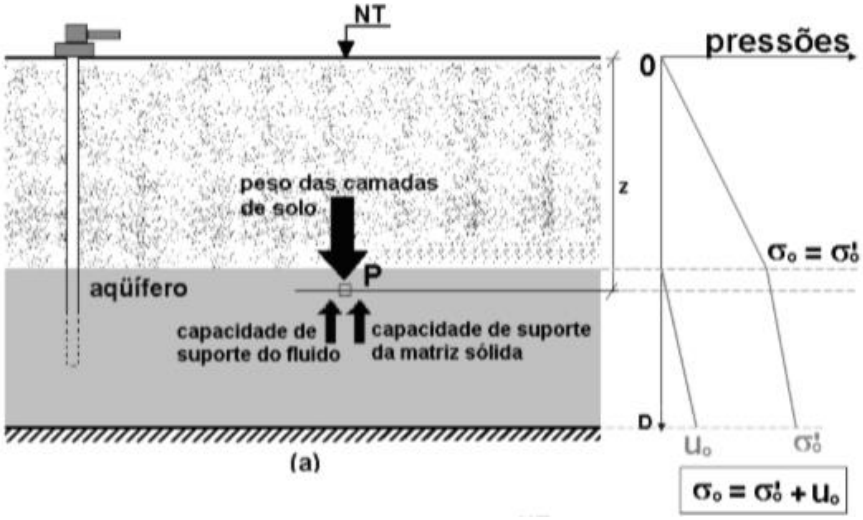


Figura 4.2: Tensões atuantes antes do bombeamento (Cabral et al., 2006).

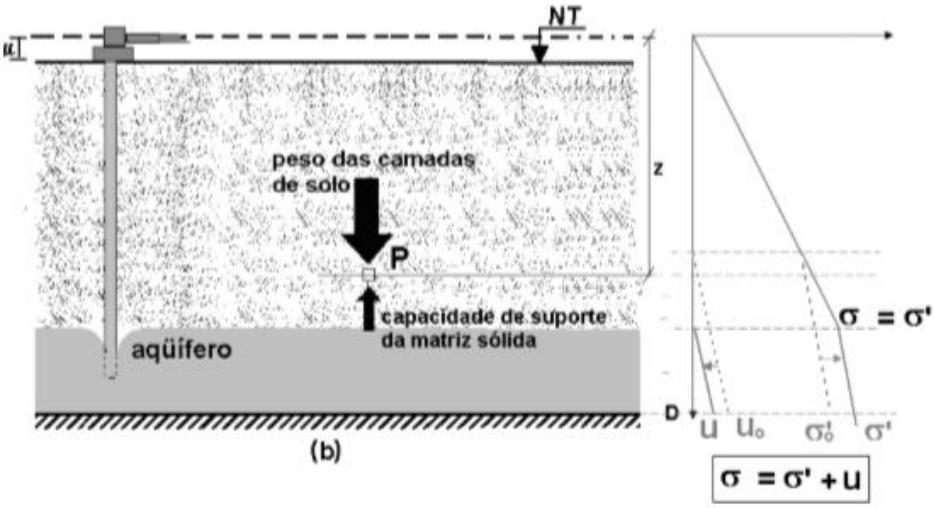


Figura 4.3: Tensões atuantes depois do bombeamento (Cabral et al., 2006).

Para solos finos que sofreram uma tensão atuante em um tempo geológico anterior, a subsidência plástica só ocorrerá caso as tensões efetivas forem maiores do que as tensões de pré-adensamento. Caso contrário essas deformações serão reversíveis, consideradas como elásticas.

Segundo Mingorance (2000), a extensão desse fenômeno está relacionada com três fatores:

- Magnitude do rebaixamento do nível d'água;
- Porcentagem de argila presente no aquífero;
- Tempo em que o nível d'água foi mantido rebaixado.

Segundo Loáiciga (2013) o mecanismo descrito é similar, em alguns aspectos ao adensamento de solos compressíveis saturados quando submetidos a carregamentos. A causa da subsidência é o aumento das tensões efetivas e a redução do volume de vazios. Entretanto, existem importantes diferenças entre a teoria do adensamento unidimensional

desenvolvida por Terzaghi (1925) e a teoria que descreve a subsidência por bombeamento de água e consequente rebaixamento do nível d'água.

A teoria de Terzaghi (1925) considera que um carregamento aplicado gera um acréscimo instantâneo de tensão total que produz um aumento imediato de poropressão em igual magnitude. Esta sobrecarga é dissipada ao longo do tempo e então, o aumento de tensão total é transferido para as partículas do solo aumentando a tensão efetiva e causando o recalque por adensamento. No caso de explotação de água subterrânea não há a aplicação de carregamento externo e a ocorrência de excesso de poropressão. A poropressão é diminuída continuamente pelo bombeamento e o processo é acompanhado pelo aumento da tensão efetiva no solo (LOÁICIGA, 2013).

Outra diferença entre as teorias é a natureza do fluxo. Terzagui (1925) considera a dissipação por fluxo vertical, por drenagem única ou dupla através do topo ou base, enquanto o bombeamento de água subterrânea produz predominantemente fluxo horizontal radial (LOÁICIGA, 2013).

## 4.2 EVOLUÇÃO DO REBAIXAMENTO DE ÁGUA

São localizados na região do condomínio Jardim Monte Verde o poço PA 2/88, identificado como ponto 38, e poço 01/75, identificado como Ponto 41. Além destes, localiza-se nas proximidades os instrumentos INA 01/93, PZ 02/02A, PZ 02/02B, PZ 14/92, INA 37/03 e INA 58/14. A denominação das câmaras é correlacionada com as identificações "A", mais profunda, e "B" mais superficial. Os principais dados destes instrumentos são apresentados na Tabela 4.1, a locação em planta destes instrumentos é apresentada na Figura 4.4.

Tabela 4.1: Dados cadastrais instrumentos.

| Instrumentos | Id | Latitude (UTM) | Longitude (UTM) | Cota de Topo (m) | Cota de Fundo (m) | Prof. (m) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Poço | Ponto 38 PA02 | 7.781.849 | 607.950 | 1295,00 | 1171,50 | 123,5 |
| Poço | Ponto 41 PA01 | 7.781.876 | 607.901 | 1327,00 | 1197,00 | 130 |
| Medidor de Nível de Água | INA 01/93 | 7.781.899 | 608.114 | 1289,66 | 1207,66 | 82 |
| Piezômetro | PZ_02/02A | 7.781.965 | 607.781 | 1330,90 | 1207,27 | 123,63 |
| Piezômetro | PZ_02/02B | 7.781.965 | 607.781 | 1330,90 | 1285,67 | 45,23 |
| Piezômetro | PZ 14/92 | 7.782.402 | 607.684 | 1350,36 | 1185,36 | 165 |
| Medidor de Nível de Água | INA 37/03 | 7.782.582 | 607.724 | 1351,00 | 1261,00 | 90 |
| Medidor de Nível de Água | INA 58/14 | 7.782.235 | 607.359 | 1351,00 | 1150,02 | 201,5 |

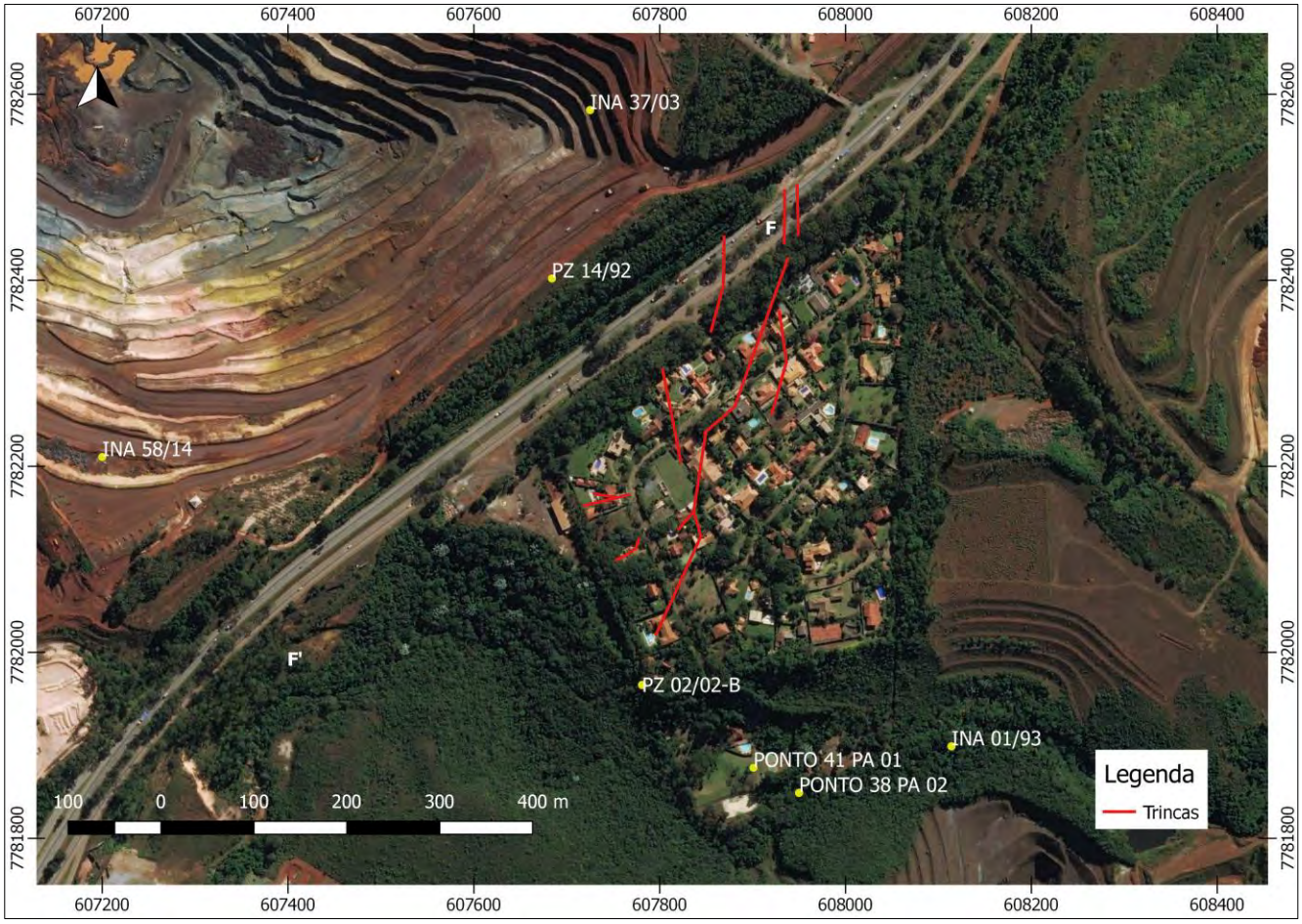


Figura 4.4: Instrumentação de piezometria no CJMV.

Os dados de monitoramento ao longo do tempo destes instrumentos são apresentados na Figura 4.5. Observa-se que anterior ao período de início operacional, exploração pela VALE em 2004, os registros de monitoramento apresentavam comportamento oscilatório estável, ou seja, com maiores leituras durante os meses chuvosos e menores leituras durante os meses de seca. Antes do período de exploração, os instrumentos PZ 02/02 A e PZ 02/02 B apresentavam registros que oscilavam entre as cotas El. 1300,0 m e El.1314,5 m, o instrumento INA 01/93 oscilava nas cotas El. 1250,0 m e 1264,5 m, ambos variando cerca de 14,5 m entre os períodos chuvosos e de estiagem, o poço PONTO 41 PA 01 tem o seu primeiro registro de captação de água em 05/2005, El.1257,8 m, e o poço PONTO 38 PA 02 apresentou registro em 05/2008 na cota El. 1213,8 m.

Após 2006, observa-se que todos os instrumentos apresentaram comportamento descendente devido ao processo de rebaixamento do nível de água realizado pela VALE, o que é diretamente correlacionado às reduções consideráveis das cotas piezométricas no subsolo e ao rebaixamento do lençol freático. Salienta-se que o ano 2006 coincide com o primeiro registro histórico de reclamações pelo condomínio Jardim Monte Verde e aparecimento de trincas em residências.

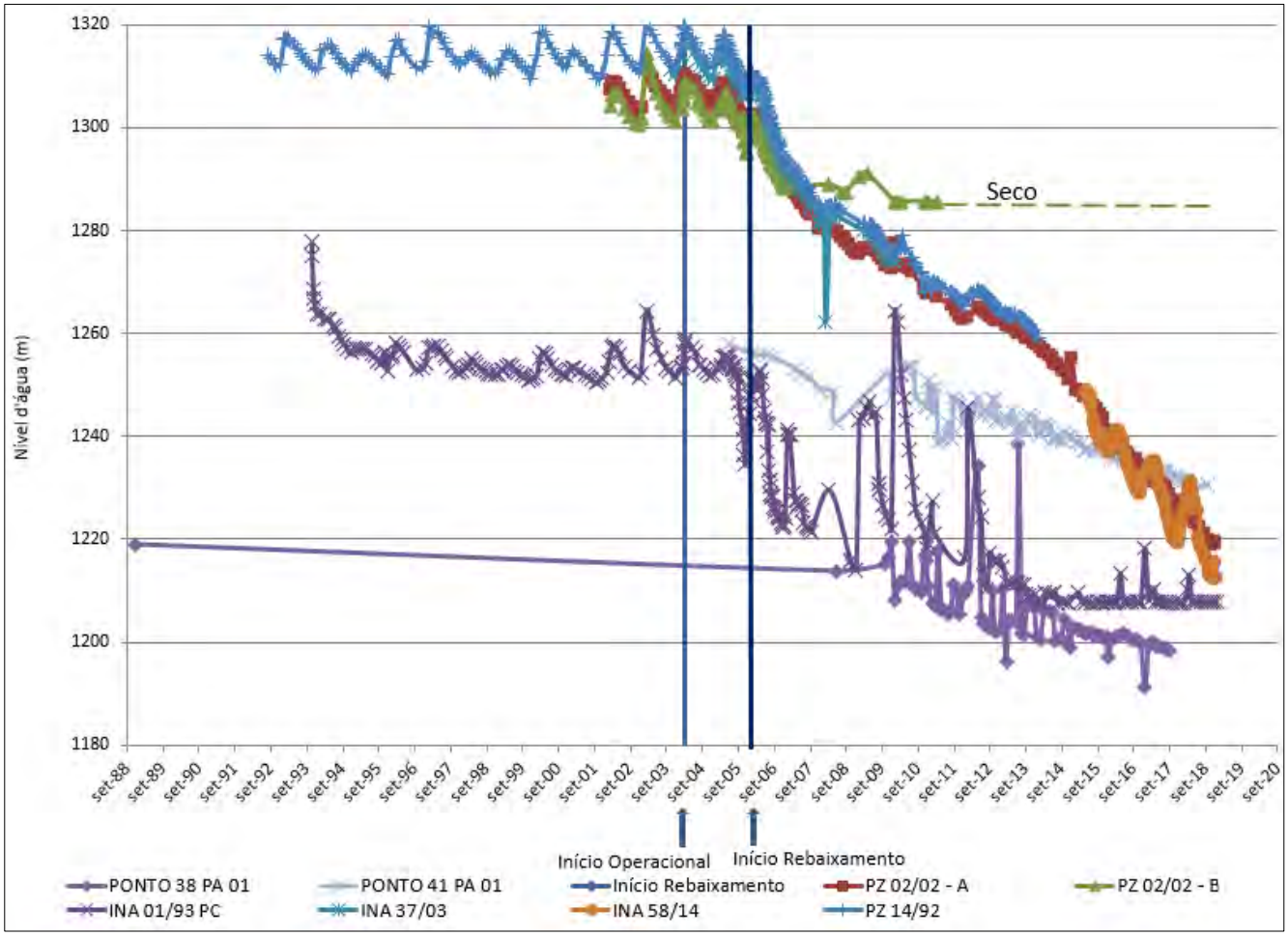


Figura 4.5: Dados de monitoramento dos instrumentos locados nas proximidades do condomínio Jardim Monte Verde (Adaptado de VALE, 2018).

Para avaliação do comportamento referente ao rebaixamento de água no CJMV, adotou-se como premissa a análise de monitoramento realizado no piezômetro PZ 02/02-A e PZ 02/02-B, devido à maior proximidade topográfica com a cota de terreno do condomínio, cota EL. 1350 m, e devido ao fato destes instrumentos conterem leituras anteriores ao processo de exploração de água até o período atual, 2019. Os dados de avaliação de rebaixamento nestes instrumentos são apresentados na Tabela 4.2. Para análise do comportamento do rebaixamento em diferentes períodos, são apresentados na Figura 4.6 cinco cenários identificados como t0, t1, t2, t3, t4 e t5, correspondentes, respectivamente, aos períodos iniciados em 02/2004, 09/2005, 03/2008, 10/2012, 01/2016 e 12/2018.

Tabela 4.2: Dados de avaliação de rebaixamento de água - PZ 02/02-A e PZ 02/02-B.

| Instrumento PZ 02/02A | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Cenários | Cota i (m) | Cota f (m) | Data i | Data f | Variação (m) | Tempo (meses) | Comportamento | Taxa máx. (m/meses) |
| <t0 | 1307,3 | 1306,8 | 08/02/02 | 04/02/04 | 0,5 | 24,2 | Oscilatório/ Estável | 2,2% |
| t0-t1 | 1307,3 | 1306,8 | 04/02/04 | 27/04/05 | 0,5 | 14,9 | Oscilatório/ Estável | 3,6% |
| t1-t2 | 1308,7 | 1280,0 | 27/04/05 | 18/03/08 | 28,7 | 35,2 | Descendente | 81,5% |
| t2-t3 | 1280,0 | 1262,7 | 18/03/08 | 19/01/12 | 17,3 | 46,7 | Descendente | 37,1% |
| t3-t4 | 1265,1 | 1239,5 | 29/05/12 | 21/01/16 | 25,6 | 44,4 | Descendente | 57,7% |
| t4-t5 | 1239,5 | 1219,1 | 21/01/16 | 12/12/18 | 20,4 | 35,2 | Descendente | 57,9% |
| Instrumento PZ 02/02B | | | | | | | | |
| Cenários | Cota i (m) | Cota f (m) | Data i | Data f | Variação (m) | Tempo (meses) | Comportamento | Taxa máx. (m/meses) |
| <t0 | 1304,461 | 1303,721 | 08/02/02 | 04/02/04 | 0,74 | 24,2 | Oscilatório/ Estável | 3,1% |
| t0-t1 | 1304,461 | 1303,721 | 04/02/04 | 27/04/05 | 0,74 | 14,9 | Oscilatório/ Estável | 5,0% |
| t1-t2 | 1303,721 | 1.288,95 | 27/04/05 | 18/03/08 | 14,8 | 35,2 | Descendente | 81,5% |
| t2-t3 | 1.288,95 | 1.285,67 | 18/03/08 | 21/03/11 | 3,3 | 36,6 | Variável | 9,0% |
| t3-t4 | - | - | - | - | - | - | Seco | - |
| t4-t5 | - | - | - | - | - | - | Seco | - |

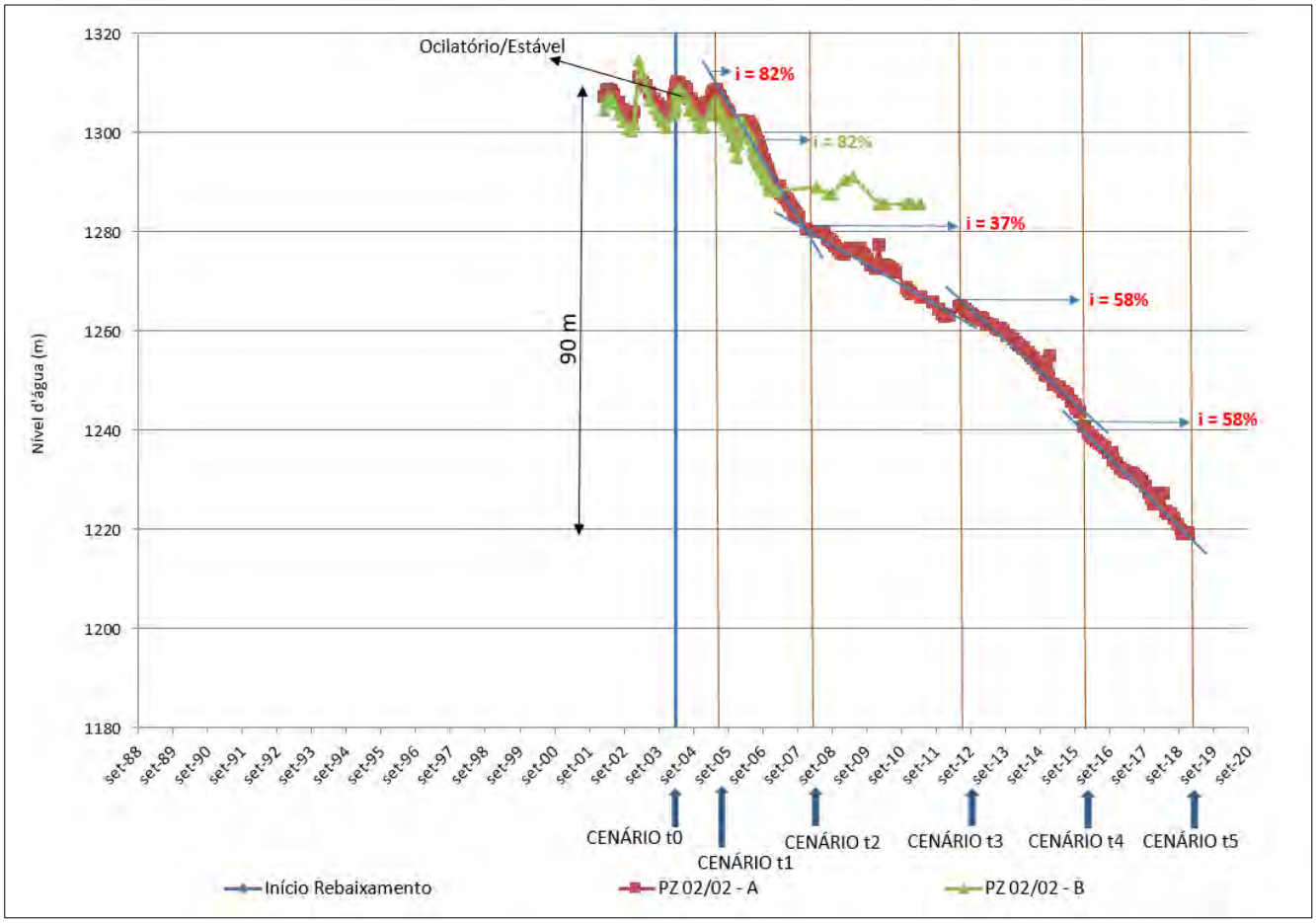


Figura 4.6: Dados de monitoramento dos instrumentos PZ 02/02-A e PZ 02/02-B (Adaptado de VALE, 2018).

As principais considerações acerca dos dados de rebaixamento de água são apresentadas a seguir:

- Os instrumentos de monitoramento INA 58/14, INA 37/03, PZ 14/92, PZ 02/02-A e PZ 02/02-B foram selecionados por estarem localizados mais próximos da BR-040 e do condomínio. Estes instrumentos apresentaram comportamento similar correspondente a oscilações sazonais antes de 2006. Após esta data, os níveis de água começaram a reduzir progressivamente;

- O instrumento INA 01/93 apresentou comportamento similar aos outros instrumentos. Este instrumento começou a reduzir os níveis piezométricos a partir de 2006, porém a partir de 05/2014 ele apresentou leituras estáveis com pequenas oscilações. Entretanto, este instrumento encontra-se um pouco afastado da área de estudo, sendo localizado nas proximidades das pilhas da mina de Mar Azul;

- Considera-se o instrumento PZ 02/02-A o mais representativo das condições de variações de nível de água na região do condomínio. Este instrumento apresentou redução da carga hidráulica a partir de 2006. Entre 09/2005 e 03/2008 houve as maiores taxas de rebaixamento da ordem de 82%. Já entre 03/2008 e 10/2012 as taxas foram reduzidas para 37% e posterior até o momento atual, 2019, os rebaixamentos mantiveram a taxa de 58%. Entre 2006 e 2019 o rebaixamento neste instrumento corresponde a 90 m;

- É importante salientar que a redução dos níveis piezométricos em 2006 coincide com o início dos registros de reclamações de trincas em residências no condomínio. O histórico resumo de aparecimento de trincas e reclamações é apresentado na Figura 3.2;

## 4.1 AVALIAÇÃO DA SUBSIDÊNCIA ALIADO AO REBAIXAMENTO DE ÁGUA

Para melhor entendimento do comportamento de deslocamentos na região do condomínio, foram tratados os dados de monitoramento de deslocamentos por radar orbital. A Figura 4.8 apresenta a evolução dos deslocamentos em função do tempo dos dados disponibilizados entre os anos de 2014 a 2019.

Quando na análise locacional das trincas (Figura 4.7), percebe-se que os danos estruturais e a propagação das trincas são concentrados na região oeste do condomínio em comparação com a região leste. Portanto, para avaliação dos dados de monitoramento por radar orbital, a região do condomínio foi subdividida em duas subáreas. Os dados de radar (Figura 4.8) mostram, também, que estas subáreas determinam uma zona transicional marcada por um diferencial representativo de deslocamentos, principalmente na direção leste-oeste.

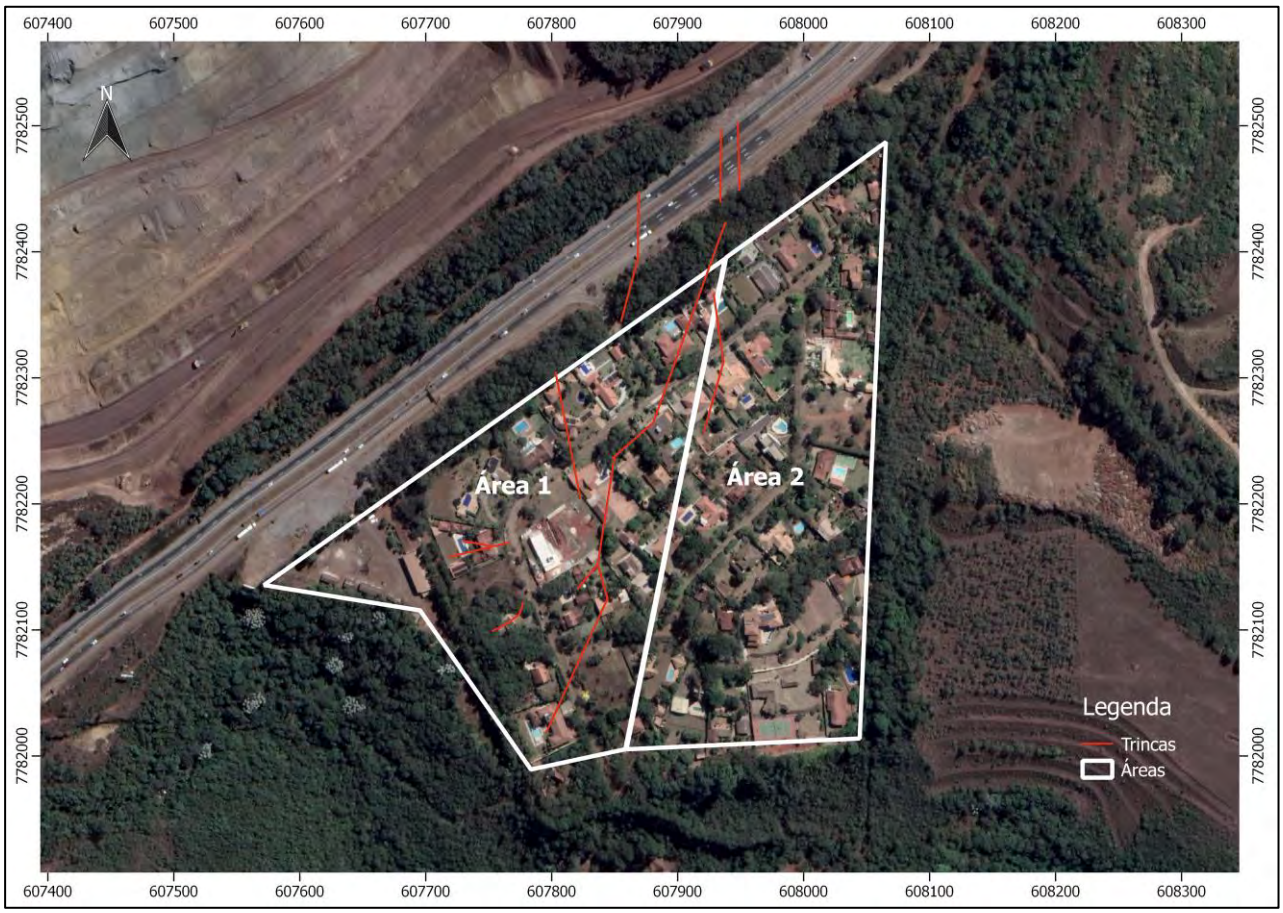


Figura 4.7: Áreas delimitadas para análise dos dados do radar orbital - CVMJ.

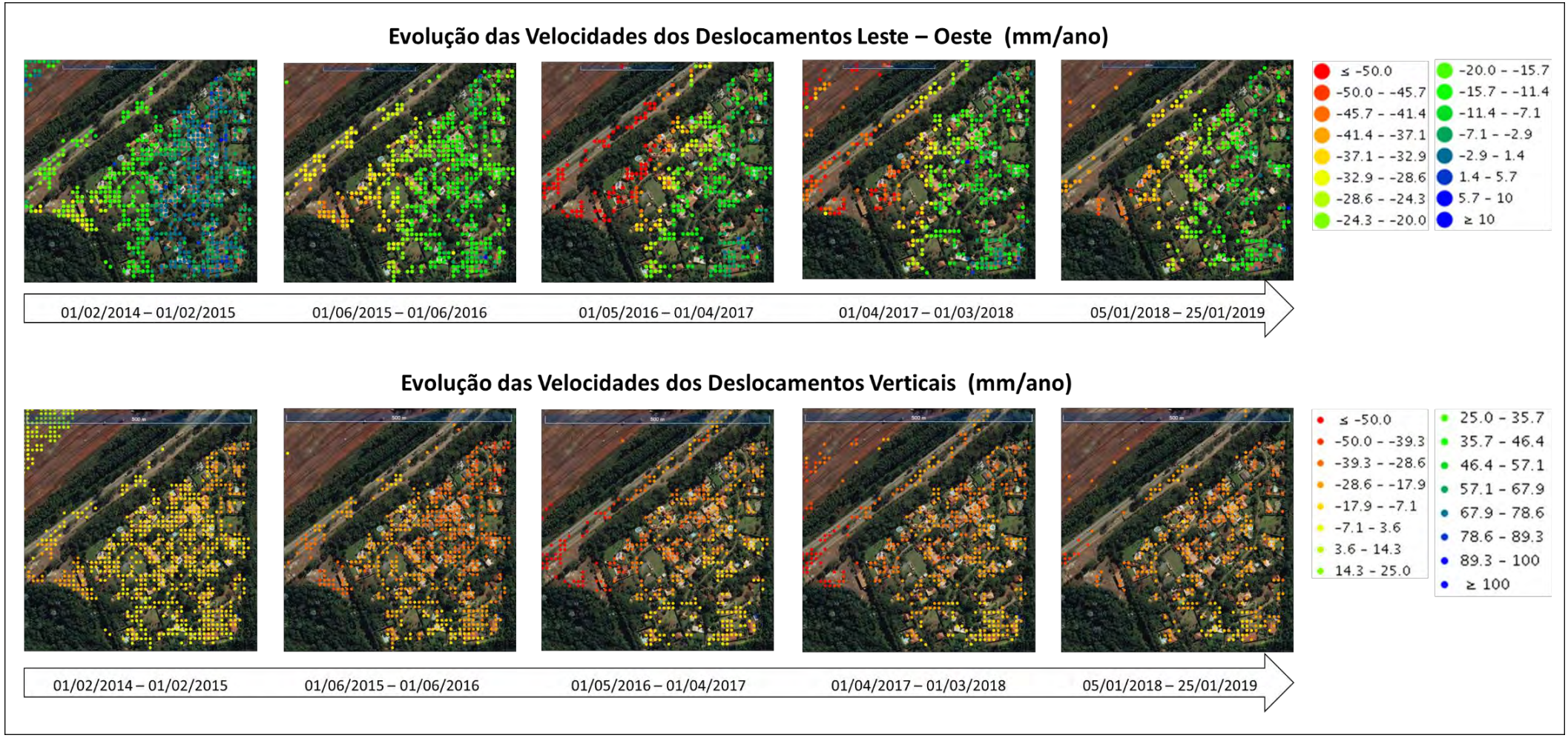


Figura 4.8: Evolução dos deslocamentos em função do tempo.

As Tabela 4.3 e Tabela 4.4 apresentam a compilação dos dados obtidos para as Áreas 1 e 2.

Tabela 4.3: Deslocamentos verticais – radar orbital.

| | | Área 1 | | | | | | Área 2 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Datas | | Velocidade (mm/ano) | | | Desvio Padrão | | | Velocidade (mm/ano) | | | Desvio Padrão | | |
| Início | Fim | Máx | Méd | Min | Min | Médio | Máx | Máx | Méd | Min | Min | Méd | Máx |
| 01/02/2014 | 01/02/2015 | -24,7 | -11,5 | -0,5 | 0,8 | 1 | 1,2 | -23,9 | -14 | -2,7 | 0,7 | 1 | 1,2 |
| 01/03/2014 | 01/03/2015 | -27,8 | -12,5 | -3,9 | 0,7 | 0,9 | 1,2 | -36 | -15,8 | -4,7 | 0,7 | 1 | 1,2 |
| 01/06/2014 | 01/06/2015 | -44,7 | -24,8 | -9,5 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | -43,5 | -28,6 | -11,5 | 2,3 | 2,3 | 2,3 |
| 01/09/2014 | 01/09/2015 | -29,3 | -14,7 | -6,2 | 0,8 | 1,1 | 1,4 | -31,3 | -17,5 | -5,2 | 0,8 | 1,1 | 1,3 |
| 01/06/2015 | 01/06/2016 | -44,7 | -24,8 | -9,5 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | -43,5 | -28,6 | -11,5 | 2,3 | 2,3 | 2,3 |
| 01/11/2015 | 01/11/2016 | -29,8 | -15,4 | -5 | 0,3 | 0,5 | 0,7 | -38,6 | -18,7 | -5,7 | 0,3 | 0,5 | 0,8 |
| 01/05/2016 | 01/04/2017 | -64,1 | -29,7 | -8,9 | 0,2 | 0,3 | 0,6 | -32,6 | -18,5 | -6,3 | 0,2 | 0,3 | 0,6 |
| 01/04/2017 | 01/03/2018 | -59,2 | -29,7 | -12,9 | - | - | - | -36,6 | -22,8 | -6,4 | - | - | - |
| 01/08/2017 | 01/08/2018 | -34,7 | -20,7 | -10,8 | 0,8 | 1,3 | 2,4 | -31,5 | -18,3 | -8,7 | 0,8 | 1,3 | 2,8 |
| 05/01/2018 | 25/01/2019 | -39,2 | -25,9 | -16 | - | - | - | -32,8 | -23 | -13 | - | - | - |

*Valores negativos correspondem a recalques.

Tabela 4.4: Deslocamentos horizontais (EW) – radar orbital.

| | | Área 1 | | | | | | Área 2 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Datas | | Velocidade (mm/ano) | | | Desvio Padrão | | | Velocidade (mm/ano) | | | Desvio Padrão | | |
| Início | Fim | Máx | Méd | Min | Min | Médio | Máx | Máx | Méd | Min | Min | Méd | Máx |
| 01/02/2014 | 01/02/2015 | -34,2 | -12,7 | 2,1 | 1,5 | 1,9 | 2,3 | -14,1 | -2,8 | 9,4 | 1,4 | 1,9 | 2,3 |
| 01/03/2014 | 01/03/2015 | -30,7 | -13 | 2,9 | 1,4 | 1,9 | 2,3 | -16,5 | -3 | 8,7 | 1,4 | 1,9 | 2,3 |
| 01/06/2014 | 01/06/2015 | -29,4 | -8,1 | 8,2 | 1,7 | 2,1 | 2,6 | -14,6 | -0,6 | 11,6 | 1,5 | 2 | 2,5 |
| 01/09/2014 | 01/09/2015 | -32 | -15,1 | -1,1 | 1,7 | 2,2 | 2,9 | -23,5 | -7,2 | 3,8 | 1,6 | 2,1 | 2,7 |
| 01/11/2014 | 01/11/2015 | -30,1 | -14,9 | -0,8 | 1,7 | 2,2 | 2,6 | -18,3 | -4,4 | 7,6 | 1,6 | 2,1 | 2,5 |
| 01/06/2015 | 01/06/2016 | -46,5 | -24,7 | -1,7 | 4,4 | 4,4 | 4,4 | -29,4 | -12,1 | 7,9 | 4,4 | 4,4 | 4,4 |
| 01/11/2015 | 01/11/2016 | -36,6 | -17,9 | -3,9 | 0,6 | 0,9 | 1,5 | -29,8 | -8,3 | 4,8 | 0,7 | 0,9 | 1,5 |
| 01/05/2016 | 01/04/2017 | -73,7 | -36,3 | -8,1 | 0,4 | 0,6 | 1 | -28,1 | -9,8 | 4 | 0,4 | 0,6 | 1,2 |
| 01/04/2017 | 01/03/2018 | -55 | -31,1 | -6,9 | 1,9 | 2,7 | 4,3 | -26,2 | -10,1 | 8,7 | 1,8 | 2,6 | 5,3 |
| 01/08/2017 | 01/08/2018 | -40,1 | -21,4 | -5,7 | 1,6 | 2,6 | 4,2 | -20,7 | -6,1 | 15,9 | 1,6 | 2,5 | 4,8 |
| 05/01/2018 | 25/01/2019 | -53,4 | -27,6 | -10,2 | - | - | - | -25,8 | -11,5 | -1,3 | - | - | - |
| 05/01/2018 | 25/05/2019 | -52,4 | -27,3 | -9,7 | - | - | - | -33,5 | -11,3 | 1,8 | - | - | - |

*Valores negativos correspondem ao deslocamento para o sentido oeste.

Através dos dados tratados de deslocamentos em função do tempo apresenta-se a seguir as principais avaliações:

- Determinando-se os valores acumulados médios entre os anos de monitoramento, nota-se que os deslocamentos na direção leste-oeste para a Área 1 já atingiram cerca de 132 mm para oeste, enquanto para a Área 2 o montante é de aproximadamente 46 mm para oeste, ou seja, os deslocamentos horizontais na Área 1 são cerca de 3 vezes

maiores que na Área 2. Este comportamento diferencial entre as áreas 1 e 2, quanto a deslocamentos horizontais, justifica o aparecimento de trincas na orientação geográfica apresentada na Figura 4.7. Também é possível observar uma aceleração dos movimentos horizontais entre 2016 e 2018, quando foram registradas as maiores velocidades médias de deslocamento para a Área 1, 36 mm/ano e 31 mm/ano em direção oeste, enquanto a área 2 apresentou registros neste período em torno de 10 mm/ano.

- Para os deslocamentos verticais, por sua vez, o somatório das velocidades entre 2014 e 2019 é 121,6 mm para a Área 1 e 106,9 mm para a Área 2. Assim como observado nos deslocamentos horizontais, nota-se que as maiores acelerações do movimento vertical foram registradas entre 2016 e 2018. Observa-se que os deslocamentos verticais na Área 1 são pouco superiores à Área 2, diferentemente do que ocorre para os deslocamentos horizontais (3 vezes maiores);

- Por meio da análise conjunta dos dados indicados na Tabela 4.3 e na Tabela 4.4 e da representação da evolução das velocidades dos deslocamentos indicada na Figura 4.8, observa-se que os deslocamentos verticais possuem ligeiras diferenças entre as áreas 1 e 2. Porém, mesmo que tais deslocamentos verticais diferenciais sejam reduzidos, pequenas distorções angulares podem provocar danos estruturais às residenciais como trincas, empenamento de portas e janelas, outros.

Com a finalidade de comparação entre o comportamento de deslocamentos no condomínio e o rebaixamento de água, os dados de monitoramento de deslocamentos nas áreas 1 e 2 foram plotados em conjunto com os dados de monitoramento de nível freático do PZ-02/02. Este instrumento é o mais representativo devido à proximidade com o condomínio e devido à cota de topo em que foi instalado, além do fato de possuir leituras desde antes de 2004 até o período atual (2019), Figura 4.9.

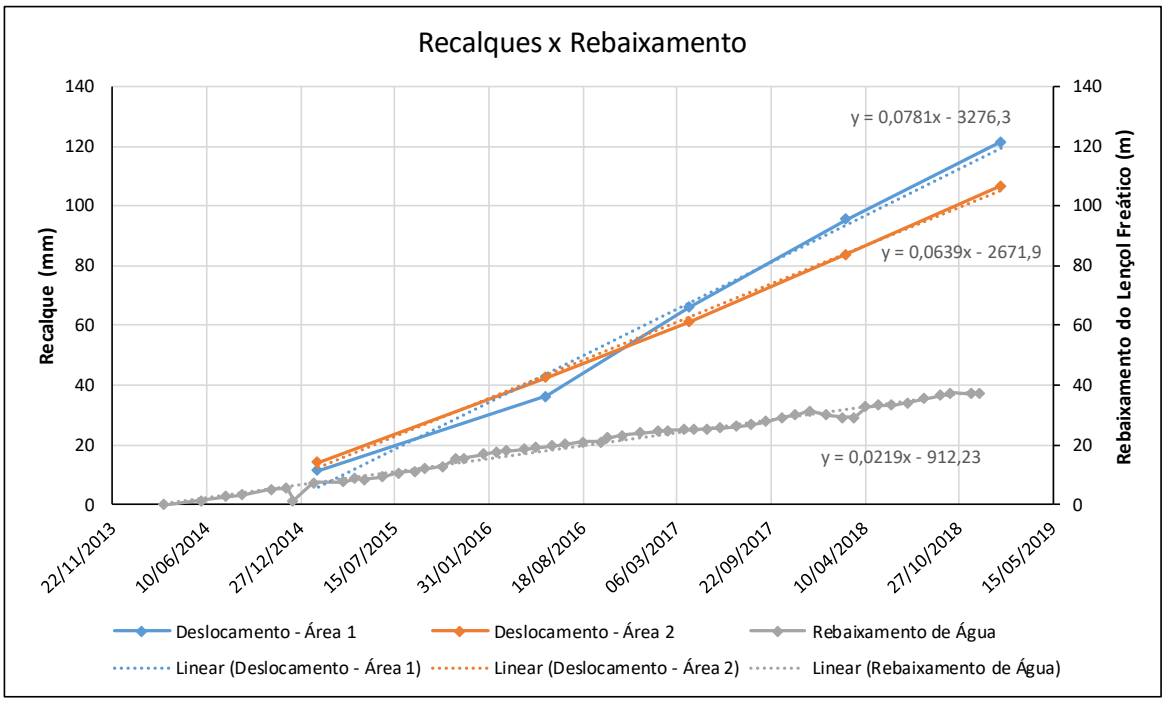


Figura 4.9: Comparativo entre os dados de rebaixamento e deslocamentos da área 1 e área 2.

Uma vez que foram disponibilizados dados de deslocamentos somente a partir de 2014, realizou-se uma retroanálise para a definição dos recalques anteriores a esta data. Essa extrapolação foi possível, visto que a proporção entre a taxa de rebaixamento do nível d'água observada no PZ 02/02-A e a taxa de subsidência entre 2014 e 2019 apresentou comportamento aproximadamente linear.

Os critérios e a metodologia adotada para a retroanálise dos dados são apresentados a seguir:

- Definição das taxas de variação, a partir de regressão linear, por meio da ferramenta linha de tendência no programa Excel, Figura 4.9.

- Definição da proporção entre as taxas de monitoramento de deslocamentos e do rebaixamento de água;

- Extrapolação das curvas para as demais datas anteriores a 2014, utilizando-se interpolação linear.

A Figura 4.10 mostra as curvas extrapoladas por retroanálise da área 1, da área 2 e da área total do condomínio.

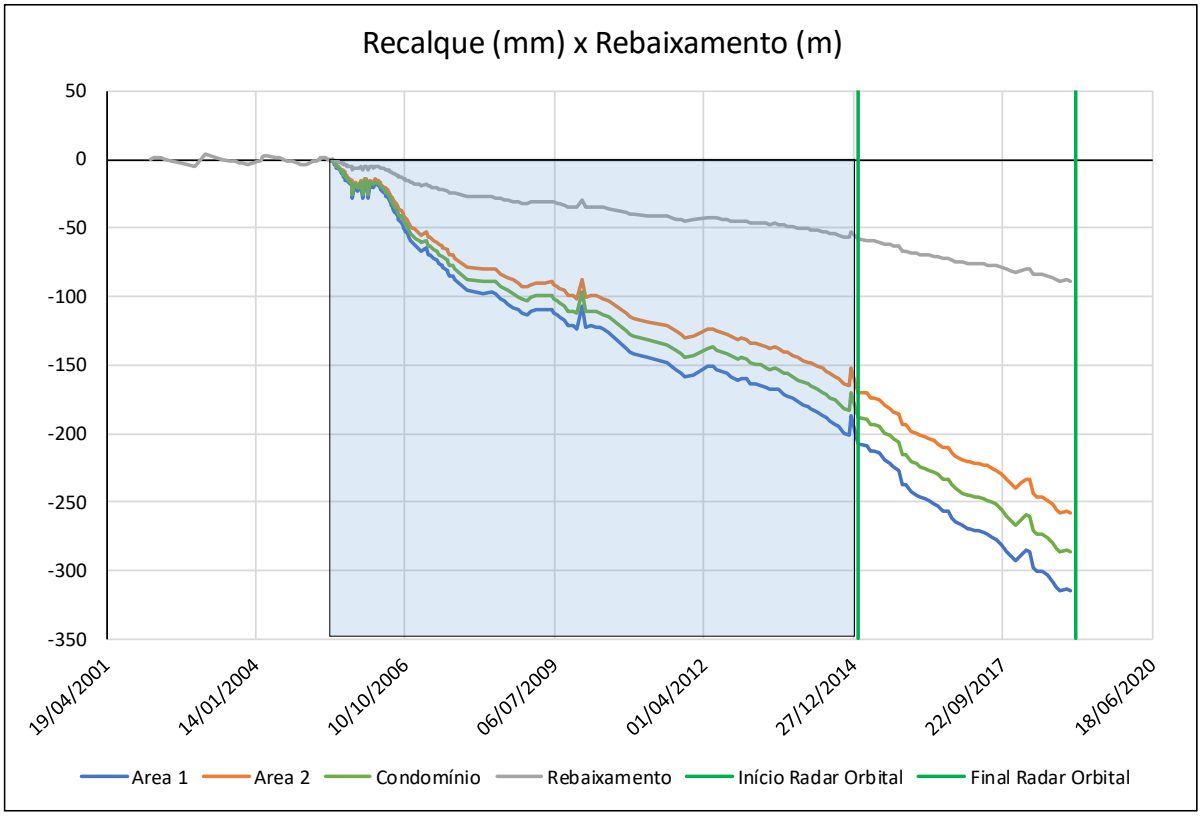


Figura 4.10 – Curvas de deslocamentos por retroanálise.

Com os dados extrapolados estima-se recalque total, desde o início operacional (2004), de aproximadamente 31 cm para a área 1, 25 cm para a área 2 e 28 cm para a área total do condomínio.

No contexto de avaliação do comportamento de subsidência e rebaixamento de água no entorno da cava de Capão Xavier foram, ainda, avaliados os deslocamentos na BR040 e em subáreas do condomínio, para um melhor entendimento do comportamento global. A Figura 4.11 mostra a área do entorno e os recalques acumulados nas 39 áreas subdivididas para o período de monitoramento disponibilizado (2014-2018). Os quadros em cinza remetem às áreas nas quais não foram encontradas informações do radar orbital em algum dos anos avaliados.

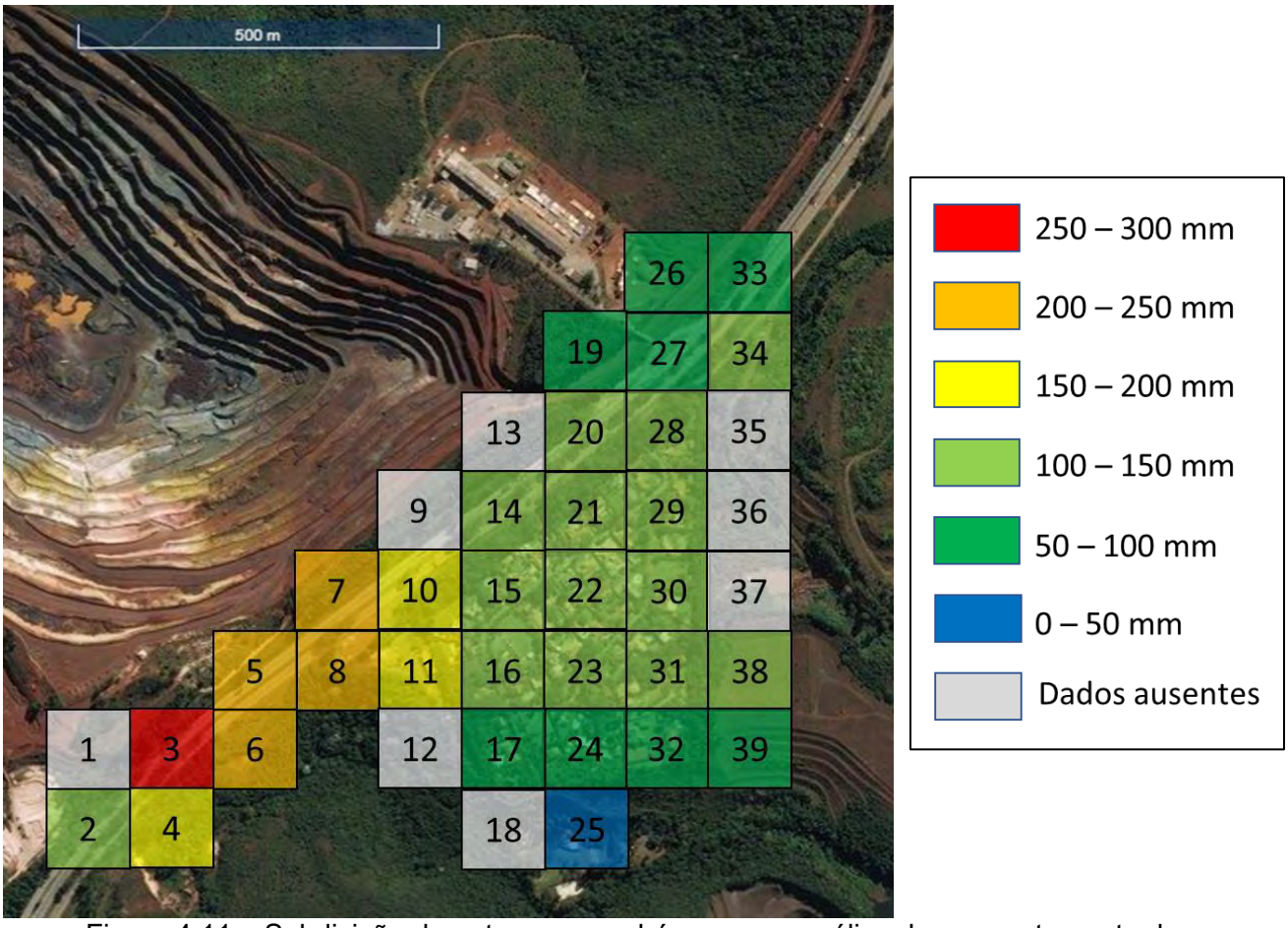


Figura 4.11 – Subdivisão do entorno em subáreas para análise de comportamento dos deslocamentos verticais aliado ao rebaixamento de água.

Os dados médios de deslocamento por subárea foram agrupados em deslocamentos na região da BR-040 e na região do condomínio. Estes dados foram plotados em conjunto com os dados de monitoramento do PZ-02/02-A. A Figura 4.12 apresenta o gráfico de evolução de deslocamento na BR-040 e a Figura 4.13 apresenta o gráfico de evolução de deslocamento no condomínio, ambos plotados com os dados de rebaixamento de água.

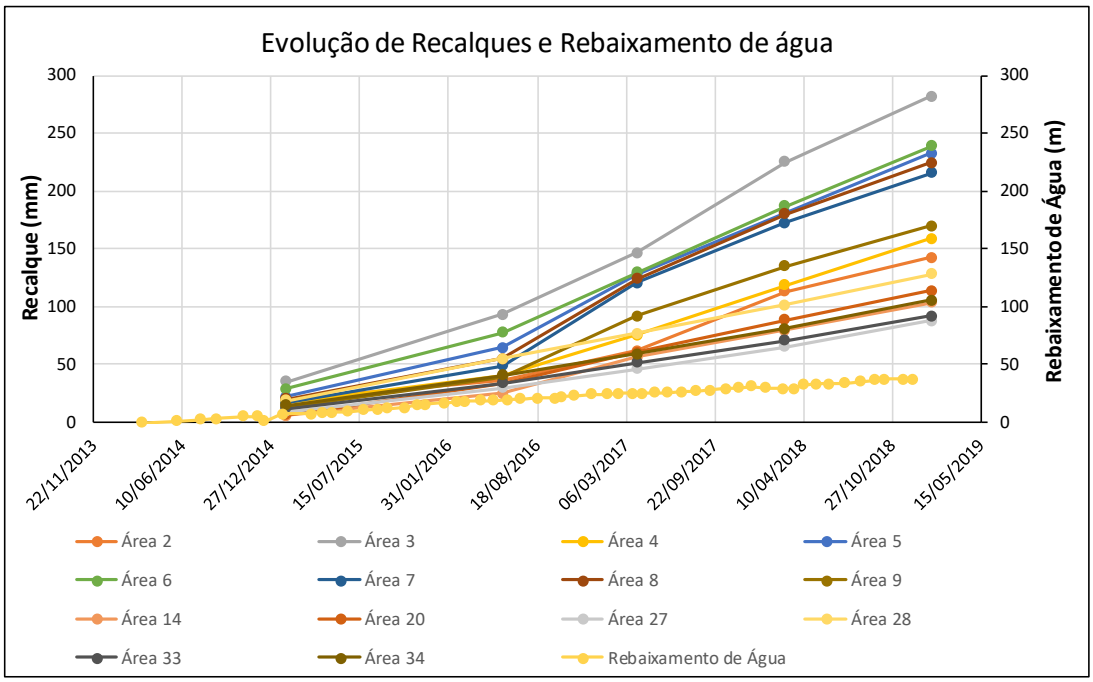


Figura 4.12: Evolução dos deslocamentos e rebaixamento de água na BR-040.

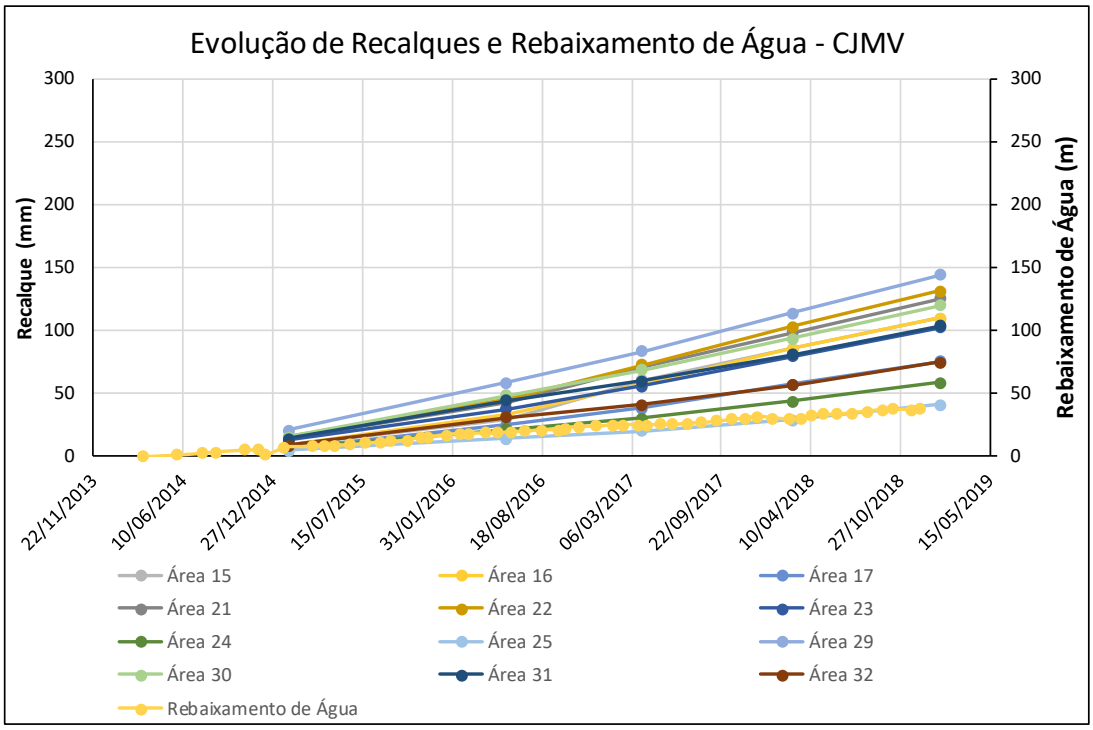


Figura 4.13: Evolução dos deslocamentos e rebaixamento de água no condomínio.

Através dos gráficos apresentados acima são expostas a seguir algumas avaliações do comportamento observado:

- Avaliação na BR-040: A evolução dos dados de deslocamento na região da BR-040 entre os anos de 2014 a 2019 são de maior ordem de grandeza na região sudoeste da rodovia, recalques totais da ordem de 22 a 28 cm. Na região nordeste da via os recalques são da mesma ordem de grandeza dos deslocamentos no condomínio, recalques na rodovia entre 9 e 18 cm. Observa-se, ainda, um aumento nos deslocamentos da BR-040 no ano de 2016. Após esta data, observa-se um comportamento da curva que pode ser associado a uma ligeira tendência de estabilização dos dados. Entretanto, faz-se necessária a obtenção de mais dados para confirmar essa tendência;

- Avaliação no condomínio: A evolução dos dados de deslocamento no condomínio apresentou comportamento linear sem tendência de estabilização. Os recalques nessa região entre os anos de 2014 a 2019 são da ordem de 4 a 15 cm. Observa-se, ainda, quando na avaliação dos dados apresentados na Figura 4.8, que nos anos entre 2014 e 2015 os deslocamentos apresentaram-se mais homogêneos, já a partir de 2016 os deslocamentos apresentaram-se mais heterogêneos, representando recalques diferenciais;

- Tanto na avaliação de dados de deslocamentos no condomínio, quanto na BR-040 os dados apresentaram-se correlacionados com a inclinação da curva de rebaixamento de água. Este fato já era esperado, visto que os processos de subsidências são diretamente proporcionais ao rebaixamento.

## 4.2 AVALIAÇÃO DE RECALQUES E DANOS ESTRUTURAIS

### 4.2.1 Caracterização dos materiais

Foram realizados no ano de 2008, pelo laboratório de geotecnia da UFMG, uma campanha de investigação geológica-geotécnica com a finalidade de determinar a caracterização físico-química e mecânica dos materiais argila vermelha e argila branca existentes na região da cava da mina Capão Xavier. A campanha foi realizada em amostras deformadas e indeformadas, Figura 4.14 e Figura 4.15. As amostras denominadas PC 04, PC 06 e PC 22 foram retiradas da argila vermelha e as amostras identificadas como PC 12 e PC 20 foram retiradas da argila branca. A Figura 4.16 mostra a localização das amostras coletadas em 2007. Em mapeamento geológico de campo (ver relatório 19531-DCPX-G01-RL003) considerou-se a argila vermelha como o material mais representativo da camada sedimentar terciária do condomínio.

Amostra PC 04 Amostra PC 06 Amostra PC 22

Figura 4.14: Amostras argila vermelha. Fonte: Doc.[4].

Amostra PC 12 Amostra PC 20

Figura 4.15: Amostras argila branca. Fonte: UFMG, 2008.

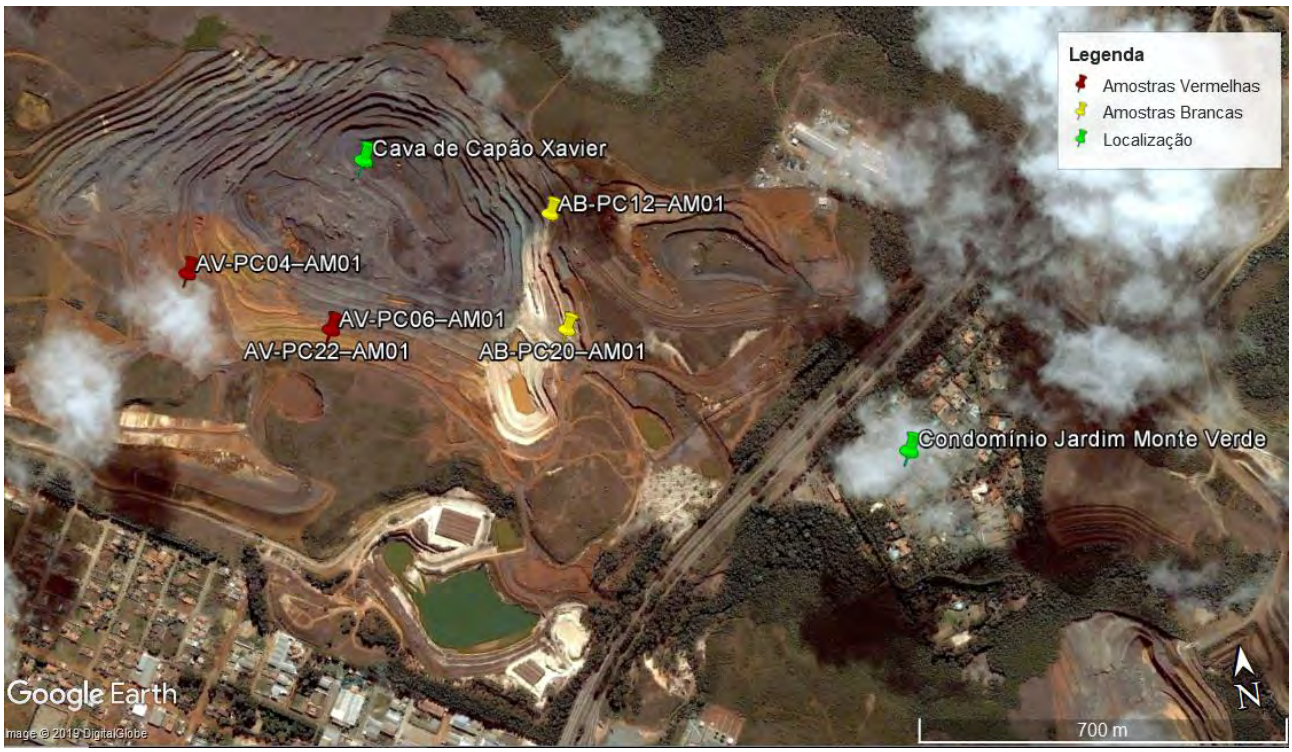


Figura 4.16 – Localização das amostras coletadas. (Fonte: Google Earth, acesso em 12/03/19 e imagem gerada correspondente a data de 31/05/2008).

Nas amostras coletadas foram realizados diversos ensaios: caracterização geotécnica, composição química, composição mineralógica, agentes cimentantes, ensaio de adensamento, ensaio de cisalhamento direto e de sucção. Os resultados destes ensaios são apresentados mais detalhadamente no relatório de consolidação de dados (19531-DCPX-G01-RL002). Neste relatório serão apresentados os dados de resultados e consolidação apenas dos ensaios necessários para desenvolvimento do estudo de subsidência.

### 4.2.2 Seções geológicas e níveis de água

Para estudo das subsidências torna-se necessário a definição dos contatos geológicos, espessura da camada sedimentar terciária e níveis de água do subsolo. Para tanto, foram fornecidos pela VALE o modelo geológico e dados piezométricos. A Figura 4.17 mostra em planta a localização da seção considerada pela TETRA TECH mais representativa para o estudo de subsidências e a Figura 4.18 mostra a seção FF' de análise.

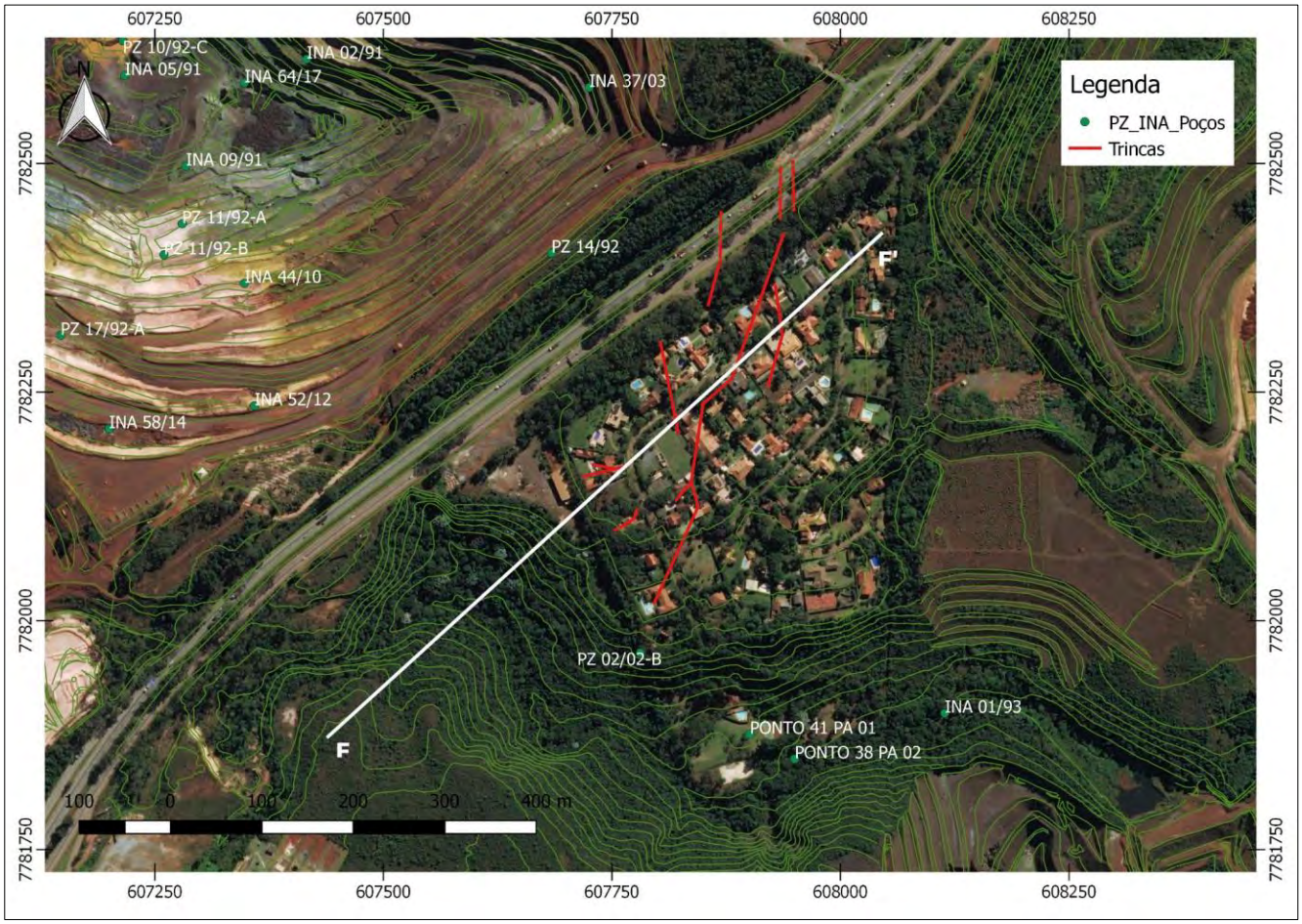


Figura 4.17 – Planta com a locação da seção FF'.

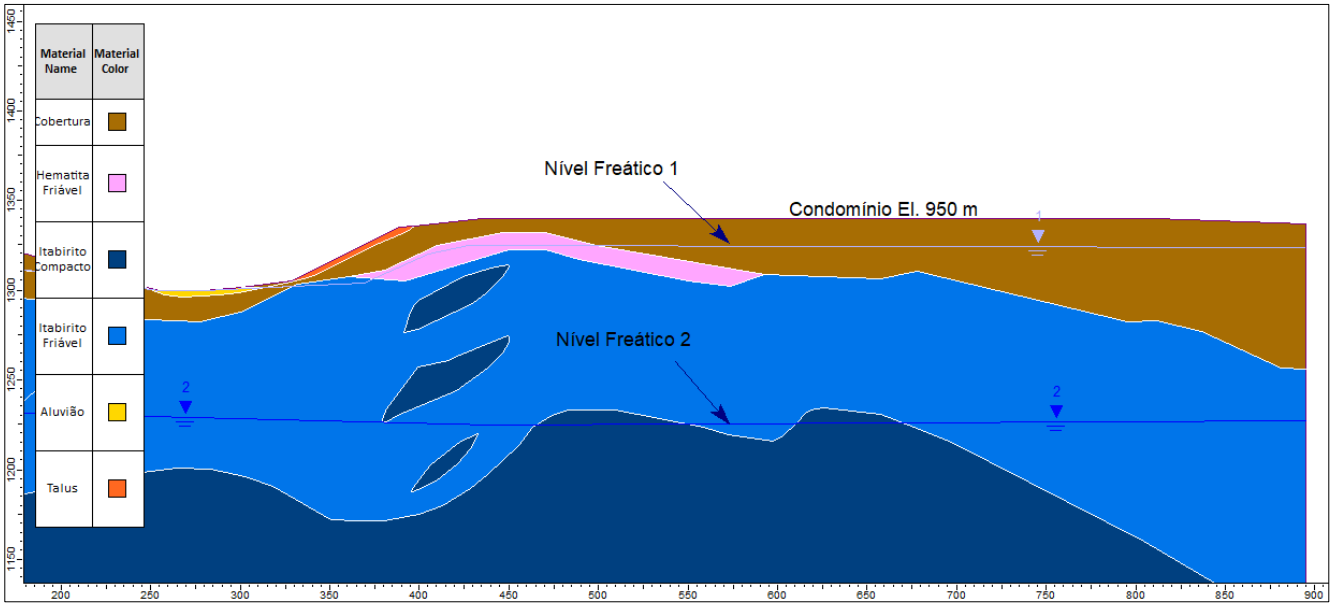


Figura 4.18 - Seção FF'.

Os níveis de água apresentados na Figura 4.18 representam os seguintes cenários:

- Nível freático 1: nível freático correspondente ao cenário *in situ*, antes do início operacional da mina, 2004. Este nível foi definido pela TETRA TECH através dos dados de monitoramento de instrumentos;

- Nível freático 2: nível freático correspondente ao cenário atual. Este nível freático foi definido através das curvas piezométricas de 01/2019 fornecidas pela VALE.

### 4.2.3 Avaliação de recalques na camada sedimentar terciária

<u>Recalques Totais</u>

Para estimativa do recalque devido ao processo de rebaixamento utilizou-se a metodologia apresentada por Fernandes (2016) e Pinto (2006). Esta metodologia propõe a utilização da Equação 4.1 para estimativa de recalques em camadas de solo sobreadensadas, da Equação 4.2 para camadas de solo normalmente adensadas e, para camadas de solo em que a tensão efetiva supera a tensão de pré-adensamento, a utilização Equação 4.3.

$$\rho = \frac{h0}{1+e0}.Cr.log\frac{\sigma' + \Delta\sigma'}{\sigma'} \qquad \text{Equação 4.1}$$

$$\rho = \frac{h0}{1+e0}.Cc.log\frac{\sigma' + \Delta\sigma'}{\sigma'} \qquad \text{Equação 4.2}$$

$$\rho = \frac{h0}{1+e0}.(Cr.log\frac{\sigma'a}{\sigma'} + Cc.log\frac{\sigma'+\Delta\sigma'}{\sigma'a})$$

Equação 4.3

Sendo:

Cr o índice de recompressão;
Cc o índice de compressibilidade;
$h_0$ a altura da camada em estudo;
e0 o índice de vazios inicial;
$\sigma'a$ a tensão efetiva de pré-adensamento;
$\sigma'$ a tensão efetiva inicial;
$\Delta\sigma'$ o incremento de tensão efetiva devido ao rebaixamento do nível freático;

Para cálculo dos recalques estimados considerou-se os seguintes critérios e premissas:

- Devido à inexistência de ensaios nos solos da camada sedimentar terciária na região do CJMV, considerou-se que a camada superficial possui a mesma composição da camada sedimentar terciária, correspondente às amostras da argila vermelha ensaiadas pela UFMG em 2008 (Para maiores detalhes da geologia local ver relatório 19531-DCPX-G01-RL003);

- Para camadas mais profundas, profundidades superiores a 60 m, definiu-se a tensão de pré-adensamento para o ponto médio da camada como a soma entre a tensão de pré-adensamento definida em ensaio e a tensão exercida pelo peso da camada superior ao ponto médio. Este critério foi adotado, tendo em vista que as camadas mais profundas já sofreram tensões superiores à tensão definida em ensaio, exercido pelo peso próprio da camada superior, dado que as amostras foram coletadas em superfície;

- Posição da linha freática antes do início do rebaixamento correspondente a 15 m abaixo da cota do terreno, profundidade estimada conforme dados de monitoramento dos instrumentos, Doc.[5].

Os valores referentes ao índice de compressão, Cc, índice de recompressão, Cr, e tensão de pré-adensamento foram definidos através das curvas de adensamento geradas pelos ensaios de laboratório, realizados pela UFMG (2008), Figura 4.19, e correspondem respectivamente a 1,037, 0,049 e 700 kPa.

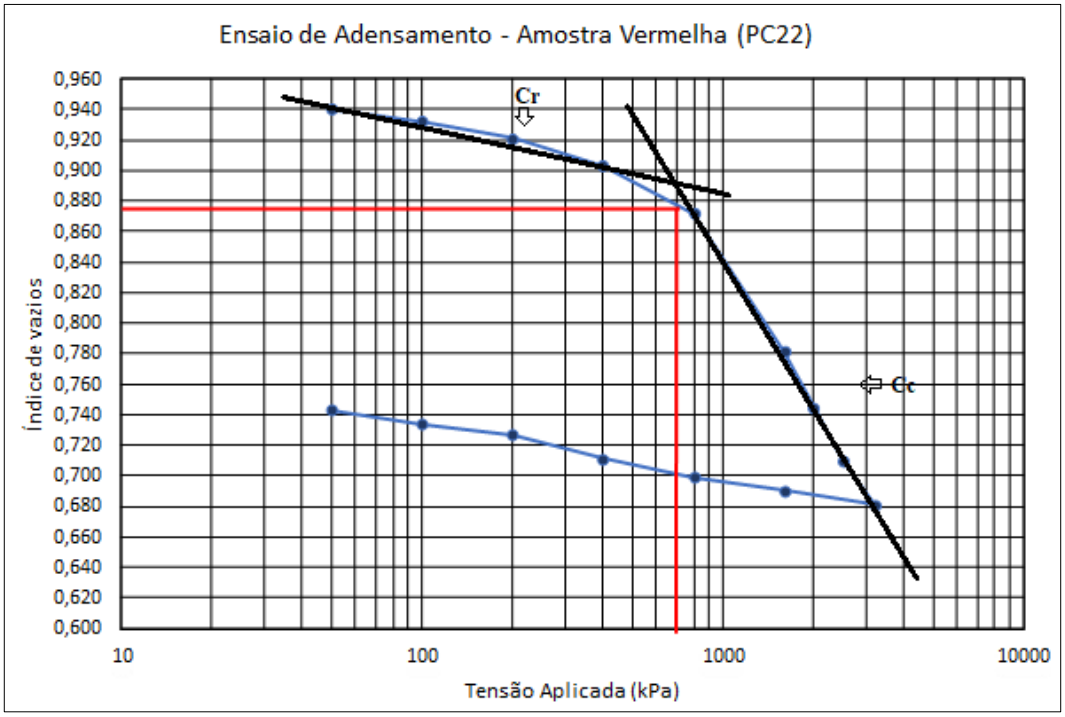


Figura 4.19: Ensaio de adensamento na Argila Vermelha. (Adaptado de UFMG, 2008).

Para os cálculos de recalques estimados considerou-se como tensão efetiva máxima a tensão determinada quando no rebaixamento total do nível de água. Nesta condição, a poropressão já foi toda dissipada e a tensão total é igual a tensão efetiva. Os cálculos foram realizados para camadas de espessuras de 40 m, 70 m, 90 m e 120 m, e os resultados obtidos foram apresentados na Tabela 4.5. A Figura 4.20 apresenta um esquemático das condições calculadas.

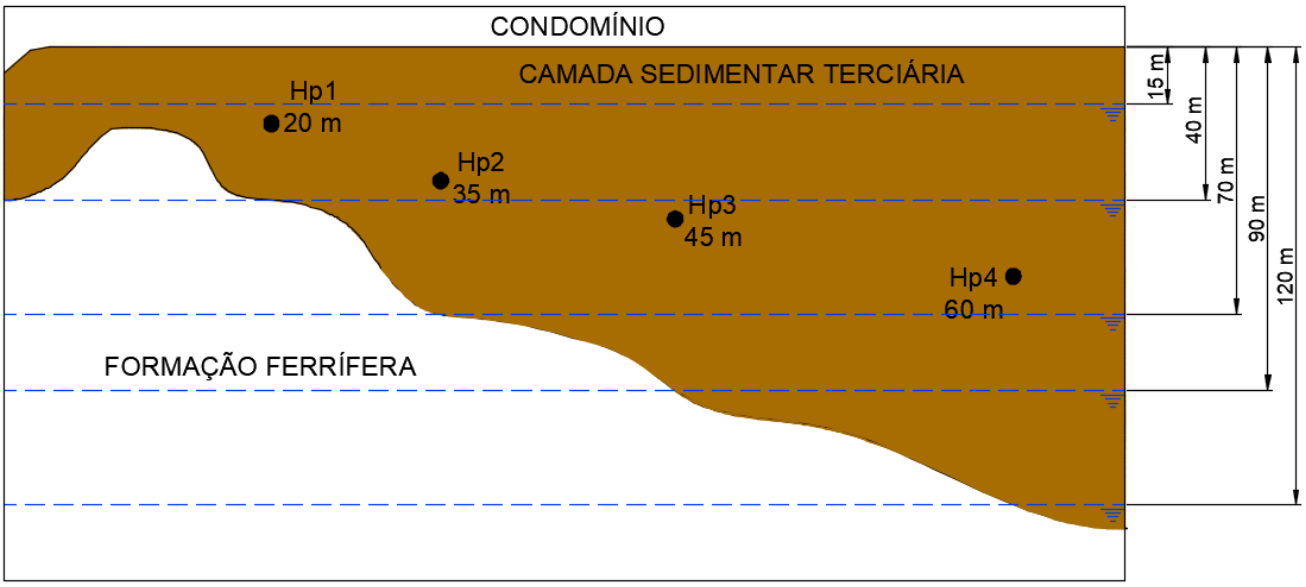


Figura 4.20 – Esquemático de cálculo dos recalques para diversas espessuras de camadas.

Tabela 4.5: Estimativas de recalque no CJMV devido ao rebaixamento para diferentes espessuras de camadas.

| H (m) | Hp (m) | σt(kPa) | Rebaixamento (m) | hw (m) | u | σ'(kPa) | Cc | Cr | e | ρ (m) | ρ (cm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 40,00 | 20,00 | 390,00 | 0,00 | 5,00 | 50,00 | 340,00 | 1,04 | 0,05 | 0,90 | 0,00 | 0,00 |
| | | | 25,00 | 0,00 | 0,00 | 380,00 | | | | 0,05 | 4,98 |
| 70,00 | 35,00 | 705,00 | 0,00 | 20,00 | 200,00 | 505,00 | | | | 0,00 | 0,00 |
| | | | 55,00 | 0,00 | 0,00 | 665,00 | | | | 0,22 | 21,58 |
| 90,00 | 45,00 | 915,00 | 0,00 | 30,00 | 300,00 | 615,00 | | | | 0,00 | 0,00 |
| | | | 75,00 | 0,00 | 0,00 | 855,00 | | | | 0,33 | 33,21 |
| 120,00 | 60,00 | 1230,00 | 0,00 | 45,00 | 450,00 | 780,00 | | | | 0,00 | 0,00 |
| | | | 105,00 | 0,00 | 0,00 | 1140,00 | | | | 0,51 | 51,00 |

Onde: H = espessura da camada; Hp = profundidade média; σt = tensão total; σa = tensão de pré-adensamento; hw = altura de carga hidráulica; u = poropressão; ρ = recalque.

Para estruturas usuais de aço ou concreto, Skempton-MacDonald (1956) apresentaram as seguintes recomendações para os recalques totais limites:

- Para areias:

Recalque total máximo = 4 cm para sapatas isoladas;
Recalque total máximo = 4 a 6,5 cm para radiês.

- Para argilas:

Recalque total máximo = 6,5 cm para sapatas isoladas;
Recalque total máximo = 6,5 a 10 cm para radiês.

Tendo em vista os resultados de estimativas de recalques totais e os valores limites propostos por Skempton-MacDonald (1956) são apresentadas a seguir as principais considerações:

- Através dos resultados determinados de recalque total por espessura da camada, observa-se que quanto maior o rebaixamento de água, maior são os recalques estimados e que os recalques são tanto maiores quanto maiores são as espessuras das camadas;

- Os recalques totais estimados para as camadas com pontos médios a 35 m e 45 m apresentaram-se similares aos valores de recalque total estimados pela retroanálise dos dados de monitoramento por radar orbital (Figura 4.10). Os recalques estimados pela retroanálise são da ordem de 25 a 31 cm, enquanto que para os pontos médios a 35 m e 45 m de profundidade os recalques estimados foram da ordem de 21 cm a 33 cm. Os valores de recalques totais estimados para estes cenários são superiores aos limites de recalques totais propostos por Skempton e MacDonald (1956).

Salienta-se que as estimativas de recalques foram realizadas com os dados de ensaios referentes à argila vermelha. As amostras foram retiradas na região da cava em 2007 e através

dos dados de ensaios de laboratório tentou-se representar toda a camada sedimentar terciária da região do condomínio. Entretanto, sabe-se, pelos dados de sondagens e mapeamento de campo (ver relatório 19531-DCPX-G01-RL003 referente aos aspectos geológicos), que o material sedimentar é heterogêneo e que, dependendo da profundidade da camada, há solos por vezes mais argilosos e plásticos e por vezes mais granulares, além da presença de camadas de canga, colúvio e presença de tálus.

A constituição heterogênea da camada sedimentar terciária, aliada às variações de orientação dos contatos geológicos (Figura 4.8), provocam recalques com comportamentos também heterogêneos e difíceis de quantificar, apenas pelos dados existentes. Porém os valores de recalques apresentados na Tabela 4.3, calculados através dos dados existentes considerando camadas homogêneas de solo argiloso, constituem valores importantes para uma sensibilidade quantitativa de recalques esperados. **Observa-se que os valores de recalque para as camadas de 70 m e 90 m, correspondente a 21,6 cm e 33,2 cm, respectivamente, são da mesma ordem de grandeza dos valores estimados pelo método de retroanálise, apresentada no item 4.1, correspondentes a valores da ordem de 25 cm a 31 cm.**

Para as camadas de menores espessuras, o valor de recalque estimado apresentou certa divergência com os valores estimados pela retroanálise. Entretanto, estas camadas são submetidas, em maior escala, a deslocamentos também horizontais, devido a reestruturação e deslocamento do solo. Através dos dados de monitoramento leste-oeste de radar (Figura 4.8), percebe-se que há um elevado gradiente de deslocamentos horizontais que é coincidente com a região de existência de trincas. Este comportamento indica abertura de trincas na região de transição, Figura 4.21.

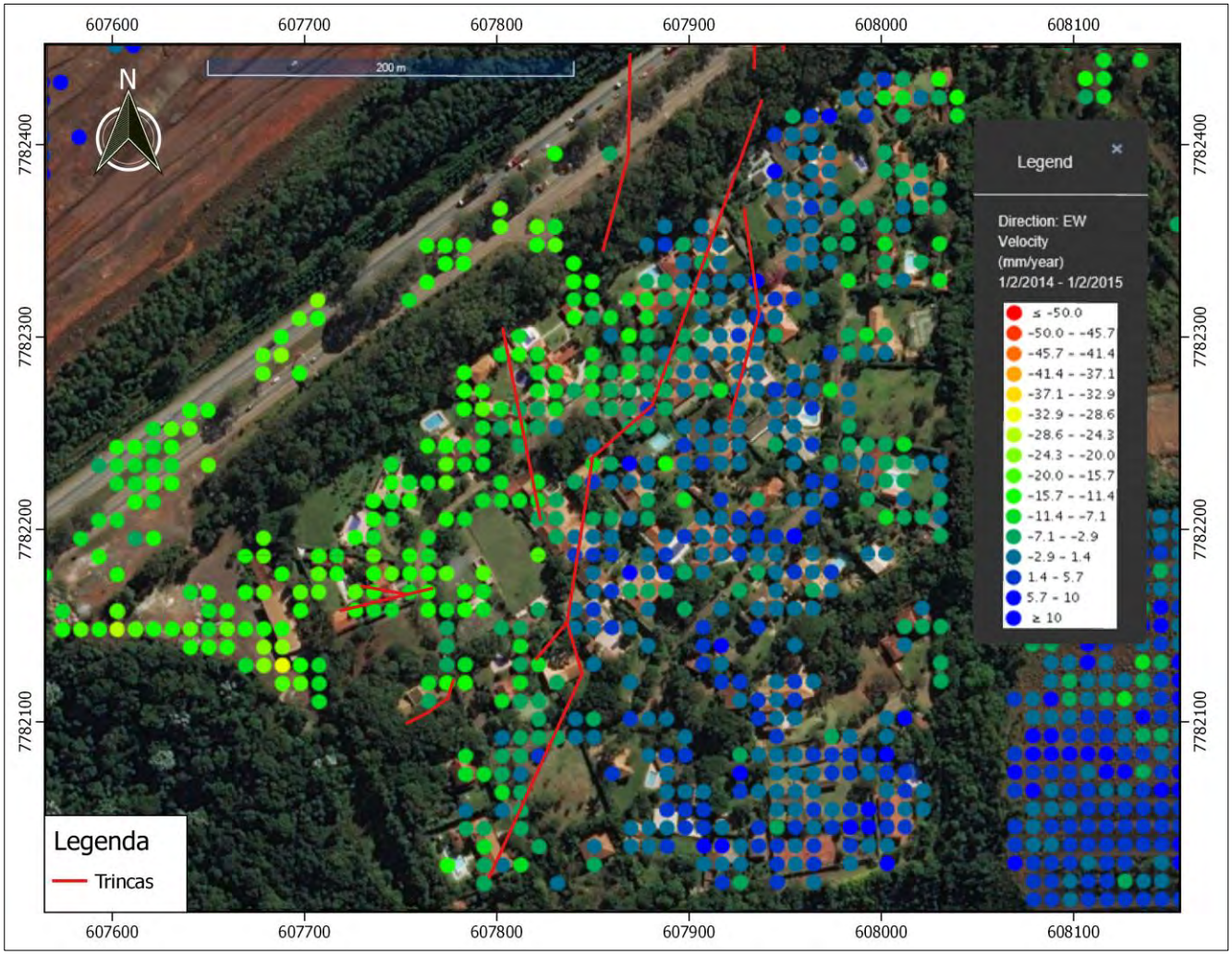


Figura 4.21 – Região de transição e formação de trincas – dados de monitoramento leste-oeste entre 2014 e 2015.

A Figura 4.22, elaborada com base nos dados geofísicos e nas sondagens realizadas, evidencia o alinhamento da bacia sedimentar terciária paralelamente às trincas na direção N-NE/S-SW.

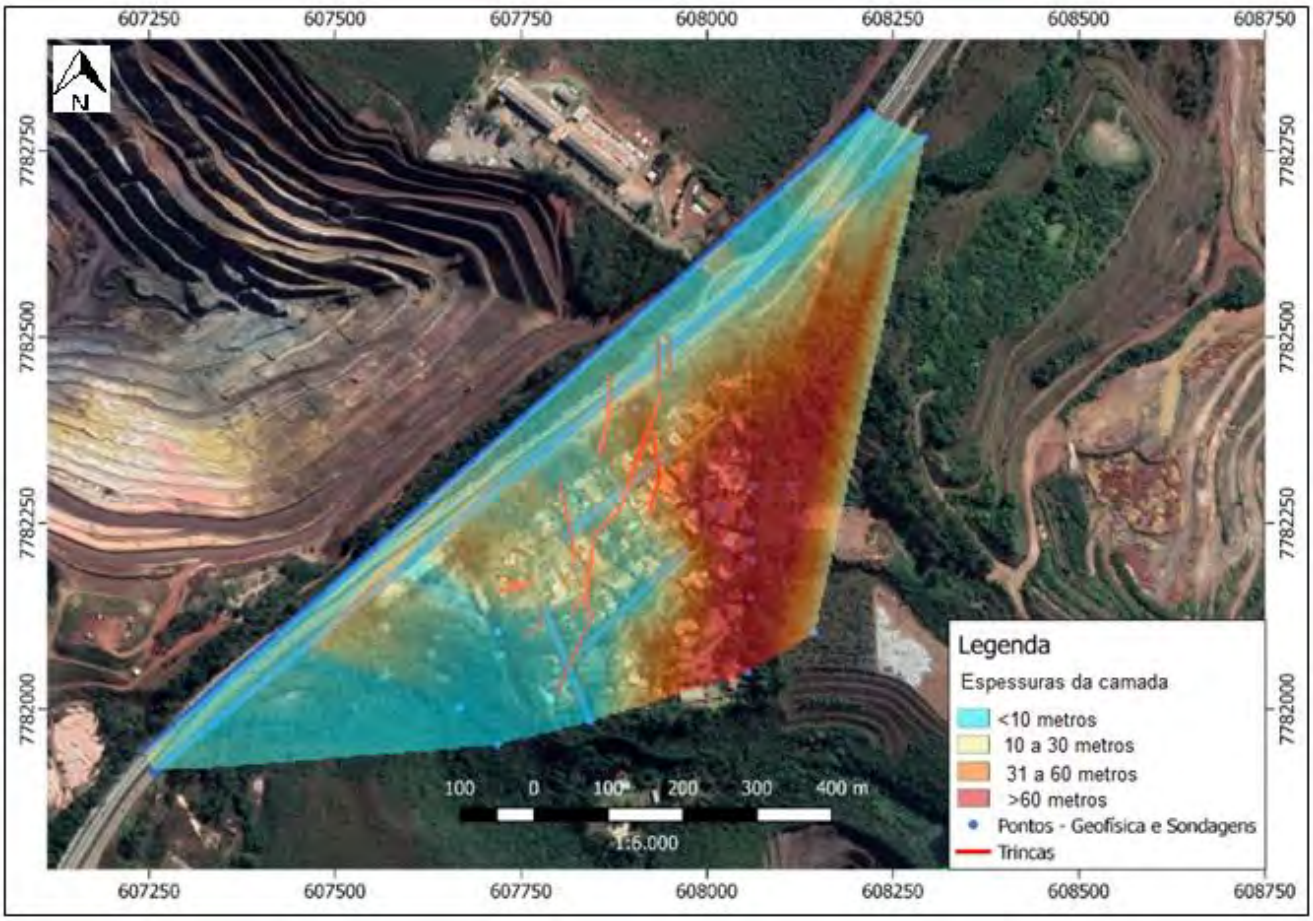


Figura 4.22 – Espessuras das camadas sedimentares terciárias.

Para melhor entendimento, é descrito a seguir a cinemática do processo físico: as subsidências ocorrem com maior efeito nas camadas mais profundas, o material de solo superficial nas camadas menos espessas é reconformado e um deslocamento horizontal diferencial é exercido principalmente nestas camadas, propiciando condições favoráveis para a formação de trincas. Destaca-se que a plastificação do solo nas zonas em que as trincas são formadas pode potencializar os deslocamentos.

Recalques Diferenciais

Além das estimativas de recalques totais, foram realizados cálculos de sensibilidade quanto à um possível recalque diferencial devido ao rebaixamento de água e o efeito que a forma geométrica do cone de rebaixamento exerce sobre as adjacências.

O efeito estimado nesta etapa independe do tipo de fundação: sapatas, radies, fundações profundas. Pois o efeito simulado se dá pela variação de tensões efetivas diferenciais, devido ao rebaixamento de água, em dois pontos quaisquer, em que há um diferencial de nível freático. O parâmetro que representa este comportamento é identificado como distorção

angular (β) e é dado pela divisão do recalque diferencial pelo comprimento entre dois pontos de apoio, Equação 4.4, conforme ABNT NBR 6122/2010.

$$\beta = \frac{\Delta\rho}{\mathrm{L}} \qquad \text{Equação 4.4}$$

Onde: $\beta$ = distorção angular;

$\Delta\rho$= recalque diferencial;

L = comprimento entre dois pontos de análise.

A Figura 4.23 apresenta um esquemático referente ao rebaixamento de água, forma geométrica do cone de rebaixamento e recalques diferencias ($\Delta\rho$) por um comprimento L.

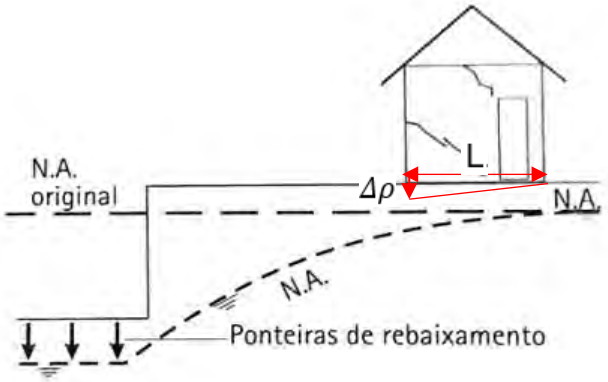


Figura 4.23: Esquemático ilustrativo do processo de rebaixamento e recalque diferencial.

Para a estimativa dos recalques diferenciais considerou-se os seguintes critérios:

- Avaliação do recalque produzido pela variação de tensão efetiva entre dois pontos de apoio com distância entre eles similar às distâncias usuais de pilares de residências. Adotou-se comprimento (L) igual a 3 m;

- Para estimativa, adotou-se como premissa a fixação de tensão efetiva em uma das extremidades de apoio do comprimento L e variação da tensão efetiva ocasionada pelo rebaixamento de água na outra extremidade (Figura 4.24);

- Estimativa de variação de tensões para um ponto infinitesimal médio da camada de solo a 35 m, $\gamma n$ = 19 kN/m³ e $\gamma sat$ = 21 kN/m³.

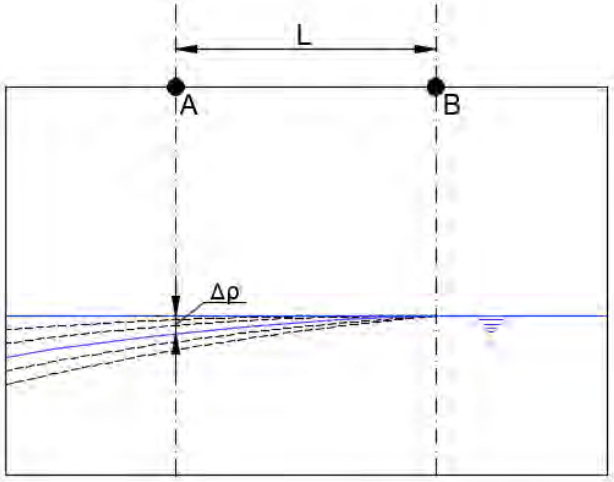


Figura 4.24 – Variação diferencial do rebaixamento de água para um comprimento L entre os pontos de apoio A e B.

Os valores de distorção angular estimados foram comparados com os limites apresentados na literatura e nas normas brasileiras. A norma brasileira ABNT 6118/2014 propõe os seguintes valores limites para recalque diferencial para que não ocorram danos nos elementos:

- Em elementos não estruturais, como paredes de alvenaria, caixilhos e revestimentos: 1/500 (≈ 0,0017 rad), após a construção dos mesmos;

- Em elementos estruturais que devem permanecer planos: 1/600.

A Figura 4.25 apresenta os valores da distorção angular ($\beta$) e os danos associados, sugeridos por Bjerrum (1963) e complementados por Vargas e Silva (1973). A distorção angular crítica ($\delta crít$ ou $\beta$) é quando os recalques diferenciais entre os elementos da fundação aumentam causando fissuras ou trincas visíveis.

Figura 4.25: Distorções angulares críticas e danos estruturais (Bjerrum, 1963 e Vargas e Silva, 1973).

Os resultados de recalque diferencial, distorção e valores comparativos com distorção limite (1/500) são apresentados na Tabela 4.6 e a Figura 4.26 mostra o gráfico de rebaixamento por distorção.

Tabela 4.6: Recalques diferenciais e distorções.

| Hp | σt(kPa) | Rebaixamento (m) | σ'(kPa) | Δρ total (m) | Δρ total (cm) | L (m) | Distorção | Limite Distorção |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 35 | 705,00 | 0,00 | 505,00 | 0,000 | 0,000 | 3 | 0,000 | 0,002 |
| | | 0,10 | 506,00 | 0,0015 | 0,155 | | 0,001 | |
| | | 0,20 | 507,00 | 0,0031 | 0,309 | | 0,001 | |
| | | 0,30 | 508,00 | 0,0046 | 0,462 | | 0,002 | |
| | | 0,40 | 509,00 | 0,0061 | 0,614 | | 0,002 | |
| | | 0,50 | 510,00 | 0,0076 | 0,765 | | 0,003 | |
| | | 0,60 | 511,00 | 0,0092 | 0,915 | | 0,003 | |
| | | 0,70 | 512,00 | 0,0106 | 1,065 | | 0,004 | |
| | | 0,80 | 513,00 | 0,0121 | 1,213 | | 0,004 | |
| | | 0,90 | 514,00 | 0,0136 | 1,361 | | 0,005 | |
| | | 1,00 | 515,00 | 0,0151 | 1,508 | | 0,005 | |

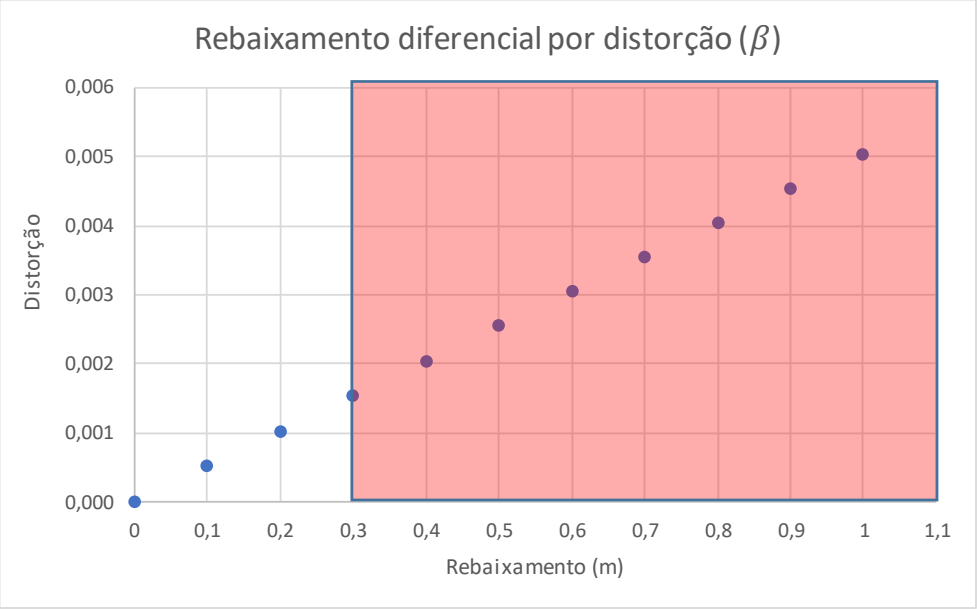


Figura 4.26: Gráfico de rebaixamento de água e distorção angular.

A seguir são apresentadas as principais considerações acerca dos resultados de recalques diferenciais estimados:

- Quando o nível freático é rebaixado por processos de bombeamento de água, a linha freática assume nova orientação (forma tridimensional similar a um cone) e parte do solo nas adjacências perde o suporte que era exercido pela água. Os grãos de solo na região que perdeu suporte são reestruturados e acontece, então, processos de recalque;

- Os resultados mostram que para um rebaixamento diferencial do nível de água entre dois pontos de apoio de comprimento 3 m, similar à distância usual entre dois pilares de uma residência, valores diferenciais de rebaixamento superiores a 0,3 m (30 cm) ocasiona distorções angulares maiores que os limites apresentados na literatura e ABNT 6118/2014, distorção limite = 1/500 = 0,002.

## 5.0 AVALIAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA CAMADA SUPERFICIAL DO CJMV

Conforme hipóteses levantadas no início do estudo de “Diagnóstico da Cava e Entorno de Capão Xavier” apontou-se como possível causa da propagação e potencialização das trincas, às características intrínsecas à camada superficial do CJMV e à mineralogia do solo. Assim, a equipe da Tetra Tech realizou um mapeamento de campo para identificação dos materiais superficiais de ocorrência no CJMV, os dados de mapeamento podem ser consultados com maiores detalhes no relatório 19531-DCPX-G01-RL003, Doc.[8].

Após mapeamento de campo e avaliação dos materiais sob a rodovia BR-040 e Condomínio Jardim Monte Verde, verificou-se semelhança entre os materiais mapeados e a camada sedimentar superficial vermelha, presente na cava de Capão Xavier. Amostras deste material

foram retiradas e ensaiadas pela UFMG no ano de 2008, ao qual foi identificada como Argila Vermelha. Dentre diversos ensaios realizados foram executados ensaios de DRX (Difratometria de Raios-X), MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) e EDS (Espectrometria de Dispersão de Energia) para identificação da mineralogia do material e composição química. Assim, identificou-se a seguinte composição mineralógica (Tabela 5.1):

Tabela 5.1: Composição mineralógica – Argila Vermelha. (UFMG, 2008)

| Amostra | Si % | Al % | Ti % | Fe % |
|---|---|---|---|---|
| Vermelha | 10,56 | 13,89 | 1,10 | 19,07 |

As principais fases cristalinas identificadas nas amostras são apresentadas na Tabela 5.2. Os resultados obtidos por DRX (Difratometria de Raios-X) apresentaram uma evidente predominância do mineral caulinita e boa quantidade de hematita, o que seria responsável pela coloração vermelha do material.

Tabela 5.2: Fases cristalinas identificadas. (UFMG, 2008)

| Símbolo | Nome | Fórmula |
|---|---|---|
| C | caulinita | $Al_2(SiO_5)(OH)_4$ |
| G | gibbsita | $Al(OH)_3$ |
| Q | quartzo | $SiO_2$ |
| H | hematita | $Fe_2O_3$ |
| A | anatásio | $TiO_2$ |

Sabe-se que grupo da Caulinita se caracteriza pela não expansividade com distância interplanar basal de aproximadamente 7,2Å, partículas variando de 0,1 a 0,5 µm e densidade relativa igual a 2,6 para a caulinita, como pode ser verificado na Figura 5.1. Esta unidade estrutural é caracterizada pela constituição do tipo 1:1, ao qual corresponde a materiais com comportamento não expansivo.

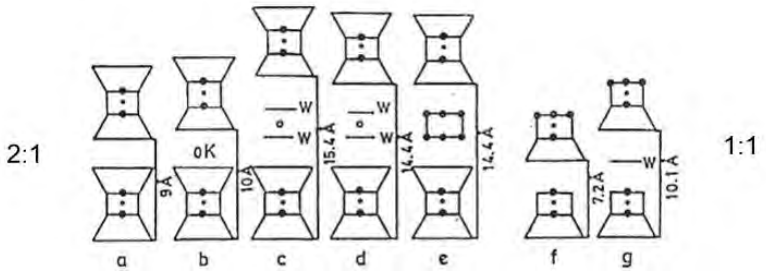


Figura 5.1: Representação esquemática dos minerais argilosos com os respectivos espaçamentos basais. (a) pirofilita-talco; (b) mica; (c) montimorilonita; (d) vermiculita; (e) clorita; (f) caulinita; (g) haloisita.

Para definição do potencial de expansão Skempton (1953) propõe uma correlação entre o Índice de Plasticidade (IP) e a % de argila, ao qual é identificado como Índice de Atividade (A) do material argiloso. Segundo Skempton, a medida da atividade da fração argilosa no solo pode ser feita pela seguinte expressão:

$$A = \frac{IP}{\% < 0{,}002\ mm}$$ Equação 5.1

De acordo com a proposta de Skempton, a argila presente no solo poderá ser classificada conforme a sua atividade, a saber:

- A < 0,75 – Inativa;
- 0,75 < A < 1,25 – Normalmente ativas;
- A > 1,25 – Ativas.

Assim, através dos resultados de ensaios de caracterização do material, Tabela 5.3, definiu-se o valor de atividade do material igual a 0,17 (IP = 7 e % de argila igual a 41) e, assim, representou-se na Figura 5.2 proposta por Skempton.

Tabela 5.3: Resultados dos ensaios de caracterização. (Adaptado de UFMG, 2008).

| Ensaios/ Amostra | Amostra Vermelha |
|---|---|
| w (%) (de campo) | 24,8 |
| LL (%) | 49 |
| LP (%) | 42 |
| IP (%) | 7 |
| $\rho_s$ (g/cm$^3$) | 2,97 |
| Granulometria<br>(Escala ASTM)<br>Pedregulho (%)<br>Areia (%)<br>Silte (%)<br>Argila (%) | <br><br>0,5<br><br>23,0<br>35,5<br>41,0 |

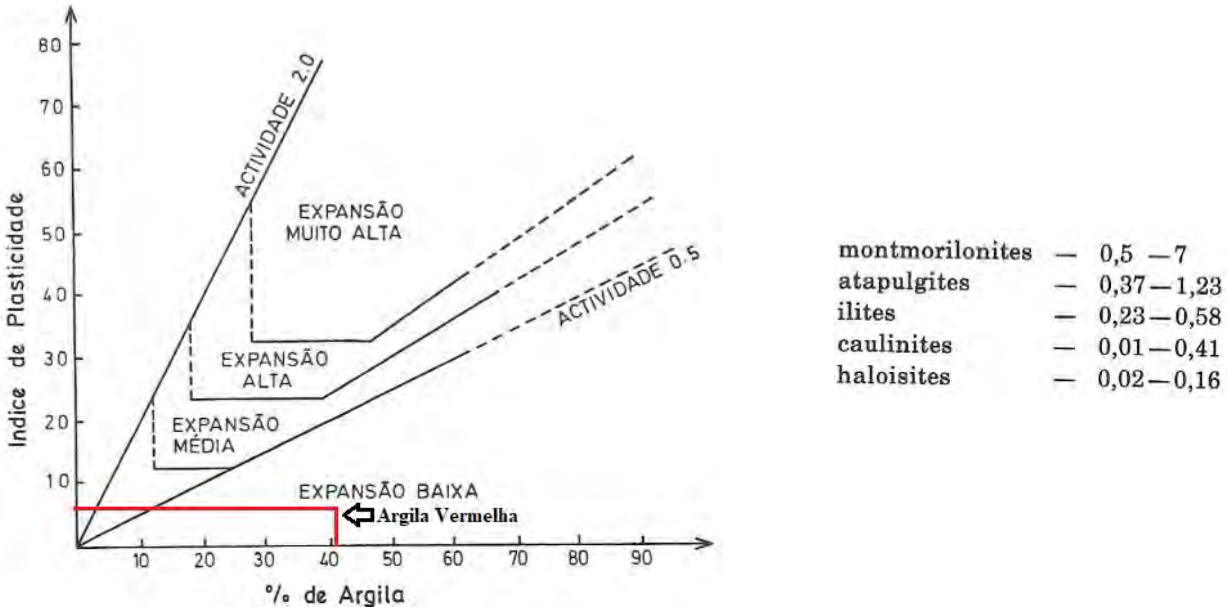


Figura 5.2: Potenciais de expansão. (Adaptado de Skempton, 1953)

Portanto, através das avaliações supracitadas e com base nos ensaios existentes, entende-se que o material em análise tem comportamento não expansivo.

Outro aspecto importante a ser analisado quanto a mineralogia da camada superficial do CJMV refere-se à avaliação do comportamento colapsível do material. Entretanto, este comportamento não pôde ser avaliado com os dados de ensaios fornecidos. Assim, para essa análise de comportamento, recomenda-se a realização de ensaio edométrico, adensamento com inundação por estágios, e/ou ensaios in situ, como o expansocolapsômetro, equipamento desenvolvido especialmente para essa finalidade (Carvalho et.al, 2015). Este ensaio tem por finalidade principal a avaliação do comportamento do solo quando no encerramento dos processos minerários, enchimento do lago da cava e saturação do solo na região do condomínio.

## 6.0 DIAGNÓSTICO DAS SUBSIDÊNCIAS NO CJMV

A Tetra Tech levantou as possíveis causas quanto a formação e/ou potencialização de trincas na cava, BR-040 e seu entorno. Salienta-se que estas hipóteses foram determinadas tendo em vista o histórico de reclamações, os dados geológicos-geotécnicos fornecidos e os dados de monitoramento de deformações. Dentre as hipóteses levantadas este relatório apresenta as seguintes avaliações:

- Avaliação de subsidências na camada superficial do condomínio Jardim Monte Verde devido ao rebaixamento de água;
- Avaliação de características intrínsecas à mineralogia do solo.

Quanto a avaliação de subsidências fica claro a influência da extração de água subterrânea nos processos de rebaixamento da superfície do terreno, devido a remoção de suporte subterrâneo. Quando quantidades excessivas de fluidos são retiradas de sedimentos, a pressão de fluido entre os grãos é reduzida, e o peso dos materiais sobrejacentes faz com que os grãos se comprimam, resultando em subsidência do solo (Wicander; Monroe, 2006).

Assim, através dos cálculos realizados no item 4.0, observa-se que o rebaixamento de água tem comportamento diretamente relacionado com processos de recalques. Portanto, quanto maior os processos de exploração de água subterrânea maiores serão os recalques estimados. Quando na avaliação conjunta dos dados de monitoramento de deslocamentos e rebaixamento de água, observa-se que ambos possuem comportamento linear e que na região do condomínio não há tendência de estabilização dos deslocamentos. Portanto, caso o nível de água continue em processo de rebaixamento, devido ao pit final, possivelmente maiores recalques serão gerados.

Os valores estimados de recalque total para diferentes espessuras de camadas são predominantemente superiores aos valores limites para não ocorrência de danos estruturais, proposto por Skempton e MacDonald (1956). Os dados de deslocamento definidos por retroanálise através de dados de radar orbital indicam valores totais de deslocamentos no

condomínio de 25 e 31 cm, enquanto que por estimativas de cálculos determinou-se para as camadas mais profundas do condomínio valores de recalque totais da ordem de 22 a 33 cm. Os valores limites propostos por Skempton e MacDonald (1956) variam entre 4 a 10 cm.

Foram, ainda, realizadas análises de sensibilidade de recalques diferenciais em dois pontos de apoio, similares à distância usual de dois pilares de uma residência. Estes cálculos mostraram que rebaixamentos diferenciais de água de 30 cm, entre dois pontos distantes de 3 m, são capazes de exercer valores distorcionais superiores aos valores limites propostos por Bjerrum (1963) e Vargas e Silva (1973), assim como pela ABNT 6118/2014. Como os instrumentos de monitoramento do tipo INA e PZ são muito espaçados entre eles, não é possível verificar sensivelmente a existência de rebaixamentos diferenciais de 30 cm numa distância de 3 m. Entretanto, considera-se totalmente factível a ocorrência de rebaixamentos diferenciais desta ordem de grandeza, devido ao efeito do cone de rebaixamento de água.

Quanto à avaliação das características intrínsecas à mineralogia do solo, buscou-se avaliar os aspectos referentes ao possível comportamento expansivo ou colapsível. Solos que apresentem algum destes comportamentos são caracterizados por sofrer variações de volume quando o teor de umidade é modificado sob tensões praticamente constantes. Considerou-se para estas avaliações os resultados de ensaios realizados nas amostras denominadas como Argila Vermelha, executados pela UFMG (2008). Esta premissa foi adotada tendo em vista que este material é de constituição semelhante ao material de superfície do CJMV. Através da análise dos resultados considera-se que o solo argiloso em questão não tem comportamento típico de solos expansivos, visto que o material tem característica de argilas do grupo Caulinita ao qual apresenta constituição 1:1.

Comparativamente ao comportamento dos solos expansíveis, os solos colapsíveis apresentam um fenômeno mais complexo, dominado por causas físico-químicas e que, além do aumento de volume, traz consigo outra consequência associada, a tensão de expansão. Nesses solos, pode ocorrer aumento de volume pelo umedecimento e posterior redução por secagem, fenômeno que tende a se repetir ciclicamente por variações sazonais de umidade ou de sucção do solo (Carvalho et.al, 2015). A avaliação quanto a este tipo de comportamento não foi possível devido a inexistência de ensaios com essa finalidade. Assim, para essa avaliação é recomendado a realização de ensaio edométrico, adensamento com inundação por estágios, e/ou ensaios in situ, como o expansocolapsômetro. A avaliação dos resultados deste ensaio permite verificar o comportamento colapsível quando do encerramento dos processos de exploração mineral e enchimento do lago da cava.

Referente à avaliação dos dados de satélite orbital verifica-se que os maiores deslocamentos diferenciais são no plano horizontal, com comportamento marcante entre as áreas divididas pela orientação das trincas. Os deslocamentos verticais diferenciais comparativamente entre as áreas 1 e 2 são reduzidos, entretanto baixos valores distorcionais são considerados suficientes para provocar danos estruturais.

Portanto, quanto à hipótese de surgimento e potencialização de trincas por efeitos de subsidência do solo, devido ao rebaixamento de água, constata-se que estes são diretamente relacionados. Constata-se, também, que, pelos dados de monitoramento disponibilizados, não

há tendência de estabilização das trincas e que novos rebaixamentos de água representam condições favoráveis para potencialização das trincas existentes.

## 7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 6122 (2010). Projeto e execução de fundações.

ABNT NBR 6118 (2014). Projeto de estruturas de concreto — Procedimento.

ABIDIN, H.Z., DJAJA, R., DARMAWAN, D., HADI, S., AKBAR, A., RAJIYOWIRYONO, H., SUDIBYO, Y., MEILANO, I., KASUMA, M.A., KAHAR, J., SUBARYA, C. (2001). Land Subsidence of Jakarta (Indonesia) and its Geodetic Monitoring System. Natural Hazards 23, p. 365387.

BJERRUM, L. Interaction between structure and soil. In: European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2., 1963, Wiesbaden. Proceedings. Wiesbaden, v. 2, p. 135-137.

BOWLES, J., E. (1997). Foundation Analysis and Design. Editora McGraw-Hill, 1997. P. 1175.

CABRAL, J.J.S.P. (2006). Bombeamento Intensivo de Água Subterrânea e Riscos de Subsidência do Solo. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 11 n.3 Jul/Set 2006, p. 147-157.

CARVALHO, J.C. (2015). Solos não saturados no contexto geotécnico. Orgs. – São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015. xxxvi, p. 759.

FERNANDES, M.M. (2016). Mecânica dos solos: conceitos e princípios fundamentais, volume 1. São Paulo: Oficina de Textos, p. 448.

WICANDER, R.; MONROE, J.S. (2006). The Changing Earth: Exploring Geology and Evolution. 4.ed. United States of America: Thomson Brooks/Cole.

LOÁICIGA, H. (2013). Consolidation Settlement in Aquifers Caused by Pumping. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 139 (7): 1191-1204.

MINGORANCE, F. (2000). Manifestaciones de subsidencia superficial en el Pastal, Norte de Mendoza, Argentina. Revista de la Facultad de Ingeniería, Argentina 41, p.5-16.

SKEMPTON, A.W. (1953). The colloidal activity of clays. In: Proceedings of the third international conference on soil mechanics and foundation engineering. Zurich, Switzerland, ICOSOMEF. p. 57-61.

TERZAGHI, K.T. (1925). Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage. Deuticke, Wien, p. 399.

VARGAS, M.; SILVA, F.R. O problema das fundações de edifícios altos: experiência em São Paulo e Santos. In: CONFERÊNCIA SUL-AMERICANA SOBRE EDIFÍCIOS ALTOS, 1973, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: ASCE/IABSE, 1973.