



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS



Trabalho de Conclusão de Curso
Curso de Graduação em Geologia

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE FLUXO DE ÁGUA
SUBTERRÂNEA EM AQUÍFERO FRATURADO
NO MUNICÍPIO DE AMPARO (SP)**

Bárbara Panegassi

Orientador: Prof. Dr. Chang Hung Kiang

Co-orientador: Dr. Elias Hideo Teramoto

Rio Claro (SP)

2020

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

BÁRBARA PANEGASSI

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE FLUXO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA EM AQUÍFERO
FRATURADO NO MUNICÍPIO DE AMPARO (SP)

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Geociências e
Ciências Exatas – Câmpus de Rio Claro, da
Universidade Estadual Paulista Júlio de
Mesquita Filho, para obtenção do grau de
Geólogo.

Rio Claro – SP

2020

P191s	<p>Panegassi, Bárbara</p> <p>Simulação numérica de fluxo de água subterrânea em aquífero fraturado no município de Amparo (SP) / Bárbara Panegassi. -- Rio Claro, 2020</p> <p>63 p. : il., tabs., mapas</p> <p>Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Geologia) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro</p> <p>Orientador: Hung Kiang Chang</p> <p>Coorientador: Elias Hideo Teramoto</p> <p>1. Análise derivativa de teste de bombeamento. 2. Aquífero confinado drenante. 3. Aquífero cristalino. 4. FEFLOW. 5. Modelagem numérica de fluxo. I. Título.</p>
-------	--

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

BÁRBARA PANEGASSI

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE FLUXO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA EM AQUÍFERO
FRATURADO NO MUNICÍPIO DE AMPARO (SP)

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Geociências e
Ciências Exatas – Câmpus de Rio Claro, da
Universidade Estadual Paulista Júlio de
Mesquita Filho, para obtenção do grau de
Geólogo.

Comissão Examinadora

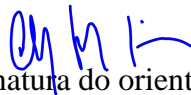
Prof. Dr. Chang Hung Kiang

Dr. Marco Aurélio Zequim Pedre

Ms. Roger Gonçalves Dias

Rio Claro, 07 de outubro de 2020.


Assinatura da aluna


Assinatura do orientador

Dedico este trabalho aos meus pais,
Cecília e Francisco, que sempre me apoiaram.

AGRADECIMENTOS

Estes agradecimentos não são referentes apenas àqueles que me ajudaram diretamente neste projeto, pois se não fosse pelas pessoas que conheci ao longo da minha jornada e me fizeram estar onde estou e ser quem sou, estas linhas não existiriam.

Começo pelas duas pessoas que estiveram desde sempre ao meu lado – a minha mãe, Cecília, e meu pai, Francisco. Toda o apoio, preocupação e paciência que comigo tiveram, e ainda tem, os tornaram, sem sombra de dúvida, as pessoas que mais amo e tenho a agradecer.

Agradeço a todos do LEBAC, especialmente ao Prof. Dr. Chang Hung Kiang, Dr. Elias H. Teramoto, Juan Navarro, Ms. Bruno Zanon e Dr. Marco A. Z. Pede, pelo apoio e orientação

Às minhas amigas que se iniciaram na infância ou adolescência e tenho comigo até hoje: Adrielle M. Cazotti, Amanda L. B. Silva, Andresa B. Ramos, Beatriz F. Avancini, Brenda Jeremias, Elisa J. Marcatto, Gabriela M. Melo, Giovanni L. Baraldi, Gustavo A. Batista, Juliana S. Fiorini, Luan A. A. Vieira, Luidgi D. Viscardi, Mirella M. Lenzi, Raphael H. Carvalho e Tainara C. Rocha.

Aos amigos que a UNESP me deu, começando pela República Marte – Fernanda G. Vassão (Dengue), Fernanda M. S. Buchi, Júlia C. Faria, Nayara N. Une (Naruto), Sofia T. Minatel (Fada) - com quem partilhei desde momentos tristes a felizes, mas que são, acima de tudo, importantes e inesquecíveis.

À República Toca – Eduardo A. H. Menezes (Nada), Frederico F. Ramponi (Bode), Marcelo D. Sacchi (Cardio), Pedro M. Correia (Sarjeta), Raphael H. D. Vichiato (Lula), Vitor X. Branco (Catarro) – que estiveram comigo nesta reta final.

Aos meus amigos Daniel K. Ogashawara (TNT), Everson G. S. Rodrigues (Cafu), João P. G. Penteado (Caruzo), Laura A. Mendonça, Marcio Gomes Jr. (Muguerço), Marina C. Almeida, Mateus R. S. Baraldi (Valesca), Matheus Maestrello (Cadáver), Matheus Mistrinel P. F. N. (Bigode) e Thales H. Teixeira (Moita). Destaco a minha grande amizade André P. Figols, cuja paciência, opiniões e correções fizeram deste trabalho melhor, assim como a minha vida.

.

RESUMO

O aquífero cristalino é uma importante fonte de água, porém, a demanda por recursos hídricos é acompanhada de contaminações e da necessidade de informações para gerenciá-los adequadamente. A modelagem numérica de fluxo de águas subterrâneas é a ferramenta que mais se destacou nas últimas décadas para atender a essas necessidades, porém, quando se trata de sua aplicação em aquíferos fraturados, há divergências quanto ao modelo conceitual. A presença de uma camada altamente permeável e de grande importância hidrogeológica já foi descrita por diversos autores que caracterizaram o aquífero fraturado de regiões de clima tropical com espesso perfil de alteração. O presente trabalho tem como foco o modelo conceitual considerando a gênese de fraturas associada aos processos intempéricos em área localizada nas rochas gnáissico-migmatíticas do Complexo Amparo. Simulação numérica de fluxo foi realizada no *software* FEFLOW, tendo como critério de calibração os rebaixamentos observados durante o teste de bombeamento conduzido na área de estudo. A curva diagnóstica do rebaixamento simulado no FEFLOW apresentou regime de fluxo similar aquele obtido com base nos dados observados. Desta forma, é possível afirmar que o modelo conceitual concebido reproduz satisfatoriamente o fluxo nos aquíferos fraturados da área estudada.

Palavras-chave: Análise derivativa de teste de bombeamento. Aquífero confinado drenante. Aquífero cristalino. FEFLOW. Modelagem numérica de fluxo. Zona de transição.

ABSTRACT

Crystalline aquifer is an important water source of São Paulo State, however, demand for water resource may be impaired by contamination and poor water management. Numerical modeling of groundwater flow and transport has gained importance in recent decades. However, the conceptual model for crystalline aquifer is still a matter of debate. The presence of a high permeability and thick weathered zone layer has been described by several authors. The present study focused on the conceptual model of fractures genesis in response to weathering processes of an area located in the Complexo Amparo gnaissic-migmatitic rocks. The best fit for pumping data was obtained using Moench (1985) solution case 3. Numerical simulation of the study area was performed using FEFLOW.

Keywords: Pumping test diagnostic plot analyse. Leaky aquifer. Crystalline aquifer. FEFLOW. Numerical flow modeling. Transition zone.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Áreas de aquífero poroso, fraturado e cárstico no Estado de São Paulo com delimitação das regiões metropolitanas de São Paulo e de Campinas.	2
Figura 2. Perfil idealizado do manto de intemperismo e as camadas que o constituem, segundo Lachassagne <i>et al.</i> (2011), incluindo, portanto, a Zona de Transição.	3
Figura 3. Localização do município de Amparo no Estado de São Paulo; área de estudo - ponto em vermelho - na malha municipal e as principais rodovias.	4
Figura 4. Limite da área de estudo dentro do município de Amparo (SP) e as drenagens próximas.	5
Figura 5. Protocolo de Aplicação de Modelos Matemática.	10
Figura 6. (A) Grid gerado pela discretização de um aquífero pelo Método das Diferenças Finitas; (B) Mesh gerado pela discretização pelo Método dos Elementos Finitos. Mostra-se nítida a diferença entre os resultados da aplicação dos métodos, assim como a vantagem.	14
Figura 7. Representação do saprólito e camada fissurada associado à espessos mantos de intemperismo característicos de solo laterítico formado em clima tropical.	15
Figura 8. Distribuição dos poços bombeados e monitorados durante o teste de bombeamento no domínio do modelo.	20
Figura 9. (A) Subdivisão da Província Mantiqueira segundo Heilbron <i>et al.</i> (2004) e localização do município de Amparo (SP) neste contexto; (B) Unidades geotectônicas do Orógeno Brasília Sul segundo Morais (1999), com destaque para a Faixa Alto Rio Grande, onde está inserida a área de estudo.	22
Figura 10. Gráfico de precipitação média (linha contínua) acumulada durante o período contínuo de 31 dias ao redor do dia em questão, com faixas do 25° ao 75° percentil – cinzada escuro - e do 10° ao 90° - cinza claro.	25
Figura 11. Variação das cargas hidráulicas ao longo do teste com bombeamento dos poços PP-02 e 03 e de alguns dos monitorados, sendo eles os profundos PMN-04, 05 e 06 e os rasos PM-23 e 32.	28
Figura 12. Análise do número de fraturas significativas encontradas na filmagem ótica dos poços PP-01, PP-02 e PP-03. Com base nesses dados, foi estimado o contato – linha vermelha - entre a zona de transição e a rocha inalterada, que delimita a base do modelo. No canto inferior esquerdo, o modelo conceitual de Lachassagne <i>et al.</i> (2011) é retomado para comparação da espessura das camadas.	29
Figura 13. Curva diagnóstica construída a partir dos dados de rebaixamento do PMN-05 (pontos) e modelo analítico ajustado (linhas). Os parâmetros estimados são: K – Condutividade hidráulica do aquífero, K' – Condutividade hidráulica do aquítarde superior, K'' – Condutividade do aquítarde inferior, T – Transmissividade, S – Armazenamento, r/B' e b' – parâmetros de drenança do aquítarde superior, r/B'' e b'' – parâmetros de drenança do aquítarde inferior, Sw – fator de efeito de poço, r(w) - raio do poço e r(c) - raio da perfuração.	30
Figura 14. Representação do modelo conceitual de Moench (1985) - Caso 3, aquífero confinado drenante com condição de contorno de não fluxo entre o aquífero e o aquítarde inferior, modelo conceitual resultante da análise derivativa do poço PMN-05.	31
Figura 15. Malha de elementos finitos adotada na modelagem numérica, na qual é notável o refinamento no limite Tipo I a oeste. Os pontos com grande quantidade de elementos, exceto a drenagem, estão associados a proximidade de alguns poços entre eles. Os pontos em vermelho são os poços de observação usados na calibração em regime transiente.	34

Figura 16. Modelo geológico tridimensional representando inicialmente a primeira camada do modelo, saprólito, e a segunda, zona de transição. Sobrelevado duas vezes.....	35
Figura 17. Domínio do modelo com destaque para topografia e discretização vertical. Sobrelevada duas vezes.	36
Figura 18. Condições de contorno estabelecidas para o modelo.....	37
Figura 19. Distribuição das cargas hidráulicas na condição inicial do modelo nas <i>slices</i> 1, topo do saprólito e aluvião, e 3, topo da zona de transição.	38
Figura 20. <i>Box plot</i> dos dados de condutividade hidráulica do saprólito e da zona de transição. Desconsiderando os pontos acima do limite máximo, correspondentes aos outliers, nota-se uma diferença de aproximadamente uma ordem de grandeza entre os quartis da primeira e segunda camadas.	40
Figura 21. Gráfico comparativo entre dados de rebaixamento, observado (linha azul) e simulado (linha laranja), do poço de bombeamento PP-02, com seção filtrante na zona de transição.....	42
Figura 22. Gráfico comparativo entre dados de rebaixamento, observado (linha azul) e simulado (linha laranja), do poço de monitoramento PMN-05, com seção filtrante na zona de transição.....	42
Figura 23. Gráfico comparativo entre dados de rebaixamento, observado (linha azul) e simulado (linha laranja), do poço de bombeamento PP-03, com seção filtrante na zona de transição.....	43
Figura 24. Gráfico comparativo entre dados de rebaixamento, observado (linha azul) e simulado (linha laranja), do poço de monitoramento PMN-06, com seção filtrante na zona de transição.....	43
Figura 25. Gráfico comparativo entre dados de rebaixamento, observado (linha azul) e simulado (linha laranja), do poço de monitoramento PMN-04, com seção filtrante na zona de transição.....	44
Figura 26. Gráfico comparativo entre dados de rebaixamento, observado (linha azul) e simulado (linha laranja), do poço de monitoramento PM-32, com seção filtrante no saprólito	44
Figura 27. Gráficos comparativos entre dados de rebaixamento, observado (linha azul) e simulado (linha laranja), do poço de monitoramento PM-23, com seção filtrante no saprólito.	45
Figura 28. Balanço hídrico do modelo ao fim do teste de bombeamento.	46
Figura 29. Variação dos fluxos de entrada e saída do modelo ao longo do ensaio.	46
Figura 30. Mapa de isovalores de rebaixamento das <i>slices</i> 2 e 3 após 3718,1 minutos, equivalente ao 80° <i>time step</i> da simulação.	47
Figura 31. Mapa de isovalores de rebaixamento das <i>slices</i> 2 e 3 após 5.979 minutos, equivalente ao 130° <i>time step</i> da simulação.....	48
Figura 32. Curva diagnóstica construída a partir dos dados de rebaixamento simulados do PMN-05 (pontos) e modelo analítico ajustado (linhas)). Os parâmetros estimados são: K – Condutividade hidráulica do aquífero, K' – Condutividade hidráulica do aquífero superior, K'' – Condutividade do aquífero inferior, T – Transmissividade, S – Armazenamento, r/B' e b' – parâmetros de drenança do aquífero superior, r/B'' e b'' – parâmetros de drenança do aquífero inferior, Sw – fator de efeito de poço, r(w) - raio do poço e r(c) - raio da perfuração.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Diferenças entre os métodos de diferenças finitas e elementos finitos com base nas obras de Wang & Anderson (1982), Spitz & Moreno (1996) e Anderson <i>et al.</i> (2015)	13
Tabela 2. Eventos principais do ensaio de vazão constante realizado na área modelada durante o mês de dezembro de 2004.	19
Tabela 3. Condutividades hidráulicas mínimas, máximas e médias geométricas da primeira (saprólito) e segunda (zona de transição) camadas do modelo numérico.	39
Tabela 4. Comparação entre os valores de condutividade hidráulica deste trabalho com outras bibliografias.	40

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Localização da área de estudo	4
1.2 Objetivo	5
1.3 Justificativa	5
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	6
2.1 Modelagem hidrogeológica	6
2.2 Modelagem matemática	7
2.3 Método dos elementos finitos e o FEFLOW.....	12
2.4 Zona de transição.....	15
2.5 Teste de bombeamento e análise derivativa de curva diagnóstica.....	17
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	18
3.1 Preparação.....	18
3.2 Calibração	21
3.3 Aplicação	21
4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	22
4.1 Geologia	22
4.2 Geomorfologia.....	24
4.3 Pedologia.....	24
4.4 Clima.....	25
4.5 Caracterização Hidrogeológica	25
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
5.1 Análise do teste de bombeamento e da perfilagem ótica.....	27
5.2 Análise da curva diagnóstico dos dados observados	30
5.3 Modelo Conceitual.....	32
5.4 Modelo Matemático	33
5.4.1 Domínio e discretização do modelo.....	33
5.4.2 Condições de contorno	36
5.4.3 Condições iniciais	37
5.5 Simulação em regime transiente.....	39
5.5.1 Parâmetros hidrodinâmicos	39
5.5.2 Recarga.....	41
5.5.3 Calibração	41
5.6 Balanço de fluxo.....	45

5.7	Rebaixamento.....	47
5.8	Análise da curva diagnóstica dos dados simulados	49
6	CONCLUSÕES.....	51
	REFERÊNCIAS	52
	ANEXO A – VALORES DE CARGA HIDRÁULICA (05/12/2004)	56
	ANEXO B – VALORES DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA	57
	ANEXO C – LOCALIZAÇÃO DOS POÇOS COM PERFIS CONSTRUTIVOS.....	59
	ANEXO D – PROFUNDIDADE DA SEÇÃO FILTRANTE EM RELAÇÃO À TOPOGRAFIA	60
	ANEXO E – PROFUNDIDADES DAS PRINCIPAIS FRATURAS DETERMINADAS PELAS ANÁLISES DAS FILMAGENS ÓTICAS.....	61
	ANEXO F - <i>TIME STEPS</i> DA SIMULAÇÃO	62

1 INTRODUÇÃO

A água subterrânea apresenta extrema importância para subsistência humana. Prova disso no cenário brasileiro é o fato de ser o recurso natural mais extraído do subsolo nacional. Segundo a ANA (2010), 52% dos 5.570 municípios brasileiros são abastecidos total (36%) ou parcialmente (16%) por águas subterrâneas e há evidências de um constante crescimento desta dependência. Assim sendo, há também aumento da necessidade de informações para tornar possível gerenciar este recurso adequadamente.

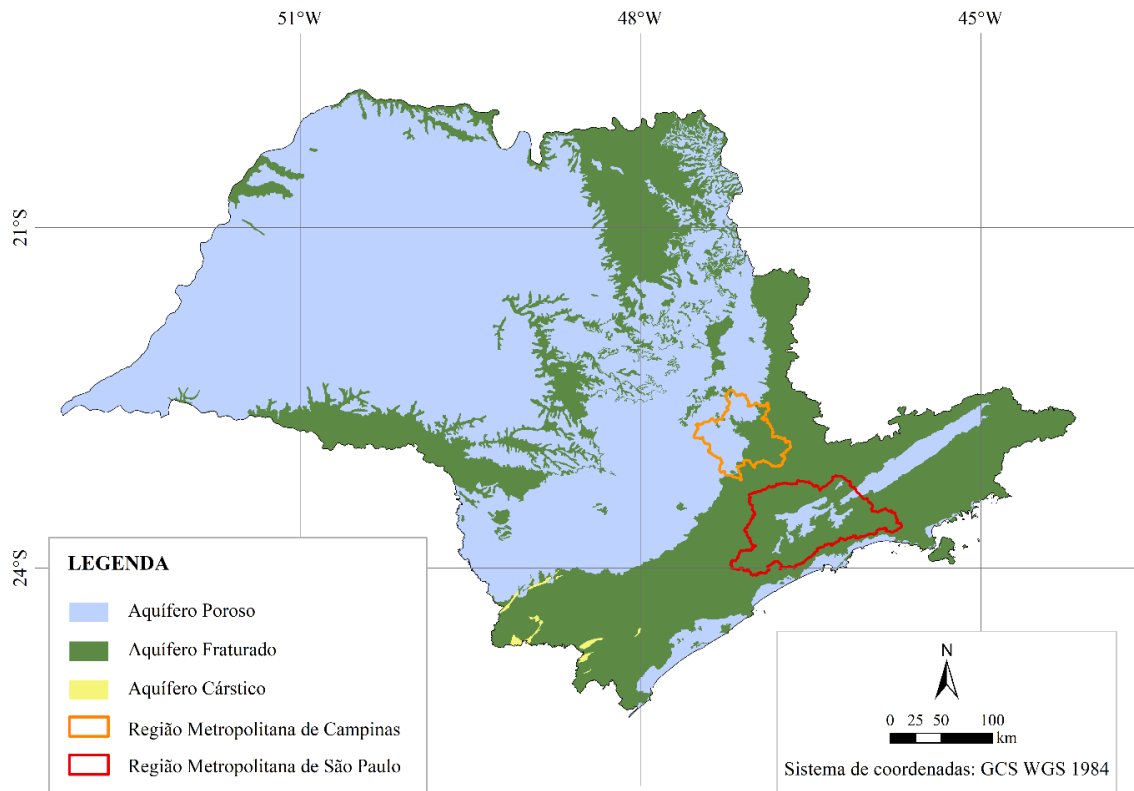
A modelagem numérica de fluxo e transporte de águas subterrâneas é a ferramenta que mais se destacou nas últimas décadas para atender a essa necessidade de gerenciamento. Ela é usada para previsões das causas e efeitos de estresse hídrico, como também dos comportamentos de fluxo de contaminantes. O aumento do destaque nas políticas nacionais desta ferramenta é demonstrado no artigo 36 do Decreto nº. 59.263/2013, que exige a modelagem na determinação de uma área como contaminada (SÃO PAULO, 2013).

O Embasamento Cristalino corresponde a 39% do território do Estado de São Paulo, onde estão inseridas duas das principais regiões metropolitanas, sendo elas a de município homônimo e Campinas (Figura 1). Esta relação demonstra a significância regional do aquífero fraturado, o qual apresenta características específicas devido ao clima tropical. Quando se trata da aplicação da modelagem neste sistema, há divergências quanto ao modelo conceitual.

Alguns autores associam o fluxo da água subterrânea às fraturas originadas pelo tectonismo, como, por exemplo, Neves & Morales (2007). Considerando este comportamento, são encontradas dificuldades na construção dos modelos numéricos, como na representação geométrica tridimensional dos complexos sistemas de discontinuidades e na solução de problemas de comportamento da rocha fraturada quando tensionadas ou sujeitas a deslocamentos nos limites do modelo (LEI *et al.*, 2017).

Já outros associam as fraturas à descompressão, como Taylor & Howard (2000), trabalho no qual é posposto que, devido a remoção da camada rochosa em solução – intemperismo profundo – e pela erosão coluvial e fluvial, ocorre o efeito da descompressão. Como consequência, há a geração das fraturas que aumentam a permeabilidade do embasamento cristalino.

Figura 1. Áreas de aquífero poroso, fraturado e cárstico no Estado de São Paulo com delimitação das regiões metropolitanas de São Paulo e de Campinas.

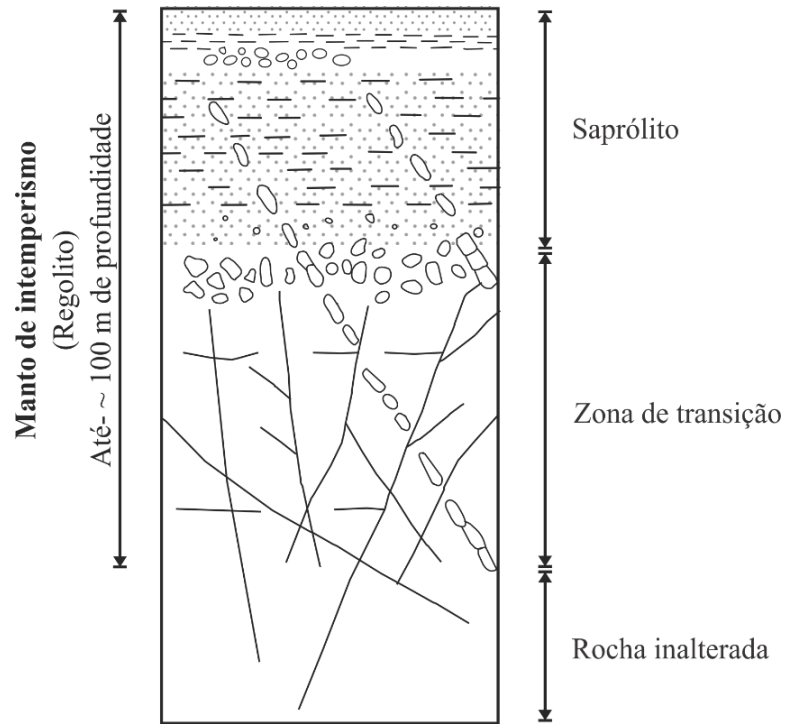


Fonte - Adaptado de Diniz *et al.* (2014).

Há ainda os que contrapõem ambas as teorias, como é o caso de Lachassagne *et al.* (2011) – que propõem que a permeabilidade em aquíferos cristalinos é em razão do processo de intemperismo. A grande quantidade de minerais capazes de dilatar e expandir, assim como a presença de superfícies mais fracas da rocha e a formação de argila nos níveis mais avançados de intemperismo, geram uma espessa camada com alta permeabilidade e cujo fraturamento não apresenta orientação preferencial (LACHASSAGNE *et al.*, 2011).

Com base nesta última proposta, o aquífero cristalino pode ser considerado um meio contínuo, tornando possível modelar tridimensionalmente a geometria e as propriedades físicas das camadas que o constituem (Figura 2), sendo elas: Camada Alterada Inconsolidada (saprólito) e Zona de Transição (ZT), ambas localizadas acima da rocha inalterada (ACWORTH, 1987; LACHASSAGNE *et al.*, 2011). Esse modelo conceitual pode ser aplicado no aquífero cristalino do Estado de São Paulo, onde o manto de intemperismo pode atingir 100 metros de profundidade.

Figura 2. Perfil idealizado do manto de intemperismo e as camadas que o constituem, segundo Lachassagne *et al.* (2011), incluindo, portanto, a Zona de Transição.



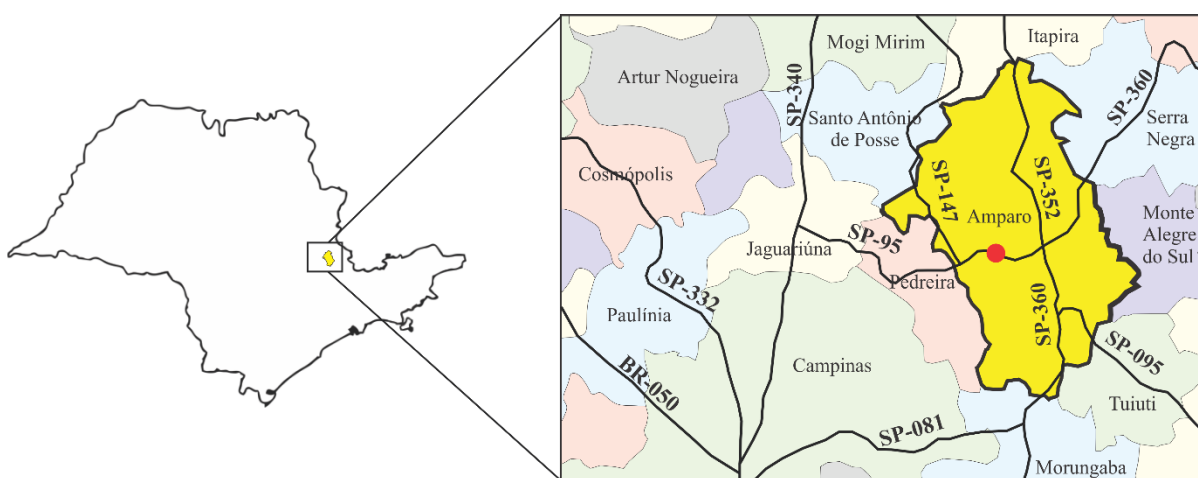
Fonte – Adaptado de Acworth (1987)

Outra ferramenta de grande importância no entendimento do modelo conceitual é o teste de bombeamento, principalmente sua interpretação pela análise da curva bilogarítmica dos dados de rebaixamento. Com base nas informações obtidas é possível determinar as variações das propriedades hidrodinâmicas e correlacionar com a distribuição e possível origem das fraturas do terreno cristalino, orientando na elaboração o modelo conceitual proposto para a área.

1.1 Localização da área de estudo

A área de estudo é uma indústria de peças automotivas localizada na porção nordeste do Estado de São Paulo, no município de Amparo (Figura 3). É limitada pelos meridianos longitudinais 46° 48' 36" W e 46° 49' 12" W e latitudinais 22° 42' 35" S e 22° 43' 30" S e está inserida na Folha Amparo SF-23-Y-A-VI-1 da base cartográfica em escala 1:50.000 do IBGE (1983).

Figura 3. Localização do município de Amparo no Estado de São Paulo; área de estudo - ponto em vermelho - na malha municipal e as principais rodovias.

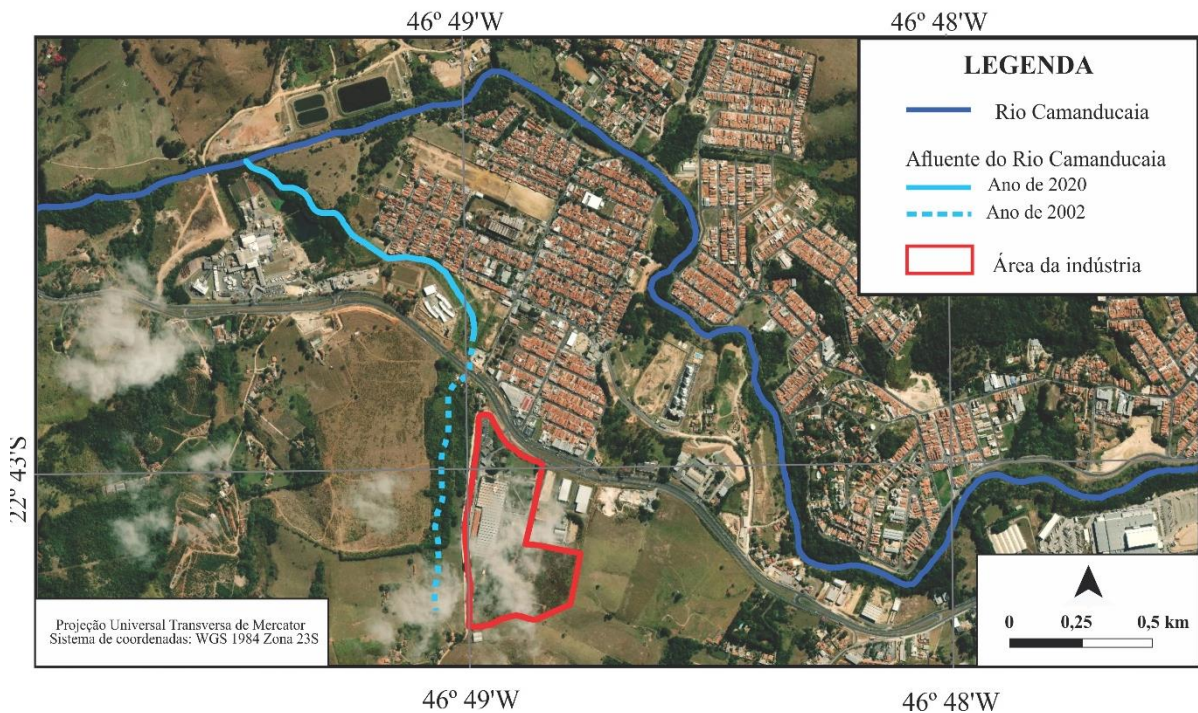


Fonte – Elaborada pela própria autora.

As principais vias de acesso são: SP-095, Rodovia João Beira, que pode ser acessada pelas Rodovias SP-340, no perímetro de Jaguariúna, e pela SP-107, entre Santo Antônio da Posse e Amparo; a SP-360, que conecta Jundiá a Águas de Lindóia, e; a SP-352, que conecta Itapira a Amparo.

Quanto à hidrografia, a área está inserida na Bacia hidrográfica do Rio Piracicaba, sub-bacia do Rio Camanduaia, gerenciada pelo Comitê das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (CBH-PCJ). No ano de 2004, período em que os dados do presente trabalho foram obtidos, um afluente do Rio Camanduaia localizava-se a oeste da área da indústria (Figura 4).

Figura 4. Limite da área de estudo dentro do município de Amparo (SP) e as drenagens próximas.



Fonte – Imagem de satélite obtida do Google Earth no dia 29/06/2020.

1.2 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo explorar e avaliar a aplicação do modelo conceitual considerando a gênese de fraturas associada aos processos intempéricos, na simulação numérica de um teste de bombeamento em área de aquífero fraturado associado ao Complexo Amparo.

1.3 Justificativa

A possibilidade de mensurar de modo quantitativo o aquífero fraturado é fundamental devido à dependência do aquífero cristalino na região Sudeste do Brasil. Além disso, é cada vez maior a quantidade de sítios contaminados, que são acompanhadas da exigência de modelagens numéricas pelos órgãos ambientais. Sendo assim, a necessidade de métodos mais práticos, mas também confiáveis, é fundamental para elaborações de modelos hidrogeológicos de fluxo de aquíferos cristalinos para, assim, confeccionar um modelo de transporte de massa adequado.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Modelagem hidrogeológica

Modelos são ferramentas utilizadas para representar uma versão simplificada da realidade (WANG & ANDERSON, 1982). No caso da modelagem de sistemas hidrogeológicos, quando devidamente construídos, é possível simular diversas situações e prever efeitos de certas ações (WANG & ANDERSON, 1982).

Ao longo dos anos foram utilizados diversos tipos de modelos para simulação de fluxo de águas subterrâneas. Segundo Wang & Anderson (1982), eles podem ser divididos em: (1) modelos tanque de areia, (2) modelos analógicos e (3) modelos matemáticos.

Os modelos tanque de areia, ou modelos de meio poroso, consistem em preenchimento de um tanque por um material poroso inconsolidado. Ao manipulá-lo, o fluxo responde dando uma noção do comportamento do sistema real. A maior desvantagem é a diferença de escala entre a situação de campo e o modelo, pois a forma de ocorrência de fenômenos em escala de tanque de areia é frequentemente diferente das observadas em campo. Deste modo, as conclusões tomadas a partir desses modelos podem precisar de adaptações quando transferidas para a realidade (PRICKET, 1975 *apud* WANG & ANDERSON, 1982; SPITZ & MORENO, 1996).

Os modelos analógicos derivam do fato de que o fluxo da água subterrânea é descrito por meio de equações diferenciais derivadas de princípios físicos básicos, assim como o fluxo elétrico através de um meio resistivo e o fluxo de calor através de um sólido (ANDERSON *et al.*, 2015).

Com base nessa associação, os modelos de fluido viscoso, sinônimo de modelos *Hele-Shaw* ou modelos de placas paralelas, usam da analogia do movimento de fluidos viscosos entre duas placas próximas e paralelas, governadas pela Equação de *Pouseuille*, análoga à Lei de Darcy. Do mesmo modo, o modelo elétrico utiliza da analogia desta mesma lei com a Lei de Ohm, assim, a variação na voltagem no modelo elétrico é similar à de carga hidráulica no de água subterrânea (WANG & ANDERSON, 1982).

A terceira categoria é a dos modelos matemáticos, usados desde o fim do século XIX, que consistem na solução de equações diferenciais de fluxo de água subterrânea, assim como para o fluxo de calor e transporte de massa (WANG & ANDERSON, 1982).

2.2 Modelagem matemática

Os modelos matemáticos podem ser resolvidos analítica ou numericamente. Os modelos analíticos geralmente são solucionados de modo rápido, preciso e econômico com uma calculadora programável ou planilha em computador. Para sua resolução devem ser conhecidas as condições iniciais e de contorno, porém, uma quantidade mínima de dados é necessária, considerando que é atribuído um mesmo valor para cada parâmetro (FETTER, 2001).

O modelo analítico é limitado à problemas simples, pois exige um alto nível de simplificação do sistema natural, que possibilite definir um problema que possa ser resolvido matematicamente por soluções calculáveis. Por outro lado, é útil por proporcionar importantes percepções sobre o comportamento do sistema aquífero (ANDERSON *et al.*, 2015).

O modelo numérico é um dos mais importantes desenvolvimentos da hidrogeologia. Neste tipo de modelagem é requerido que as equações - que são aproximações, assim como as repostas obtidas – sejam reformuladas em forma algébrica. Além disso, elas são mais comuns na forma de matriz e são resolvidas em computadores (FETTER, 2001).

Desde a década de 1960, quando houve um grande avanço tecnológico dos computadores e estes fizeram-se amplamente difundidos, os modelos numéricos se tornaram o procedimento mais indicado para a solução de equações em modelos de fluxo de água subterrânea e problemas de transporte de massa (WANG & ANDERSON, 1982).

Os modelos numéricos permitem resolver problemas simples e complexos, com fluxo estacionário ou transiente, em até três dimensões, meio heterogêneo, com condições de contorno complexas, redes de fontes e sumidouros e, ainda por cima, com maior confiabilidade e praticidade. Deste modo, fez-se o tipo mais utilizado e, atualmente, o uso da denominação “modelo de água subterrânea” tornou-se um sinônimo de “modelo numérico de água subterrânea” (ANDERSON *et al.*, 2015; SPITZ & MORENO, 1996).

Este tipo de representação é a combinação da linguagem matemática, pela qual são descritos os sistemas hidrogeológicos, e o código numérico computacional; sendo que este último consiste em um programa de computador que processa os dados inseridos para um modelo específico e soluciona as equações de fluxo e transporte (ANDERSON *et al.*, 2015; SPITZ & MORENO, 1996).

Qualquer modelo matemático de fluxo de água subterrânea é constituído em: equação governante, a qual descreve os processos físicos do sistema; condições de contorno, as quais

especificam as cargas hidráulicas ou fluxo ao longo dos limites; e condições iniciais, necessárias em problemas dependentes do tempo, que exigem que as cargas hidráulicas sejam especificadas no início da simulação (ANDERSON *et al.*, 2015).

As equações governantes são derivadas de dois princípios básicos: conservação de massa, que afirma que a água não se cria ou se destrói; e a Lei de Darcy, que afirma que a água subterrânea flui do local de maior para o de menor energia potencial. São nessas equações que são incorporadas as simplificações necessárias para tornar possível a representação matemática de processos hidrogeológicos (ANDERSON *et al.*, 2015).

As condições de contorno incluem características hidráulicas, tais como divisores de águas subterrâneas e elementos físicos, exemplificados por corpos de águas superficiais e rochas relativamente impermeáveis. Deste modo, as condições hidráulicas nos limites devem ser especificadas por toda a borda e podem variar com o tempo (ANDERSON *et al.*, 2015; SPITZ & MORENO, 1996).

Matematicamente as condições de contorno podem ser classificadas em três tipos:

- *Tipo I – Condição de contorno de carga hidráulica especificada ou Dirichlet*

As cargas hidráulicas ao longo do limite possuem valores especificados, mas não fixos, pois podem variar em função do espaço e tempo. Deste modo, a superfície potenciométrica não é necessariamente constante, podendo, por exemplo, variar em função do nível da água superficial (SPITZ & MORENO, 1996).

A condição de contorno de tipo I ocorre quando corpos de água superficiais, tais como rios, lagos, canais, costas oceânicas, barragens e drenos, interagem livremente com o aquífero, assumido que o nível da água superficial é igual ao da água subterrânea (SPITZ & MORENO, 1996).

- *Tipo II – Condição de contorno de fluxo especificado ou de Neumann*

O fluxo ao longo de um limite é especificado, podendo ser nulo ou não, quando é possível determinar seu valor por meio do gradiente hidráulico. Quando o fluxo ao longo de um limite é nulo, trata-se de uma condição especial deste tipo de contorno chamada de não-fluxo (SPITZ & MORENO, 1996).

- *Tipo III Condição de contorno dependente de carga, mista, de Fourier ou de Cauchy*

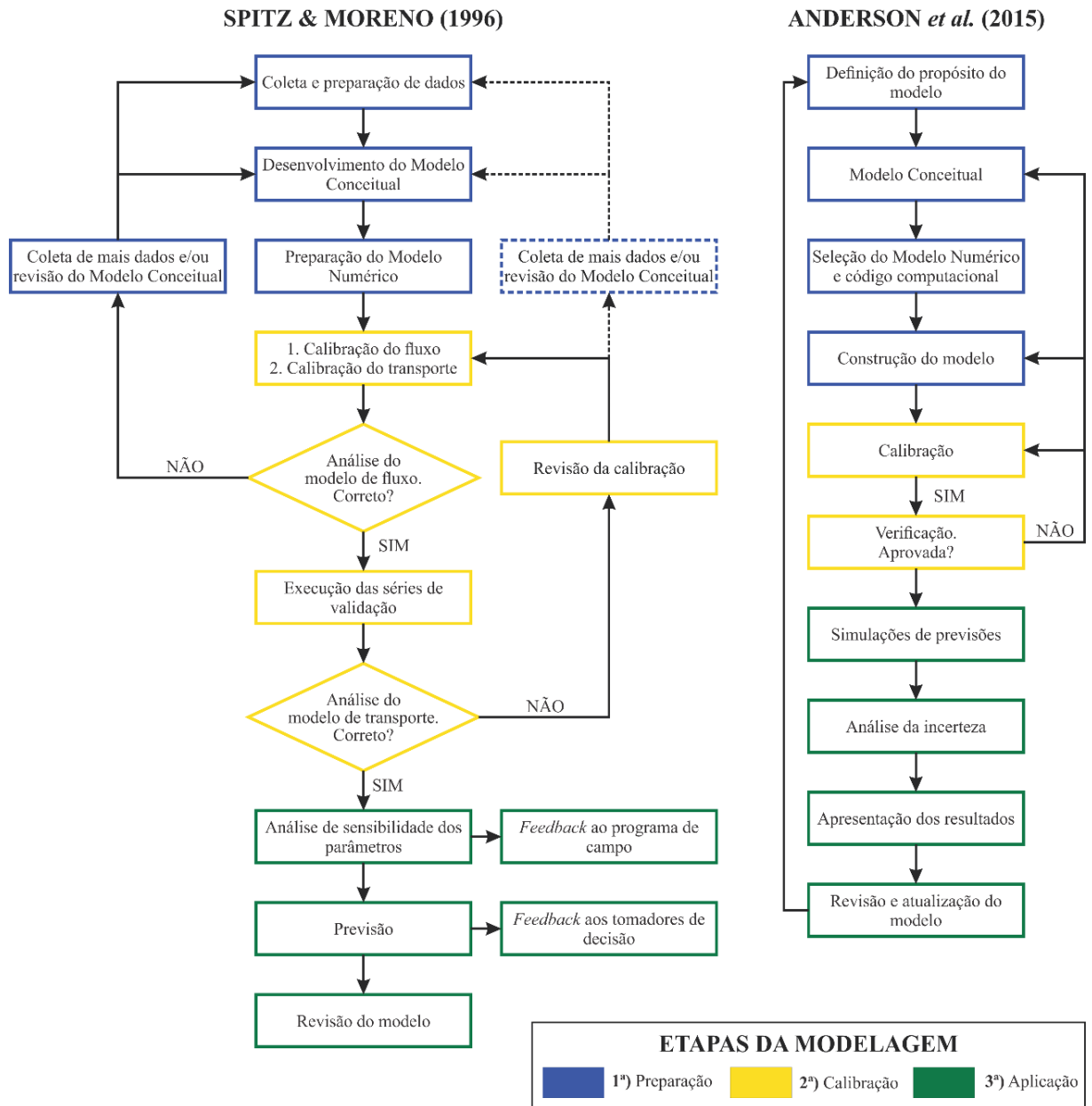
A condição de contorno semipermeável expressa, com base na Lei de Darcy, uma relação linear entre a carga hidráulica e o fluxo no limite calculado, ou seja, relaciona o contorno do Tipo I com o Tipo II, sendo assim também chamada de mista (ANDERSON *et al.*, 2015).

Esta condição de contorno é usada geralmente para representar o escoamento entre corpos de água superficiais e o aquífero, troca que depende da diferença do nível da água de ambos. Esta situação pode ocorrer quando o leito do rio atua como uma membrana semipermeável entre ele e o aquífero (SPITZ & MORENO, 1996).

As condições iniciais são as cargas hidráulicas definidas em cada elemento ou nó no início da simulação transiente. São consideradas conceitualmente diferentes das cargas hidráulicas do modelo estático por apresentarem forte influência sobre os resultados, sendo até mesmo chamadas de condições de contorno de tempo (ANDERSON *et al.*, 2015).

Diversos autores apresentam fluxogramas de trabalho para conduzir a modelagem matemática (Figura 5), denominados Protocolos de Aplicação de Modelos Matemáticos (PAMMs). Segundo Spitz & Moreno (1996), o processo pode ser dividido em três etapas principais - Preparação, Calibração e Aplicação - a seguir descritas com base, também, na obra de Anderson *et al.* (2015).

Figura 5. Protocolo de Aplicação de Modelos Matemática.



Fonte - Adaptado de Spitz & Moreno (1996) e Anderson *et al.* (2015).

2.2.1 Preparação

A primeira etapa do modelo é definir seu propósito, o que possibilita determinar as simplificações e premissas que serão aplicadas e, conseqüentemente, auxiliar a escolha do código numérico e posterior construção. A maioria dos modelos visa à previsão, cujo objetivo é prognosticar o resultado de uma ação ou não ação sobre o meio estudado (ANDERSON *et al.*, 2015).

Em seguida, é preciso coletar e avaliar os dados relevantes sobre o sistema em investigação. Este processo é importante, pois a qualidade da simulação depende em grande parte da confiabilidade dos dados inseridos, que servem como base para o cálculo dos parâmetros do modelo, como a transmissividade e recarga (SPITZ & MORENO, 1996).

Uma relação detalhada dos dados relevantes para a modelagem pode ser encontrada na obra de Spitz & Moreno (1996) - Capítulo 8, Subcapítulo 8.1 - entre as quais são citados: mapa topográfico, hidrológico e geológico; características do aquífero, como porosidade e condutividade; dados sobre os limites do aquífero; taxa de recarga e descarga.

Após a organização dos dados, é preciso definir o modelo conceitual da área, que nada mais é do que a síntese do que é conhecido sobre o sistema hidrogeológico feita com base na análise dos dados mais relevantes obtidos em campo e com destaque nos aspectos mais importantes do aquífero. Todas essas informações devem ser colocadas de modo a aperfeiçoar os conhecimentos sobre o local, comunicar esses dados e definir o problema visando auxiliar na seleção do modelo numérico adequado (ANDERSON *et al.*, 2015; SPITZ & MORENO, 1996).

No modelo conceitual é apresentado o sistema de fluxo de água subterrânea, incluindo sua associação com os corpos de água superficiais, assim como com unidades hidroestratigráficas e os limites do sistema.

Em geral, quanto mais próximo o conceitual é da situação real, maior a possibilidade de fazer previsões aceitáveis. Contudo, o nível do detalhamento necessário é determinado pelo propósito, pela qualidade dos dados de campo e pelos limites impostos durante a modelagem (ANDERSON *et al.*, 2015).

Em seguida, deve ser selecionado o código computacional, que processa os dados inseridos e automatiza a resolução do conjunto de equações geradas pela aplicação do método numérico. Os principais métodos numéricos utilizados pelos códigos computacionais para solucionar as equações são: diferenças finitas e elementos finitos, que serão detalhados no Subcapítulo 2.3 (ANDERSON *et al.*, 2015).

Então, é feita a escolha do *software*, que depende do problema a ser resolvido, das opções disponíveis para representação dos elementos, tais como corpos da água, e preferências do usuário (ANDERSON *et al.*, 2015).

Por fim, fazem-se esquematizações e a construção do modelo, etapa que envolve a seleção do domínio, discretização dos dados no espaço e tempo, definição dos contornos e condições iniciais e montagem e preparação dos dados para inserção no programa computacional (SPITZ & MORENO, 1996).

2.2.2 Calibração

Calibração é o processo de comparação entre os dados medidos em campo e os simulados, acompanhado da variação dos parâmetros do modelo dentro de uma faixa de valores prováveis, até que a diferença alcance uma tolerância pré-determinada (SPITZ & MORENO, 1996).

Como o mesmo resultado pode ser obtido pela alteração de duas variáveis simultaneamente, é altamente indicado o processo de verificação. Nesta etapa é comum a prática da comparação histórica, na qual um modelo com um conjunto de dados não usados na calibração, normalmente de diferentes períodos, mas de um mesmo local, é usado para contrapor as informações de campo (FETTER, 2001; SPITZ & MORENO, 1996).

Para aumentar ainda mais a confiabilidade do modelo, deve ser feita a análise de sensibilidade após a calibração para avaliar como a mudança em cada parâmetro afeta o resultado. Esta etapa também pode ser realizada antes do processo para avaliar a influência dos parâmetros sobre o modelo e, assim, orientar as possíveis alterações (FETTER, 2001).

2.2.3 Aplicação

Ao ser aplicado, o modelo deve cumprir o seu propósito, como simulações visando previsões, análise da aplicação ou não de um modelo conceitual, entre outros objetivos. Além disso, nesta etapa, resultados são apresentados via relatório, podendo serem feitas revisões e atualizações do modelo.

2.3 Método dos elementos finitos e o FEFLOW

Os métodos numéricos comumente mais utilizados na solução de problemas de água subterrânea são os das diferenças finitas (*Finite Differences Method* – FDM) e dos elementos finitos (*Finite Elements Method* – FEM). A aplicação do método FEM é relativamente recente se comparado com o FDM. Cada método conduz a um conjunto de equações algébricas nas quais as incógnitas são os números finitos de nós (WANG & ANDERSON, 1982).

Nos modelos numéricos só há funções definidas para determinados pontos, chamados de nós, os quais são definidos pela discretização. Este processo consiste em dividir a área de estudo em um certo número de elementos, que são conectados por um conjunto de nós, geralmente colocados nos vértices ou nas arestas das formas geométricas (CABRAL & DEMETRIO, 1997; ANDERSON *et al.*, 2015).

Os métodos possuem muitas diferenças (Tabela 1), porém, a principal é justamente a natureza da discretização espacial. É devido a ela que, apesar do método das diferenças finitas ser mais bem entendido e intuitivo, os elementos finitos têm se provado mais versáteis (ANDERSON *et al.*, 2015).

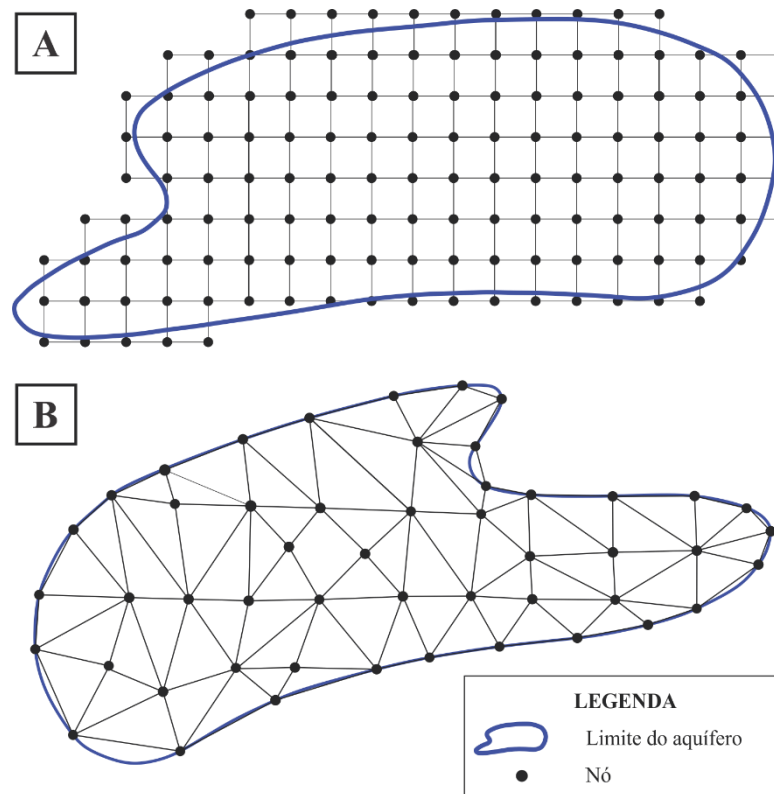
Tabela 1. Diferenças entre os métodos de diferenças finitas e elementos finitos com base nas obras de Wang & Anderson (1982), Spitz & Moreno (1996) e Anderson *et al.* (2015)

	Método das diferenças finitas	Método dos elementos finitos
Designação da localização dos nós	i, j, k	x, y, z
Designação da malha	<i>Grid</i>	<i>Mesh</i>
Designação das unidades da malha	Célula ou bloco	Elemento
Geometria da unidade	Retangular	Polígonos - sem restrições
Variável dependente	Definida unicamente no nó	Definida como solução contínua por todo o elemento
Método matemático de aproximação das equações	Diferenciação	Integração

Fonte – Elaborado pela própria autora.

O FEM possui vantagem pelas formas geométricas irregulares (Figura 6), que permitem representar contornos, meios heterogêneos e anisotropias muito mais realisticamente do que o FDM (ANDERSON *et al.*, 2015).

Figura 6. (A) Grid gerado pela discretização de um aquífero pelo Método das Diferenças Finitas; (B) Mesh gerado pela discretização pelo Método dos Elementos Finitos. Mostra-se nítida a diferença entre os resultados da aplicação dos métodos, assim como a vantagem.



Fonte – Adaptado de Fetter (2001).

As equações dos elementos finitos são geradas pela introdução de uma solução teste no elemento. Por exemplo, para um elemento triangular, a solução teste é definida por funções de interpolação, chamadas de funções base, que relacionam as variáveis nos nós com as variáveis nos elementos. Tipicamente, uma função de interpolação linear é escolhida, apesar que funções mais complexas também podem ser usadas (ANDERSON *et al.*, 2015).

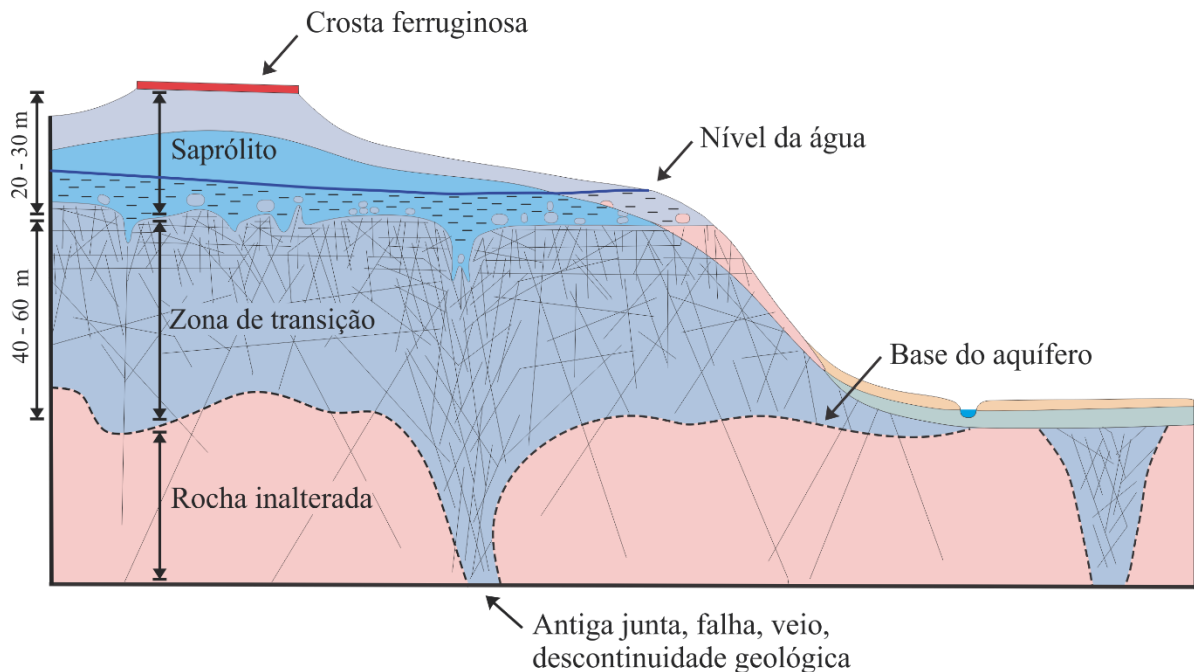
Considerando as vantagens dos elementos finitos, o pacote computacional escolhido para a modelagem foi o FEFLOW, acrônimo de *Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System*, considerado o mais confiável para aplicação do método.

O *software* é uma plataforma *user-friendly* que soluciona as equações governantes de fluxo, massa e transporte de calor no meio poroso ou fraturado pelo método dos elementos finitos, portanto, para geometrias complexas, incluindo situações com densidade de fluidos e saturação variáveis, superfície livre, reações cinéticas multiespecíficas, fluxos não isotérmicos e efeitos termoalinos (DIERSCH, 2014).

2.4 Zona de transição

Desde quando se tornou possível perfurar poços profundos para fornecimento de água a partir de aquíferos cristalinos em regiões de clima tropical, foi revelada a existência de uma camada altamente fraturada entre os trinta primeiros metros, neste trabalho denominada Zona de Transição, ou ZT (Figura 7), caracterizadas por juntas sub-horizontais. Elas também são descritas na periferia de grandes discontinuidades (veios, juntas, antigas falhas, contatos litológicos etc.), onde se apresentam também como sub-horizontais, porém, de menor extensão (LACHASSAGNE *et al.*, 2011).

Figura 7. Representação do saprólito e camada fissurada associado à espessos mantos de intemperismo característicos de solo laterítico formado em clima tropical.



Fonte – Adaptado de Dewandel *et al.* (2006).

A ZT foi descrita por diversos autores, entre eles Acworth (1987), Wright (1992) e Taylor & Howard (2000), como sendo de alta permeabilidade e, portanto, de extrema importância para o aquífero cristalino. Apesar desse consenso, há divergências quanto a sua origem.

Segundo Taylor & Howard (2002), a descompressão é responsável pela permeabilidade da camada. O processo ocorre devido a remoção da rocha pelo processo de intemperismo profundo e pela retirada do material inconsolidado pré-intemperizado na superfície. As fraturas da ZT podem ser derivadas de atividades tectônicas, mas são abertas pela descompressão.

Por outro lado, Acworth (1987) propõem que as fraturas da ZT são originadas pelo processo de tectonismo recente, o qual causa basculamento ou elevação da superfície antes estável e plana. Deste modo, recomeça o intemperismo pela penetração de água nos fraturamentos expostos durante o evento.

Opondo-se aos modelos conceituais apresentados e sendo o foco deste trabalho, Lachassagne *et al.* (2011) atribui a formação da camada de alta permeabilidade diretamente ao intemperismo. Os conceitos básicos propostos são que a camada pertence ao perfil de alteração, assim como o saprólito, e os fatores principais para sua formação são um perfil laterítico, o qual deve ser muito espesso para ser eficiente do ponto de vista hidrogeológico, e o clima. Quanto a origem das fraturas, são induzidas pela tensão causada pela dilatação de alguns minerais. Esta expansão, principalmente da biotita, pode gerar um aumento do seu volume de até 30%, podendo totalizar 50% do volume da rocha (LACHASSAGNE *et al.*, 2011).

Em rochas granulares, como os granitos, na qual a orientação e, portanto, dilatação dos minerais é aleatória, o vetor de expansão é isotrópico. Porém, durante o intemperismo a tensão não aumenta no plano horizontal e continua ocorrendo a expansão, pois o meio é infinito nesta direção; no eixo vertical a expansão continua até o vetor superar a componente litostática. Quando a resultante entre os dois eixos alcança o limite elásticos da rocha, aparecem as fissuras de tensão, geralmente sub-horizontais (LACHASSAGNE *et al.*, 2011).

Em rochas xistosas ou foliadas, diferente das rochas granulares, devido à grande arbitrariedade da orientação dos minerais ao expandir, assim como as superfícies mais frágeis da rocha (foliação, xistosidade) induzem a um fraturamento anárquico - sem direção preferencial (LACHASSAGNE *et al.*, 2011).

As fraturas são paralelas à foliação, possibilitando associar, em estágios iniciais, a alteração da biotita com o fraturamento. Em estágios avançados, a produção de argila apresenta tendência em preencher os novos poros formados ao redor das fraturas e minerais alterados. Porém, a densidade de biotita na rocha parental não é alta o suficiente para obstruir a permeabilidade das fraturas da ZT (LACHASSAGNE *et al.*, 2011).

Com base em Lachassagne *et al.* (2011), a densidade das fraturas diminui com o aumento da profundidade, ou seja, a redução da condutividade hidráulica do aquífero cristalino não é consequência da baixa permeabilidade das fraturas ou abertura, mas sim do seu desaparecimento em profundidade. Com isso, em um perfil vertical, devido a vários processos,

só é possível encontrar no máximo cinco fraturas caracterizadas como grandes fontes de água (LACHASSAGNE *et al.*, 2011).

Taylor & Howard (2000) e Wright (1992) descrevem a ZT com início nos 20 m de profundidade, alcançando até os 60 m, aproximadamente. Segundo Lachassagne *et al.* (2001), a espessura da ZT pode variar de 50 a 70 m, podendo ser de duas a três vezes maior do que o saprólito, o qual apresenta-se com espessura de 20 a 30m.

2.5 Teste de bombeamento e análise derivativa de curva diagnóstica

O teste de bombeamento é a técnica de caracterização de propriedades hidráulicas de um aquífero mais comumente aplicada. Consiste em impor uma perturbação, como o bombeamento de um poço, e medir a resposta do aquífero como, por exemplo, pela carga hidráulica. Substituindo essas medidas por uma equação de fluxo apropriada, é possível inferir as propriedades hidráulicas do aquífero (KRUSEMEN *et al.* 1970; RENARD *et al.*, 2008).

Diversos foram os métodos de interpretação dos testes de bombeamento utilizados desde o início de sua aplicação, porém, a análise derivativa é o que tem se destacado nas últimas décadas. Demonstrada por Chow (1952) e ganhando notoriedade com as obras de Bourdet *et al.* (1989) e Bourdet *et al.* (1983), o método consiste na análise da curva de rebaixamento em relação a curva formada pela sua derivada logarítmica (RENARD *et al.*, 2008).

Uma das maiores vantagens do gráfico, então chamado curva diagnóstica, é que oferece uma metodologia única de interpretação de dados de teste de bombeamento. Usando-o, torna-se possível a substituição de todos os métodos específicos por um simples e único que pode ser aplicado a qualquer ensaio. Esta vantagem é destacada nas obras de Bourdet citadas, nas quais são analisados os comportamentos das curvas para uma variedade de modelos clássicos de fluxo em um teste de bombeamento (RENARD *et al.*, 2008).

Além desse fator, a deriva da logarítmica permite observar comportamentos que não são notáveis na curva de rebaixamento, pois é altamente sensível a variações desta. Por meio da análise, é possível obter informações que facilitam a seleção do modelo conceitual (BOURDET *et al.* 1989).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento do presente trabalho teve como base os Protocolos de Aplicação de Modelos Matemáticos (PAMMs) de Spitz & Moreno (1996) e Anderson *et al.* (2015), descritos no subcapítulo 2.2, e aplicados do seguinte modo:

3.1 Preparação

3.1.1 Obtenção e aplicação dos dados da CETESB

Os dados foram obtidos por meio de vistas aos processos 60/00265/02 e 60/00466/07 da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB, em relatórios gerados pela empresa Geoclock Consultoria e Engenharia Ambiental Ltda., cujo acesso é assegurado pelo artigo 10 do Decreto nº. 59.263/2013 (SÃO PAULO, 2013).

Com as informações disponibilizadas foi elaborado um banco de dados e, em seguida, uma seleção dos mais relevantes para o desenvolvimento do presente trabalho, entre eles: valores de carga hidráulica e condutividade hidráulica, perfis construtivos, dados de filmagem ótica e teste de bombeamento na área de estudo.

- **Carga hidráulica**

Os valores de carga hidráulica do dia 05/04/2004 (Anexo A) permitiu a geração do mapa potenciométrico utilizado como condição inicial do modelo transiente.

- **Condutividade hidráulica**

Os valores de condutividade hidráulica obtidos por teste de *slug* ou teste de vazão constante (Anexo B) foram utilizados para determinação do valor da condutividade hidráulica das camadas do modelo, por meio do cálculo da média geométrica.

- **Perfis construtivos**

Os perfis construtivos dos poços, cuja localizações estão disponíveis no Anexo C, foram utilizados para determinar o contato do saprólito com a zona de transição. A estimativa foi feita pelo método da krigagem dos dados de profundidade da seção filtrante (Anexo D) em relação à topografia pelo *software* Earth Volumetric Studio, desenvolvido pela C Tech.

- **Perfilagem ótica**

A perfilagem ótica foi realizada no dia 28/10/2004 por uma câmera giratória de alta resolução nos poços tubulares PP-01, PP-02 e PP-03 (Figura 8) e determinou a profundidade das principais fraturas, disponível no Anexo E (GEOCLOCK, 2005). Estes dados foram utilizados para determinar o trecho correspondente a zona de transição e o início da rocha inalterada.

- **Teste de bombeamento**

Os dados de rebaixamento do teste de bombeamento realizado entre os dias 4 e 12 de dezembro de 2004 foi utilizado como critério para validação do modelo numérico em regime transiente, pela correspondência das curvas, e para análise derivativa da curva diagnóstica. Os eventos do ensaio foram estimados com base nos gráficos disponibilizados em Geoclock (2005), pois não foram definidos os momentos exatos nos arquivos originais.

Os principais eventos do teste são o bombeamento do PP-02, que foi ativado aos 0 minutos do teste, com vazão de 9 a 10 m³/h, seguida pela ativação do PP-03, aos 3.727 minutos com vazão de 15 a 16 m³/h. Ambos continuaram a bombear até os 8.870 minutos do ensaio, o qual foi finalizado após 12.600 minutos do seu início (Tabela 2).

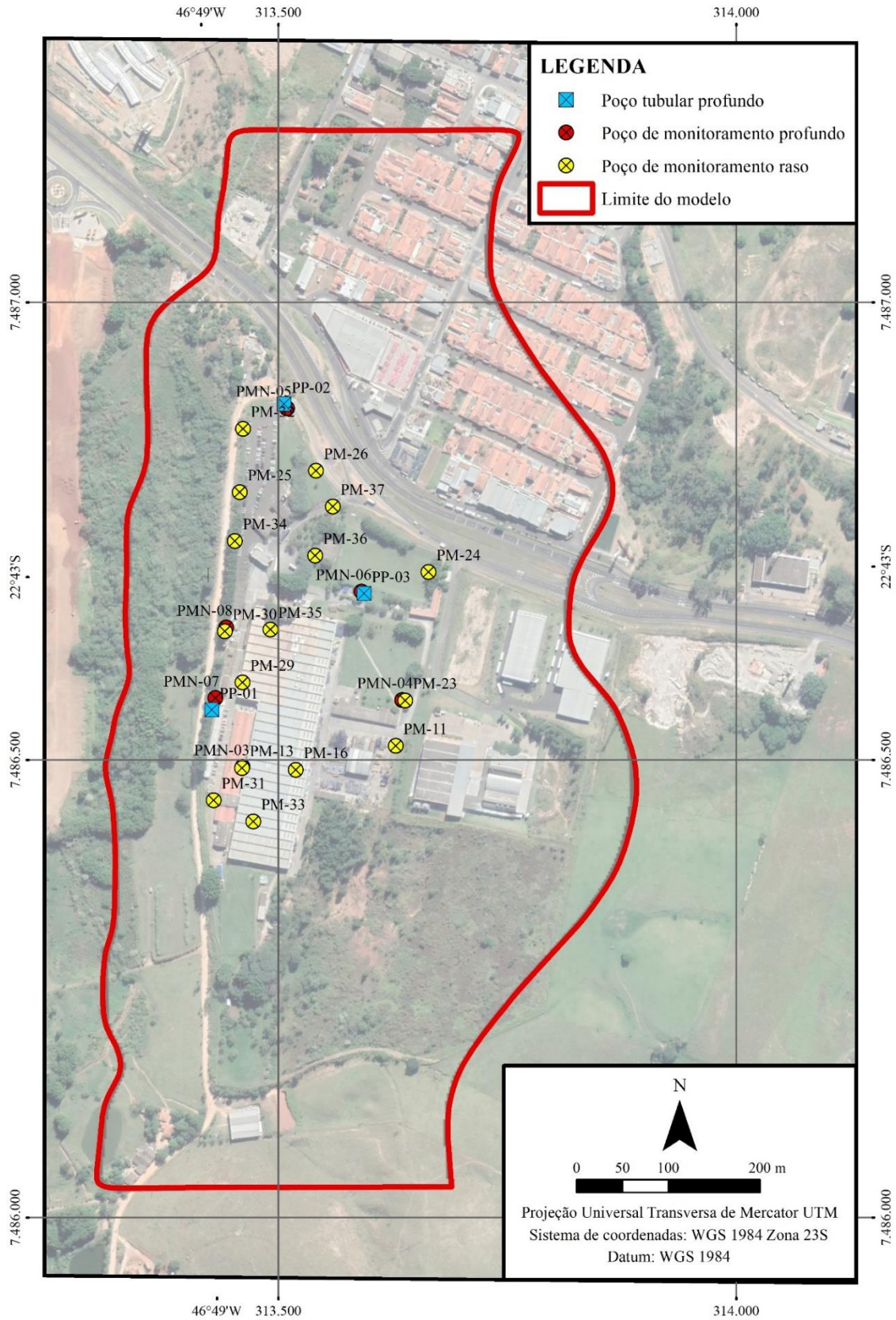
Tabela 2. Eventos principais do ensaio de vazão constante realizado na área modelada durante o mês de dezembro de 2004.

TEMPO (minutos)	EVENTO
0	Início do bombeamento do PP-02 com vazão entre 9 a 10 m ³ /h
3.727	Início do bombeamento do PP-03 com vazão entre 15 a 16 m ³ /h
3.727 – 8.870	Bombeamento concomitante dos poços PP-02 e PP-03
8.870	Fim do bombeamento do PP-02 e PP-03
12.600	Fim do teste

Fonte – Elaborado pela própria autora

Foram monitorados como poços de observação: um poço tubular profundo (PP-01), cuja seção filtrante localiza-se na ZT; dezesseis poços de monitoramento raso (PM-11, 13, 16, 23, 24, 25, 26, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36 e 37), com seção na camada saprolítica; e seis poços de monitoramento profundo (PMN-03, 04, 05, 06, 07 e 08), com seção também na ZT. A disposição destes no domínio do modelo estão disponíveis na Figura 8.

Figura 8. Distribuição dos poços bombeados e monitorados durante o teste de bombeamento no domínio do modelo.



Fonte – Elaborada pela própria autora.

3.1.2 Delimitação do domínio do modelo numérico

O limite do modelo numérico foi definido por meio de delimitação de bacia hidrográfica realizado com o *software* QGIS (QGIS DEVELOPMENT TEAM *et al.*, 2015).

3.1.3 Análise da curva diagnóstica

A análise da curva diagnóstica é realizada por meio do *software* AQT SOLVE (DUFFIELD, 2007), com o objetivo de orientar na adaptação do modelo conceitual que mais se adequa aos dados do teste de bombeamento observado.

3.1.4 Modelo conceitual

Com base nas etapas anteriores, são assumidas as suposições e simplificações necessárias e é desenvolvido o modelo conceitual da área, assim como são estabelecidas as condições de contorno e propriedades do aquífero.

3.1.5 Modelo numérico

Desenvolve-se um modelo geológico tridimensional por meio do *software* *Earth Volumetric Studio* (EVS) e, por fim, constrói-se o numérico de fluxo no *FEFLOW*.

3.2 Calibração

Nesta etapa, os parâmetros do modelo são ajustados até que as curvas de rebaixamentos observados (reais) e calculados (simulações) estejam aproximadas. Inicialmente é feita a calibração do modelo estático, seguida para a calibração do transiente, com base em dados de teste de bombeamento.

3.3 Aplicação

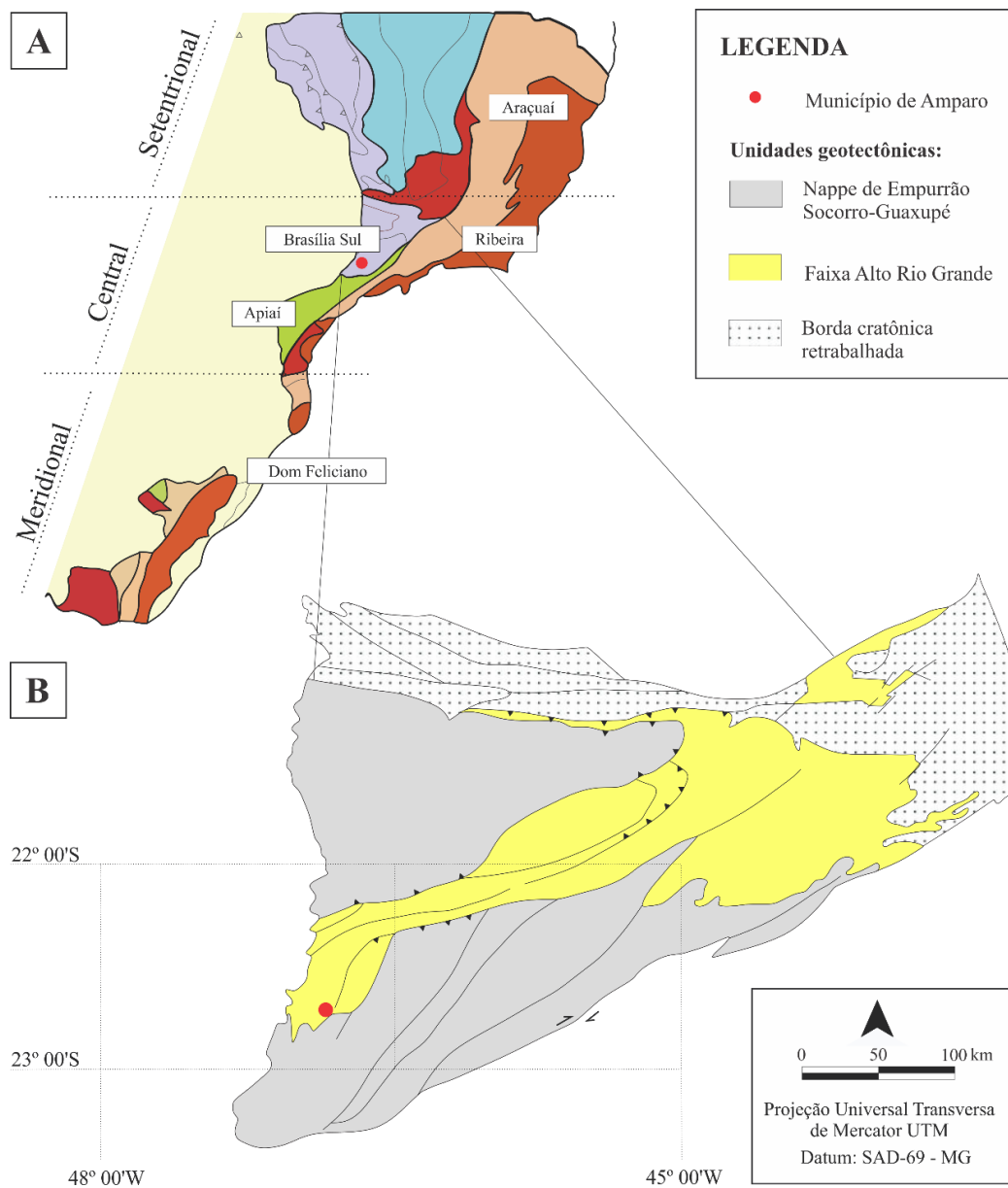
Nesta etapa, o modelo deve cumprir seu propósito que, no presente trabalho, é confirmar ou rejeitar o modelo conceitual. Deste modo, é feita a análise derivativa da curva diagnóstica dos dados de rebaixamento simulado no *software* AQT SOLV (DUFFIELD, 2007) e, após, sua comparação com a análise do resultado do ensaio observado.

4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1 Geologia

A área de estudo está localizada no Orógeno Brasília Sul (Figura 9A), segundo compartimentação de Heilbron *et al.* (2004) e Hasui (2010), porém, ambos os autores divergem quanto ao Sistema Orogênico. Os primeiros classificam a região como pertencente ao Sistema Orogênico Mantiqueira, enquanto o segundo como Tocantins.

Figura 9. (A) Subdivisão da Província Mantiqueira segundo Heilbron *et al.* (2004) e localização do município de Amparo (SP) neste contexto; (B) Unidades geotectônicas do Orógeno Brasília Sul segundo Morais (1999), com destaque para a Faixa Alto Rio Grande, onde está inserida a área de estudo.



Fonte – (A) Adaptado de Heilbron *et al.* (2004); (B) Adaptado de Morais (1999).

Estruturalmente o orógeno é subdividido em *nappes* com empilhamento tectônico vergente rumo ao cráton São Francisco (HEILBRON *et al.*, 2004). Quanto à litotipos, há uma grande quantidade de rochas do embasamento de idade anterior aos 1,7 Ga, predominando rochas pré-cambrianas (BASEI *et al.*, 1986; MORAIS, 1999; HEILBRON *et al.*, 2004).

As rochas pré-cambrianas estão inseridas na Faixa Alto Rio Grande (HASUI & OLIVEIRA, 1984), cuja área pode ser vista na Fig. 9B, descrita como uma unidade tectônica do Mesoproterozoico, instalada sobre fragmentos de microcontinentes aglutinados em orógenos sucessivos do Arqueano ao Eo-Ordoviciano (CAMPOS NETO *et al.*, 1990). Ela é delimitada a norte pela zona de cisalhamento (ZC) transcorrente Três Corações e Jacutinga e a sul e sudeste, pelas ZCs Socorro e Monte Sião (MORAIS, 1999).

Neste contexto e considerando a região de estudo, destacam-se as rochas do Complexo Amparo. Caracterizado litologicamente por Wernick (1967) e originalmente classificado como Grupo por Ebert (1968), corresponde ao conjunto de rochas mais antigo do domínio, de idade Paleoproterozoica a Arqueana (MORAIS, 1999).

A unidade é constituída predominantemente por (granada)-hornblenda-biotita tonalitos e granodioritos gnáissicos, localmente migmatizados, com leucossomas trondhjemíticos a graníticos. Subordinadamente ocorrem núcleos de rochas máficas e ultramáficas metamorfizados e migmatizados, e ortognaisses cálcio-alcálicos (MORAIS, 1999).

Segundo Wernick *et al.* (1976), as rochas do Complexo Amparo pertencem às fácies anfíbolito e granulito e apresentam direção regional NE-SW com variações locais para NNE-SSO e ENE-OSO. Em geral, a inclinação das camadas é elevada, superior a 45°, podendo ser sub-vertical. O padrão de dobramentos é complexo, com grandes dobras fechadas e isoclinais, constituindo anticlinórios e sinclinórios. Os eixos das dobras mergulham de preferências para NE com inclinação em torno de 20°.

Na área de estudo, além do predominante Complexo Amparo, há cobertura cenozoica, correspondente aos depósitos aluvionares associados a sedimentação neogena a quaternária, localizados próximos as drenagens atuais e corpos aluviais. São constituídos de argila, areia e cascalho (BISTRICHI, 2001; WERNICK, 1967).

4.2 Geomorfologia

Segundo Rozz & Moroz (1997), a área de estudo está inserida na Unidade Morfoestrutural Cinturão Orogênico Atlântico, Un. Morfoescultural Planalto Atlântico, mais especificamente abrangendo as unidades de relevo regionais Planalto e Serra da Mantiqueira, Planalto de Jundiá e Planalto de Serra Negra/Lindóia.

Localmente estão presentes dois (2) tipos de relevo: (1) Planície aluvial, associada ao Rio Camanducaia, com altitudes inferiores a 800 m; (2) Colinas e Morros altos, associados ao gnaisses e migmatitos, com amplitude entre 900 e 1200 m, declividade de 20 a 30%, formas de dissecação médias a altas, vales entalhados e com média a alta densidade de drenagem. Estes fatores tornam o segundo tipo de relevo uma área sujeita a forte atividade erosiva, portanto, com alto nível de fragilidade e suscetível à movimentos de massa (ROZZ & MOROZ, 1997).

O domínio morfoclimático da região, segundo a classificação de Ab'Saber (1979), é o dos “mares de morros”, também descrito como áreas mamelonares tropicais-atlânticas florestadas. Apresenta-se como uma zona de alta decomposição das rochas cristalinas, marcada pelo alto intemperismo químico e consequente formação de espessos mantos regolíticos (TORRES *et al.*, 2012).

4.3 Pedologia

Na região do município de Amparo há o predomínio de argissolos vermelho-amarelos (antes denominados podzólicos vermelho-amarelos), seguido pelos latossolos vermelho-amarelos, ambos desenvolvidos principalmente de materiais derivados de granitos e gnaisses; cambissolos em menor quantidade, e muitos afloramentos rochosos (ROZZ & MAROZ, 1997; IBGE, 2001; LEPSCH, 2016).

Os argissolos são bastante intemperizados e apresentam nítida diferenciação de horizontes, com um B caracterizado pelo aumento no teor de argila em função da profundidade, o que torna a cor mais forte, aumenta a coesão e a plasticidade. Este tipo de solo possui maior retenção de água nos horizontes subsuperficiais (LEPSCH, 2016).

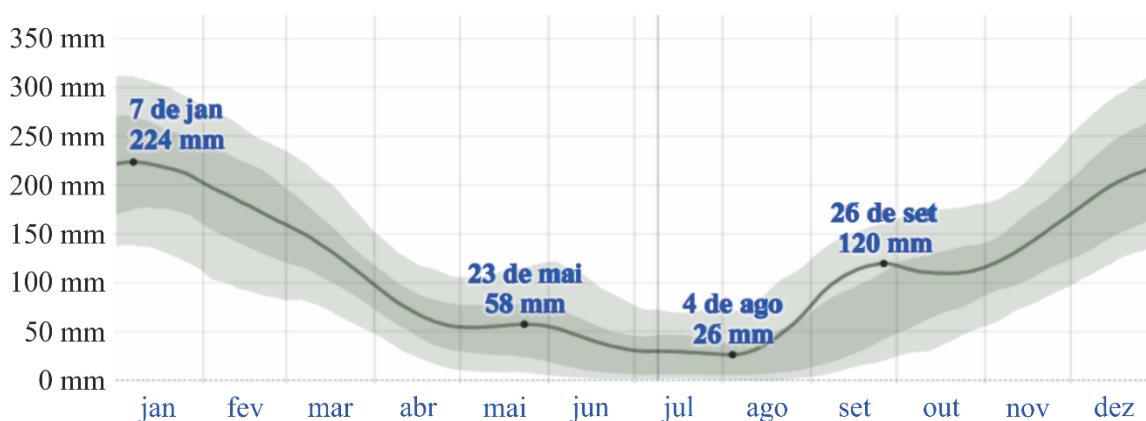
Por ser tratar de uma região tropical úmida, os solos formam-se a partir de regolitos muito intemperizados e espessos, ultrapassando dez metros, originados de materiais submetidos a diversos ciclos de intemperização, remoção e deposição (LEPSCH, 2016).

4.4 Clima

Segundo IBGE (2002), o clima zonal é Tropical Brasil Central, com temperatura subquente. Enquadra-se como Cwa na classificação de Köppen-Geiger, ou tropical de altitude. É caracterizado como subtropical com verão longo, morno e abafado e inverno curto e ameno. Ao longo do ano, a temperatura varia de 12°C a 29°C e raramente é inferior a 8°C ou superior a 33°C (ANTUNES, 1986 *apud* EMBRAPA, 2020; IBGE, 2002).

Segundo dados da União Nacional de Bioenergia (2020), nos anos de 2017, 2018 e 2019, a pluviosidade anual total no município de Amparo (SP) foi de 1.173, 1.065 e 1.145 mm/ano, respectivamente. Os meses de maio a setembro geralmente apresentam menor índice pluviométrico, abaixo de 70 mm/mês, e o período entre outubro e abril, alto índice, com valores acima de 100 mm/mês (Figura 10).

Figura 10. Gráfico de precipitação média (linha contínua) acumulada durante o período contínuo de 31 dias ao redor do dia em questão, com faixas do 25° ao 75° percentil – cinza escuro - e do 10° ao 90° - cinza claro.



Fonte - Weather Spark (2020)

4.5 Caracterização Hidrogeológica

O município de Amparo está inserido no Domínio Hidrogeológico Cristalino associado a rochas granitóides, migmatitos, gnaisses, granulitos, rochas básicas e ultrabásicas, que constituem o aquífero cristalino, nas quais a presença de água subterrânea está condicionada as porosidades secundárias, como fraturas e fendas (BONFIM, 2010).

Localmente, há o predomínio de gnaisses e migmatitos do Complexo Amparo, cuja composição mineralógica é de aproximadamente 40% de anfibólio e mica. Estes minerais alteram com mais facilidade, facilitando o processo de intemperismo da rocha e formando espessos mantos de alteração (CAVALCANTE *et al.*, 1991).

Neste trabalho é considerado que o sistema aquífero local é composto por três camadas: Saprolito e Zona de transição, ambos pertencentes ao manto de intemperismo, e Rocha Inalterada.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise do teste de bombeamento e da perfilagem ótica

A análise dos gráficos de rebaixamento (Figura 11) e dados da perfilagem ótica (Anexo E), obtidos de relatórios gerados pela empresa Geoclock Consultoria e Engenharia Ambiental Ltda., possibilitou observações fundamentais para respaldar a aplicação do modelo conceitual que se almeja validar.

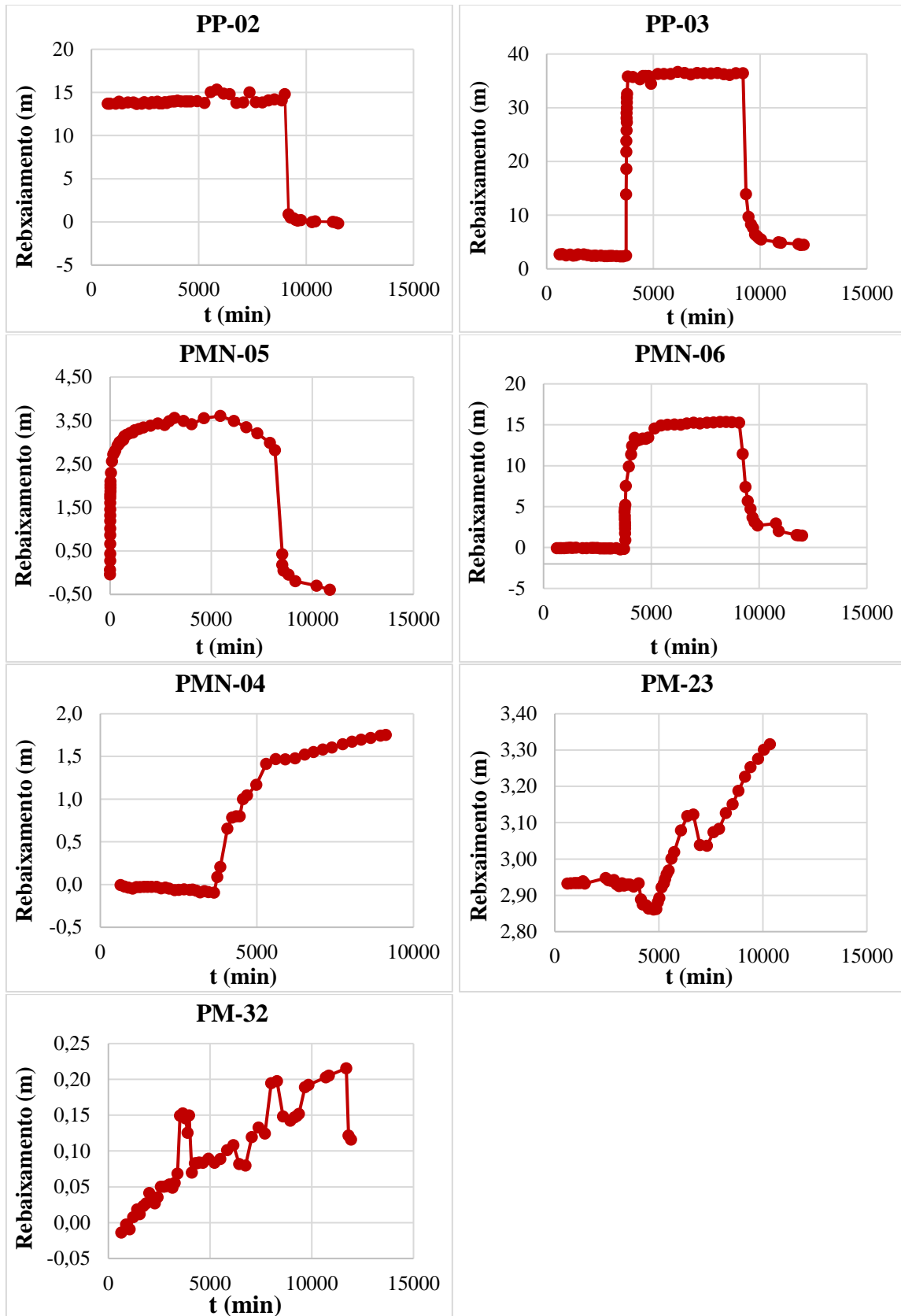
Com base nos gráficos de rebaixamento é notável que o bombeamento do PP-02 influenciou rapidamente o PMN-05, localizado a aproximadamente um metro de distância do primeiro, assim como o PP-03 agiu sobre o PMN-06, ambos também a um metros de distância. Todos estes poços estão localizados na mesma camada, a Zona de Transição.

O poço de monitoramento profundo PMN-04, localizado a 125 metros do PP-03, apresentou rebaixamento de 150 centímetros. Por outro lado, o PM-23, vizinho ao PMN-04, mas com seção filtrante na primeira camada, apresentou um rebaixamento de apenas 50 centímetros.

O PM-32, localizado a 52 metros do PP-02 e com seção filtrante no saprólito, apresentou um rebaixamento de 20 centímetros após o início do bombeamento.

Considerando o comportamento dos poços PM-23 e PMN-04 com o bombeamento na zona de transição pelo PP-03, nota-se que o poço nesta mesma camada apresenta um rebaixamento maior em relação ao que está localizado no saprólito.

Figura 11. Variação das cargas hidráulicas ao longo do teste com bombeamento dos poços PP-02 e 03 e de alguns dos monitorados, sendo eles os profundos PMN-04, 05 e 06 e os rasos PM-23 e 32.

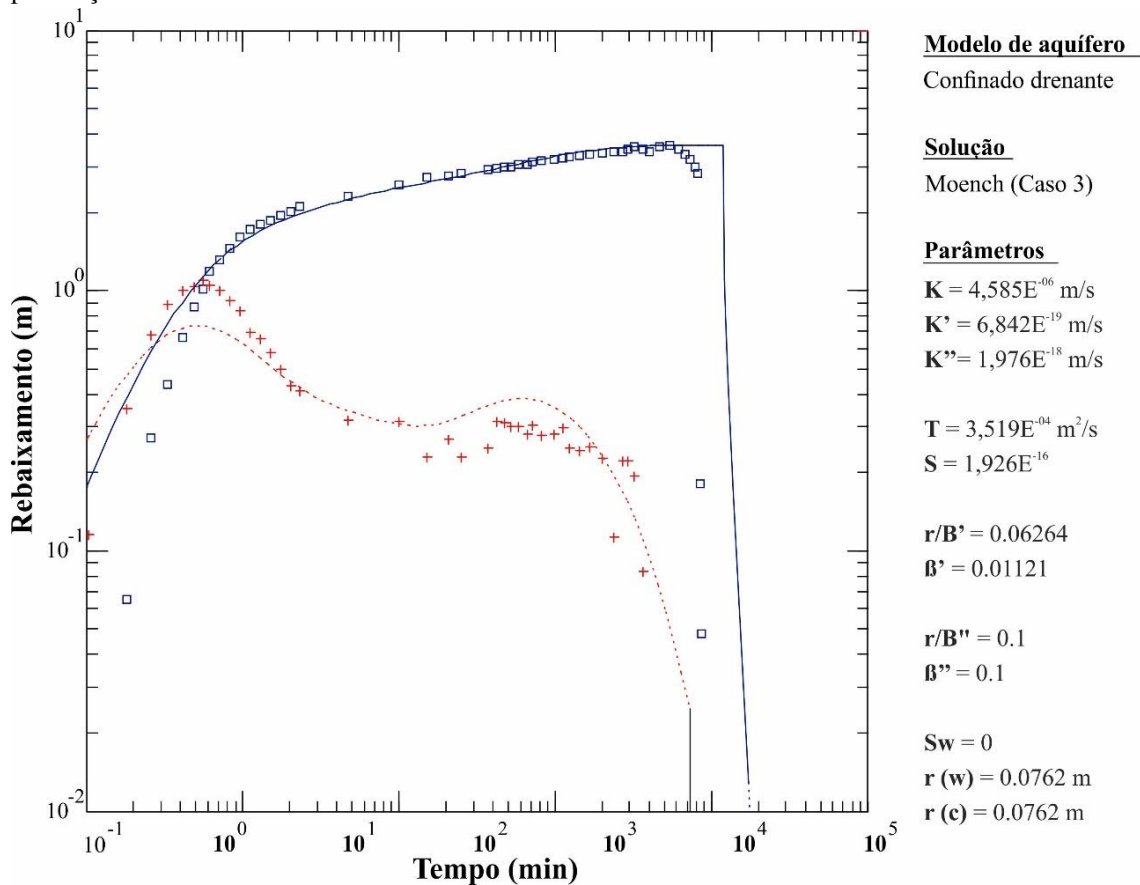


Fonte – Adaptados de Geoclock (2005)

5.2 Análise da curva diagnóstica dos dados observados

Os dados de rebaixamento do PMN-05 possibilitaram a elaboração e interpretação da curva diagnóstica (Figura 13), na qual constam os valores de rebaixamento e sua derivada logarítmica em função do tempo, em gráfico de escala bilogarítmica.

Figura 13. Curva diagnóstica construída a partir dos dados de rebaixamento do PMN-05 (pontos) e modelo analítico ajustado (linhas). Os parâmetros estimados são: K – Condutividade hidráulica do aquífero, K' – Condutividade hidráulica do aquítarde superior, K'' – Condutividade do aquítarde inferior, T – Transmissividade, S – Armazenamento, r/B' e b' – parâmetros de drenança do aquítarde superior, r/B'' e b'' – parâmetros de drenança do aquítarde inferior, Sw – fator de efeito de poço, $r(w)$ – raio do poço e $r(c)$ – raio da perfuração.



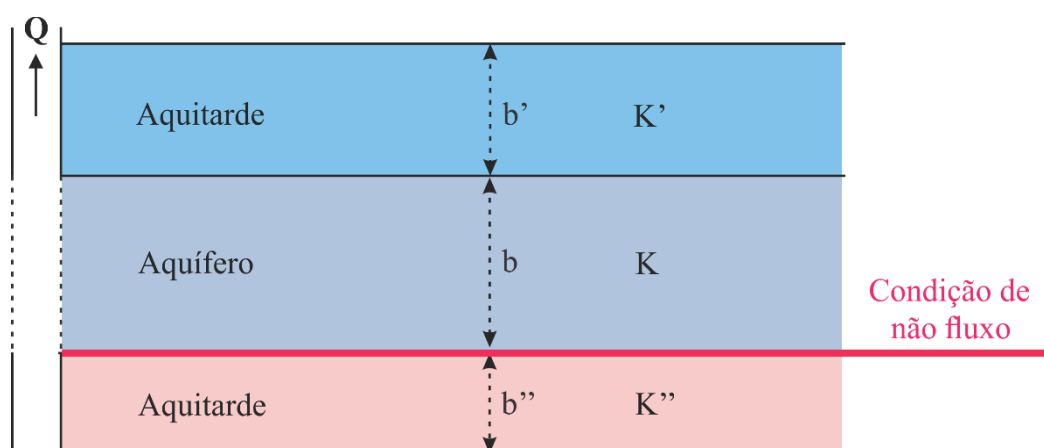
Fonte – Elaborado pela própria autora.

O melhor ajuste para o teste foi o terceiro caso proposto por Moench (1985), modelo analítico de aquífero confinado drenante com fluxo radial infinito (IARF – *infinite acting radial flow*), a partir do qual o *software* AQT SOLVE (DUFFIELD, 2007) estimou a condutividade hidráulica na camada de saprólito e na zona de transição, além de armazenamento e fatores de drenança.

Em Moench (1985), são analisados três modelos de bombeamento em aquíferos confinados drenantes propostos por Hantush (1960), sendo eles diferenciados pelos tipos de

condições de contorno do aquífero em relação ao aquífero superior e inferior. No primeiro caso a camada superior ao aquífero é determinada como de carga hidráulica constante, no segundo caso ambas as camadas são de não-fluxo. O terceiro caso, modelo ajustado ao teste em estudo, consiste em uma condição de contorno de carga constante em relação ao aquífero superior e de não fluxo com o inferior ao aquífero (Figura 14).

Figura 14. Representação do modelo conceitual de Moench (1985) - Caso 3, aquífero confinado drenante com condição de contorno de não fluxo entre o aquífero e o aquífero inferior, modelo conceitual resultante da análise derivativa do poço PMN-05.



Fonte – Adaptado de Moench (1985).

As diferenças entre os três casos podem ser percebidas apenas no final do teste. No início, os limites com os aquíferos inferior e superior, que distinguem os três casos, não apresentam papel significativo, refletindo o fato de que a drenança no aquífero é derivada inteiramente de seu próprio armazenamento (MOENCH, 1985).

O modelo conceitual resultante da análise se enquadra na situação observada em campo e com os valores de rebaixamento apresentados no subcapítulo anterior. O saprólito possivelmente atua como um aquífero com condição de contorno de carga constante em relação ao aquífero, enquanto a base do modelo, composta por rochas do embasamento não intemperizadas, apresenta-se como um condição de não fluxo.

A interpretação como confinado drenante pode ser relacionada com a baixa influência do bombeamento do PP-03 sobre o poço raso PM-23, e maior atuação sobre o profundo PMN-04, ambos próximos. O bombeamento de um poço na zona de transição afeta diretamente o que está na mesma camada, resultando em maior rebaixamento, enquanto a água retirada da camada confinante, o saprólito, é associada ao efeito de drenança, que gera redução pouco significativa da carga hidráulica do PM-23.

Na fase final do teste, a derivativa apresenta uma tendência a seguir uma linha horizontal, indicando estabilização e, portanto, um IARF. Quando a curva diagnóstica se apresenta deste modo, o fluxo pode ser descrito como um conjunto de linhas convergindo para um cilindro circular (RENARD *et al.* 2008).

Segundo Moench (1985), para a descrição matemática do modelo conceitual proposto é assumido que as superfícies potenciométricas das camadas são horizontais, assim como o fluxo do aquítarde é tido como vertical e o do aquífero como horizontal.

Neuman & Witherspoon (1969) *apud* Moench (1985) analisaram a influência destas suposições detalhadamente, por meio de um modelo de elementos finitos, e concluíram que em situações em que a condutividade do aquífero é mais do que 100 vezes maior do que o aquítarde, o erro gerado é menor do que 5% na camada semiconfinada e negligenciável no aquífero. Por outro lado, em situações em que há uma diferença baixa entre a condutividade do aquítarde e do aquífero, o erro aumenta progressivamente com o tempo e com a redução da distância radial.

Considerando que o PMN-05 está muito próximo ao poço bombeado PP-02, ou seja, a uma curta distância radial, os valores de condutividade hidráulica obtidos pela análise derivativa podem apresentar um erro associado e, portanto, não são utilizados como referência na modelagem numérica.

A resposta do aquífero fraturado durante um teste de bombeamento como confinado drenante e com fluxo radial infinito já foi relatada por outros autores - entre eles Hammond (2018), que descreveu como comum este modelo analítico em aquíferos de rochas fraturadas, ao realizar ensaios em Maryland, nos EUA e, também, Taylor & Howard (2000), estudo realizado em Uganda, na África.

5.3 Modelo Conceitual

Fundamentando-se no modelo conceitual pré-existente e nos dados e análises do teste de bombeamento, perfil ótico e da curva diagnóstica do rebaixamento, são impostas as seguintes premissas ao modelo:

- O domínio é composto por três camadas, com distintas condutividades hidráulicas, sendo o aluvião (1), de maior valor e menor abrangência, apresentando-se como um fino estrato acompanhando a drenagem; o saprólito (2), de menor condutividade e de grande abrangência nos primeiros 30 metros e, por fim, a zona de transição (3), com condutividade intermediária e com grande abrangência entre os 30 e 80 metros de profundidade.

- A base do modelo é classificada como uma condição de fluxo nulo, por ser uma representação da rocha inalterada considerada impermeável.
- O aquífero é do tipo confinado drenante, com a camada de saprólito atuando como aquitarde confinante, enquanto a zona de transição, como aquífero.
- O aquífero é do tipo fraturado, porém, a zona de transição é representada como um meio homogêneo e isotrópico, assim como o saprólito e o aluvião.
- A descarga da água subterrânea dá-se exclusivamente para a drenagem existente na área e apenas pelo aluvião e saprólito.
- Exceto a borda oeste, que representa a drenagem, as bordas laterais da área de domínio do modelo são consideradas condições de contorno de fluxo nulo, definidas assim por serem linhas de simetria ou por serem paralelas às linhas de fluxo de acordo com a delimitação de bacia hidrográfica.

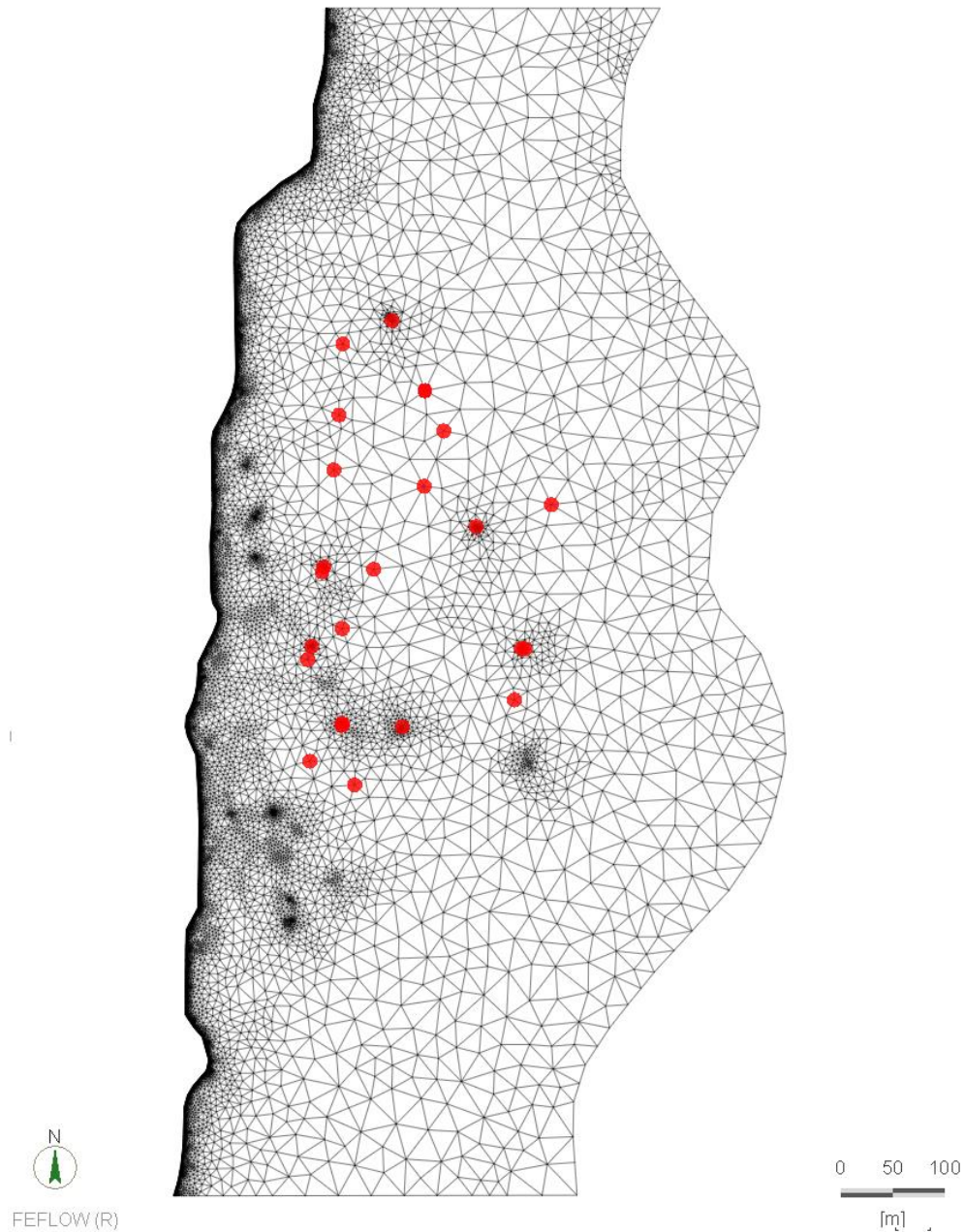
5.4 Modelo Matemático

5.4.1 Domínio e discretização do modelo

O domínio modelado possui 520.961 m² de área, com volume de 41.673.400 m³, subdividido em três camadas, portanto, quatro *slices*. A discretização do modelo gerou refinamento da malha nas bordas com condição de contorno de tipo I, associado à drenagem (Figura 15). Não foi aplicado refinamento nas áreas próximos aos poços, mas há um aumento de elementos em algumas áreas devido à grande proximidade entre eles. Foram adotados 23 poços de observação utilizados para calibração do modelo em regime transiente

O processo gerou 143.922 elementos finitos em forma de prismas triangulares e 102.656 nós, sendo que cada *layer* possui 47.974 elementos e cada *slice* 25.664 nós. A porcentagem de ângulos obtusos acima de 90° é 12,6%, enquanto a de ângulos maiores que 120° é nula, sendo que nenhum triângulo viola a Lei de Delaunay.

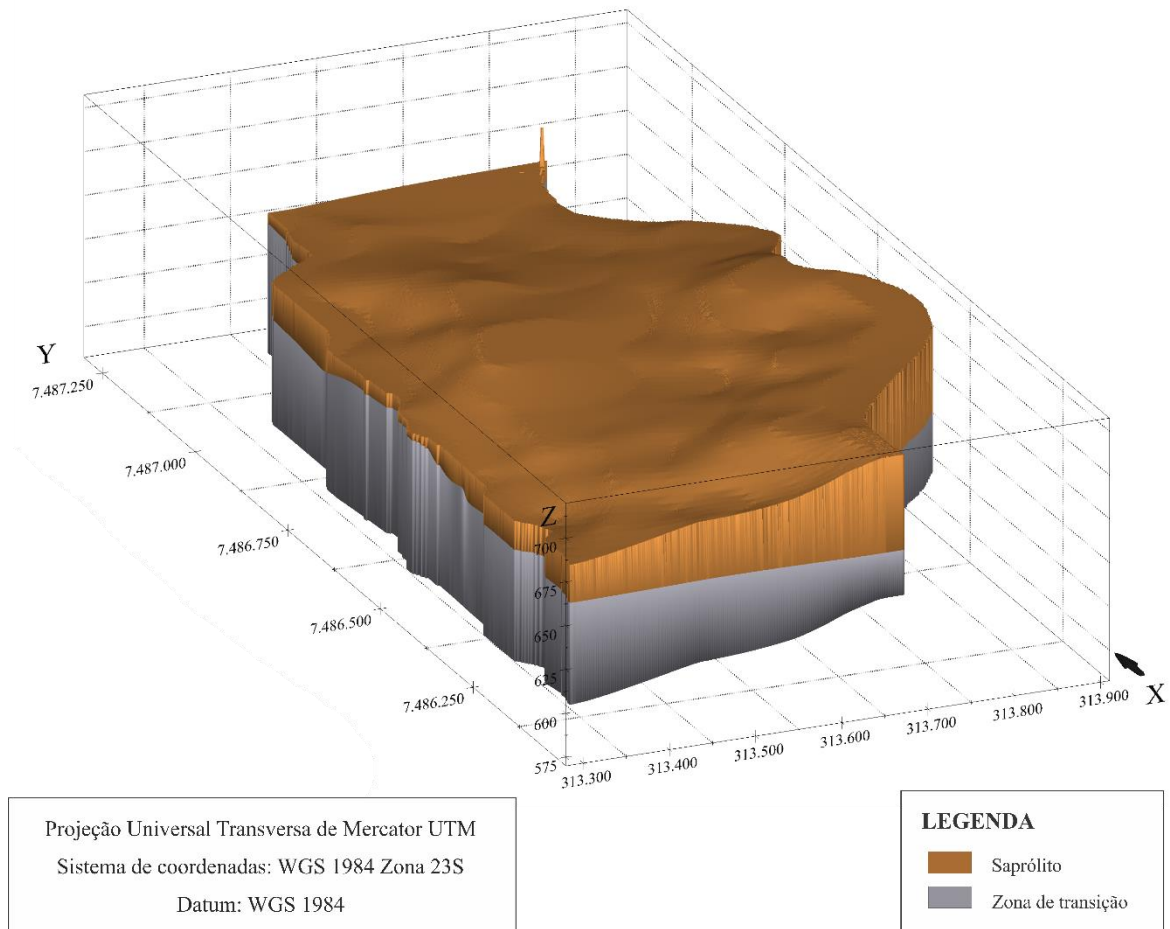
Figura 15. Malha de elementos finitos adotada na modelagem numérica, na qual é notável o refinamento no limite Tipo I a oeste. Os pontos com grande quantidade de elementos, exceto a drenagem, estão associados a proximidade de alguns poços entre eles. Os pontos em vermelho são os poços de observação usados na calibração em regime transiente.



Fonte – Elaborado pela própria autora através do *software* FEFLOW.

A topografia do domínio foi gerada a partir de informações do modelo digital de terreno obtidas do satélite ALOS-PALSAR. Em seguida, com base no conceitual, foi elaborado um modelo geológico tridimensional por meio do *software* *Earth Volumetric Studio* (EVS) (Figura 16) constando apenas as *layers* correspondentes ao saprólito e a zona de transição.

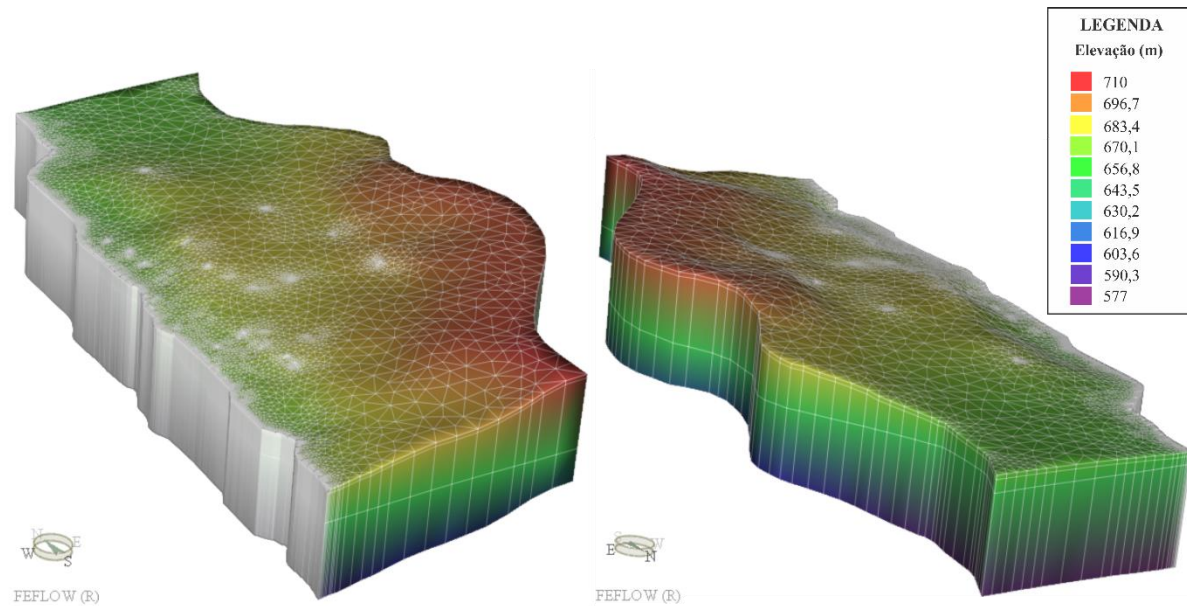
Figura 16. Modelo geológico tridimensional representando inicialmente a primeira camada do modelo, saprólito, e a segunda, zona de transição. Sobrelevado duas vezes.



Fonte - Elaborado pela própria autora com base no modelo digital de elevação obtido pelo satélite ALOS-PALSAR e gerado pelo *software Earth Volumetric Studio*.

Os dados topográficos e litológicos gerados foram importados para o FEFLOW, no qual foi realizada a discretização da primeira *layer*, visando gerar um aluvião de 3 metros de espessura (Figura 17), com base na análise de perfis litológicos disponíveis em GEOCLOCK, 2005; GEOCLOCK, 2007a; GEOCLOCK, 2007b; GEOCLOCK, 2010, finalizando a discretização do modelo em quatro *slices*.

Figura 17. Domínio do modelo com destaque para topografia e discretização vertical. Sobrelevada duas vezes.



Fonte – Elaborado no *software* FEFLOW com base no modelo digital de elevação obtido pelo satélite ALOS-PALSAR.

5.4.2 Condições de contorno

Com base no conceitual foram estabelecidas as condições de contorno dos limites do modelo (Figura 18). A base, devido ao contato com a rocha inalterada e impermeável, é considerada uma condição de contorno do Tipo II, com fluxo conhecido e igual a zero (nulo).

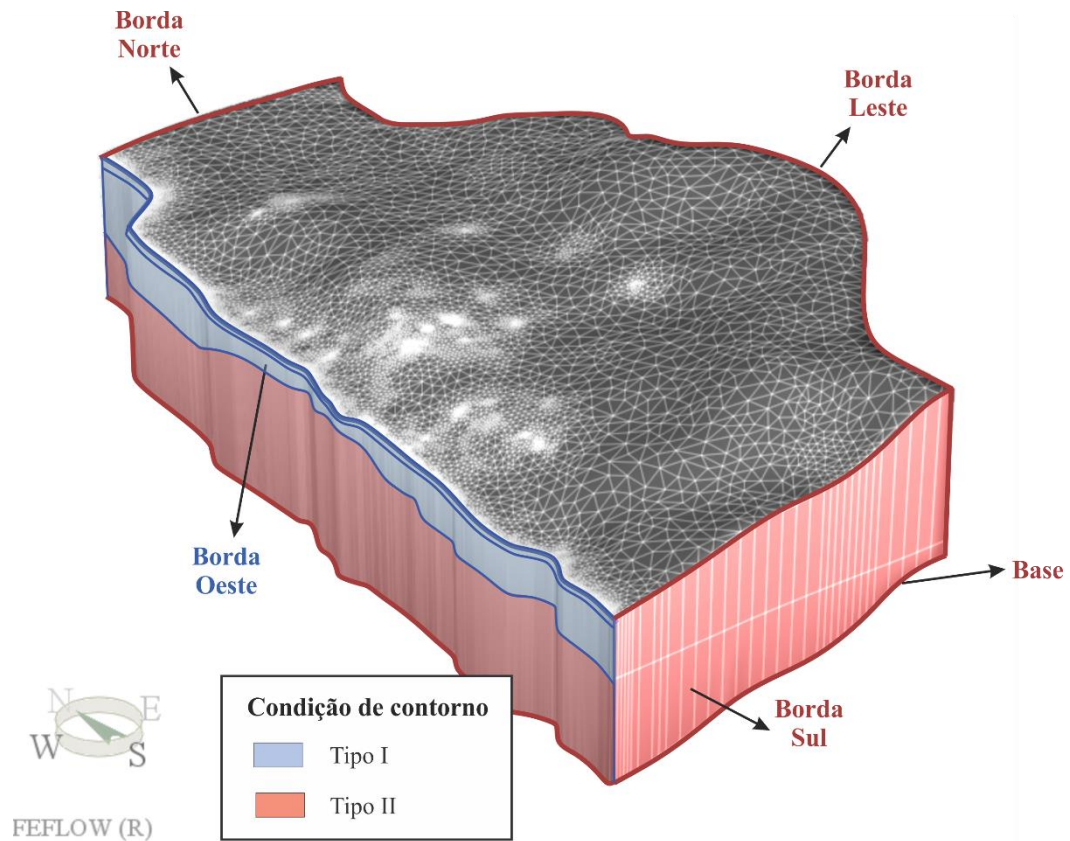
Quanto aos limites laterais, a borda leste é, considerando sua topografia e a delimitação da bacia, um divisor de águas, enquadrando-se, portanto, como condição de contorno de Tipo II, assim como as bordas norte e sul. Estas últimas são paralelas à linha de fluxo, que flui de leste a oeste, portanto, nulo.

A primeira camada da borda oeste acompanha o afluente do rio Camanducaia, portanto, as *slices* 1 a 3 são consideradas condições de contorno do Tipo I, cuja carga hidráulica especificada é igual à topografia do nó somado a 1,5 metros, que representa o nível da água. Para evitar a entrada de água no modelo, foi utilizada no FEFLOW a ferramenta *Maximum flow-rate constraint* com valor igual a zero. A segunda camada, *slice* 4, por não descarregar na drenagem, apresenta-se como condição de contorno do Tipo II, não-fluxo.

Por fim, os poços de bombeamento PP-02 e PP-03 são inseridos no FEFLOW como *multilayer wells*, considerados como condição de contorno do tipo II, com fluxo especificado. Os poços de observação do teste de bombeamento, apesar de não serem condições de contorno,

também foram inseridos como *multilayer wells*, porém, sem aplicação de um valor de fluxo. Isto explica-se pela necessidade de analisar a variação da carga hidráulica tanto na camada saprolítica quanto na zona de transição, o que não é possível por meio da ferramenta *observation point*.

Figura 18. Condições de contorno estabelecidas para o modelo.

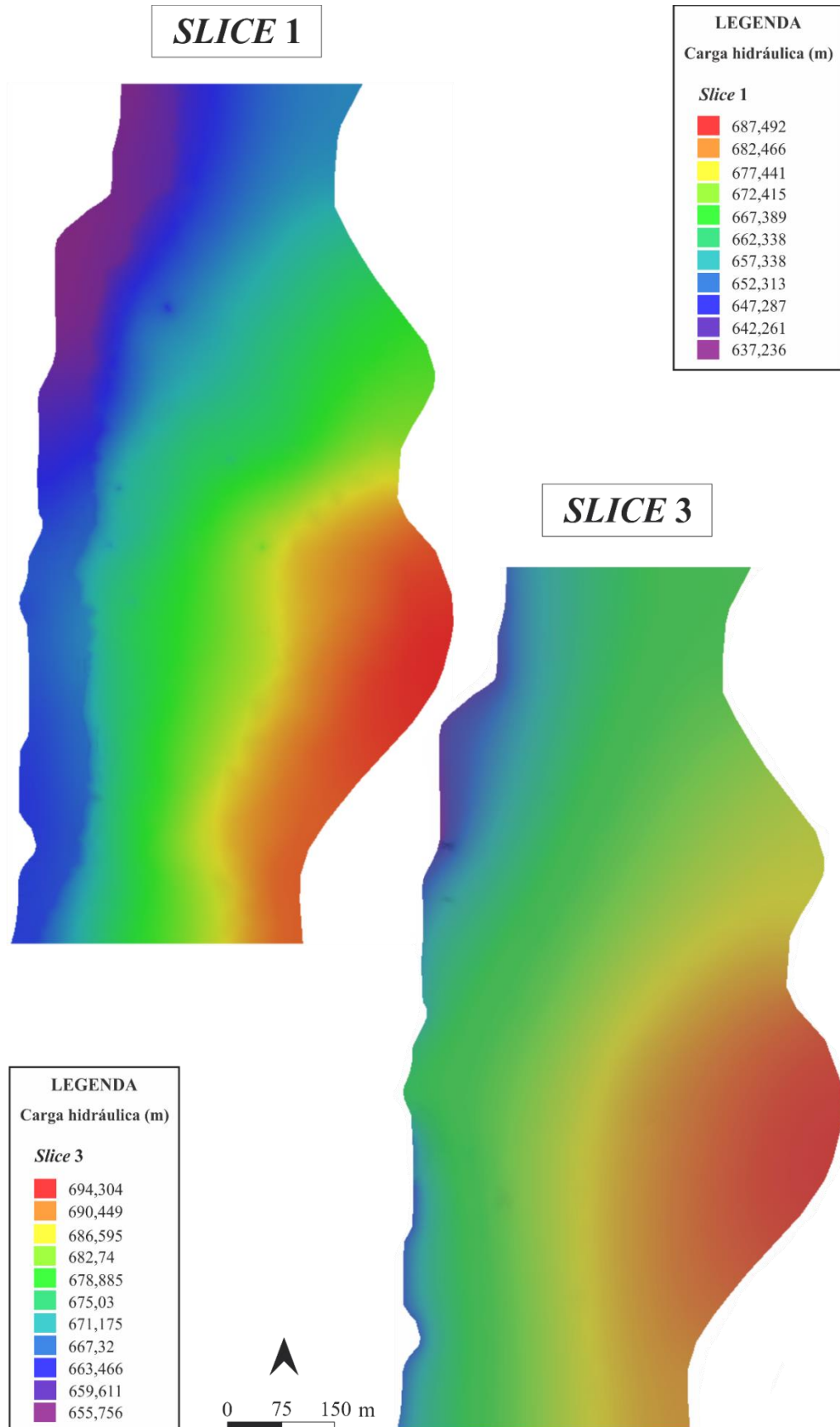


Fonte – Elaborado pela própria autora.

5.4.3 Condições iniciais

As condições iniciais utilizadas no regime transiente foram determinadas pela simulação em regime estacionário, não sendo realizada a calibração nesta etapa, pois o objetivo é apenas a distribuição das cargas hidráulicas (Figura 19). Os valores de referência são as medidas dos poços de monitoramento raso (PMs) do dia anterior ao início do teste de bombeamento (Anexo A) e os valores de carga hidráulica da drenagem.

Figura 19. Distribuição das cargas hidráulicas na condição inicial do modelo nas *slices* 1, topo do saprólito e aluvião, e 3, topo da zona de transição.



Fonte – Elaborado pela própria autora por meio do *software* FEFLOW.

5.5 Simulação em regime transiente

5.5.1 Parâmetros hidrodinâmicos

Os valores de rebaixamento consistem no principal critério utilizado para calibração do modelo, visando à correspondência dos valores observados e simulados durante o teste de bombeamento de vazão constante disponibilizado por Geoclock (2005).

Para determinação das condutividades hidráulicas de cada camada do modelo, são considerados dados do Anexo B, no qual constam resultados de Testes de *Slug* e de Vazão Constante, tanto para poços rasos – saprólito, quanto profundos – zona de transição.

Para os valores de cada camada, foi feita a média geométrica, pela qual foi obtido o valor de condutividade $4,37E^{-07}$ m/s para o saprólito e, $3,9 E^{-06}$ m/s para a Zona de Transição (Tabela 3). Ambos os horizontes são representados no modelo como isotrópicos ($K_x = K_y = K_z$). Quanto ao aluvião é estabelecida a condutividade hidráulica de $1,5E^{-05}$ m/s.

Destaca-se que a média geométrica das condutividades hidráulicas da zona de transição assemelha-se ao valor obtido pela análise derivativa, $4,58E^{-06}$ m/s.

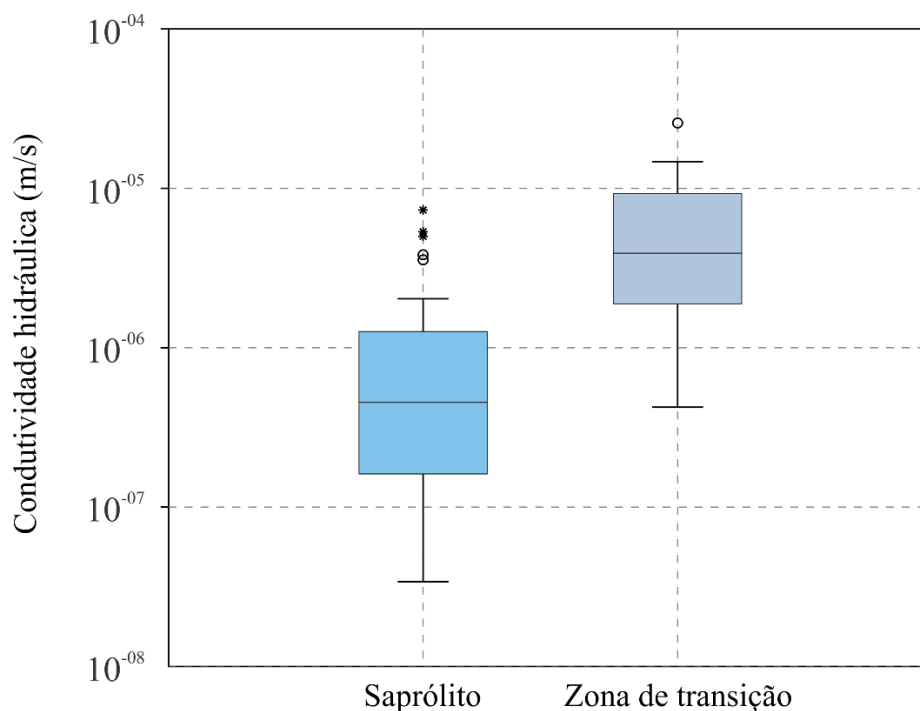
Tabela 3. Condutividades hidráulicas mínimas, máximas e médias geométricas da primeira (saprólito) e segunda (zona de transição) camadas do modelo numérico.

(m/s)	Mínima	Máxima	Média geométrica
Saprólito	$3,38E^{-08}$	$7,31E^{-06}$	$4,37E^{-07}$
Zona de Transição	$4,24E^{-07}$	$2,57E^{-05}$	$3,90E^{-06}$

Fonte – Elaborada pela própria autora

A interpretação do gráfico *box plot* (Figura 20) gerado com os dados de condutividade hidráulica permite notar que os valores de média geométrica estão próximos à mediana e inseridos na caixa de amplitude interquartílica. Em geral, pode-se dizer que a maioria dos resultados de condutividade hidráulica estão inseridas em valores com ordem de grandeza 10^{-7} m/s para o saprólito e 10^{-6} m/s para a zona de transição. Isto indica que o parâmetro determinado para a simulação está coerente com a maioria dos dados da área.

Figura 20. *Box plot* dos dados de condutividade hidráulica do saprólito e da zona de transição. Desconsiderando os pontos acima do limite máximo, correspondentes aos outliers, nota-se uma diferença de aproximadamente uma ordem de grandeza entre os quartis da primeira e segunda camadas.



Fonte – Elaborada pela própria autora por meio do *software* Past.

Destaca-se, por fim, a semelhança entre os valores de condutividade hidráulica da camada correspondente a zona de transição obtidas de outras bibliografia e os apresentados neste trabalho (Tabela 4).

Tabela 4. Comparação entre os valores de condutividade hidráulica deste trabalho com outras bibliografias.

	Carga hidráulica (m/s)		
	Mínima	Máxima	Média Geométrica
Presente trabalho	$4,24E^{-07}$	$2,57E^{-05}$	$3,90E^{-06}$
Pede (2004) *	$1,10E^{-07}$	$2,27E^{-04}$	$7,99E^{-06}$
Taylor & Howard (2000) *	$4,63E^{-07}$	$8,10E^{-06}$	$4,63E^{-06}$
Chilton & Smith-Carington (1984)	$5,78E^{-07}$	$1,73E^{-05}$	-

* Método de Bower & Rice (1976)

Fonte – Elaborada pela própria autora

5.5.2 Recarga

O valor de recarga foi considerado nulo por toda a superfície do modelo ao longo do processo de calibração e simulação em regime transiente.

5.5.3 Calibração

O critério para calibração em regime transiente foi a semelhança entre as curvas de rebaixamento durante o teste de bombeamento observado e simulado, com valores fixos de condutividade hidráulica. Em vista disso, os valores de *root mean square error* (RMSE), erro quadrático médio, geralmente utilizados como referência para determinar o índice de ajustamento, foram desconsiderados.

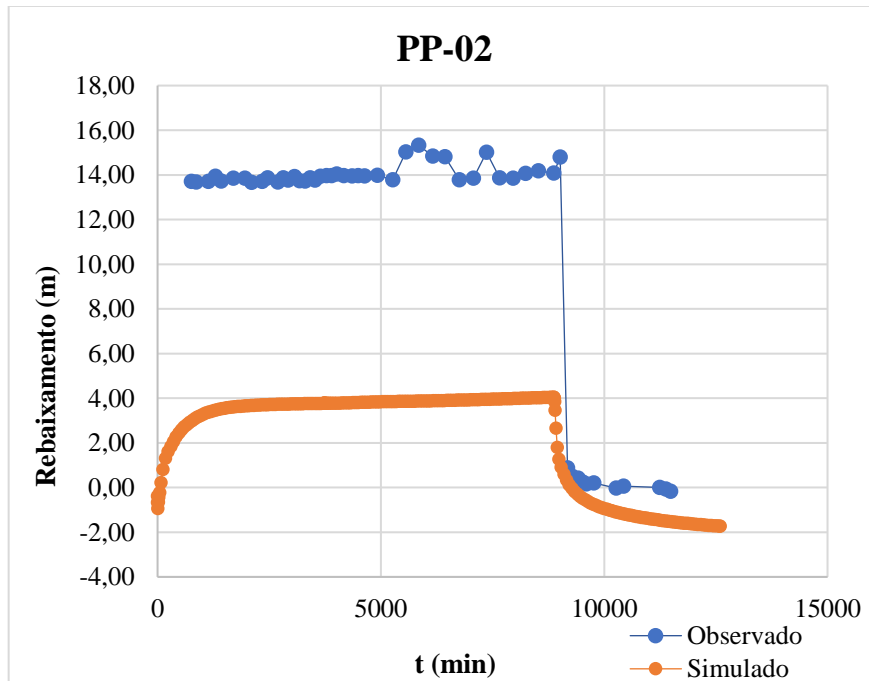
Assim sendo, aplicando-se os valores de condutividade hidráulica estabelecidos pela média geométrica, e variando os valores de vazão do PP-02, entre 9 e 10 m²/h, e do PP-03, entre 15 e 16 m²/h, foi possível simular o ensaio de modo semelhante ao real. Para isto, foram considerados os valores máximos de vazão.

Os poços utilizados para correlação da variação de carga hidráulica entre os dados observados e simulados são os poços de bombeamento PP-02 e PP-03, os poços de observação PMN-04, PMN-05, PMN-06, PM-23 e PM-32. Os poços de observação PP- 01, PM-11, 13, 16, 24, 25, 26, 29, 30, 31, 33, 34, 35, 36, 37 e PMN- 03, 07 e 08 evidenciaram, assim como no teste observado, variação pouco significativa da carga hidráulica.

Quanto a discretização temporal do modelo, foi utilizado a geração automática disponibilizada pelo *software* FEFLOW, no qual o período de 12.600 minutos foi dividido em 267 *time steps* com tempos variados (Anexo F).

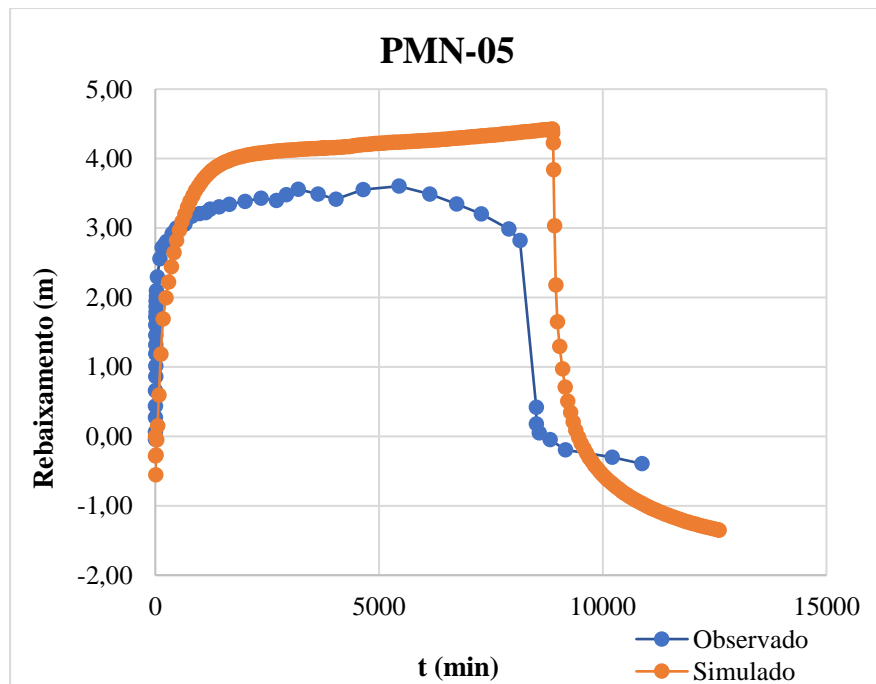
Os gráficos comparativos entre os dados do teste de bombeamento simulado e observado que apresentaram variações consideráveis de carga hidráulica são apresentados nas figuras 21 a 27. É evidente uma diferença entre os dois resultados em relação ao período de desligamento das bombas, cujo tempo exato precisou ser estimado.

Figura 21. Gráfico comparativo entre dados de rebaixamento, observado (linha azul) e simulado (linha laranja), do poço de bombeamento PP-02, com seção filtrante na zona de transição.



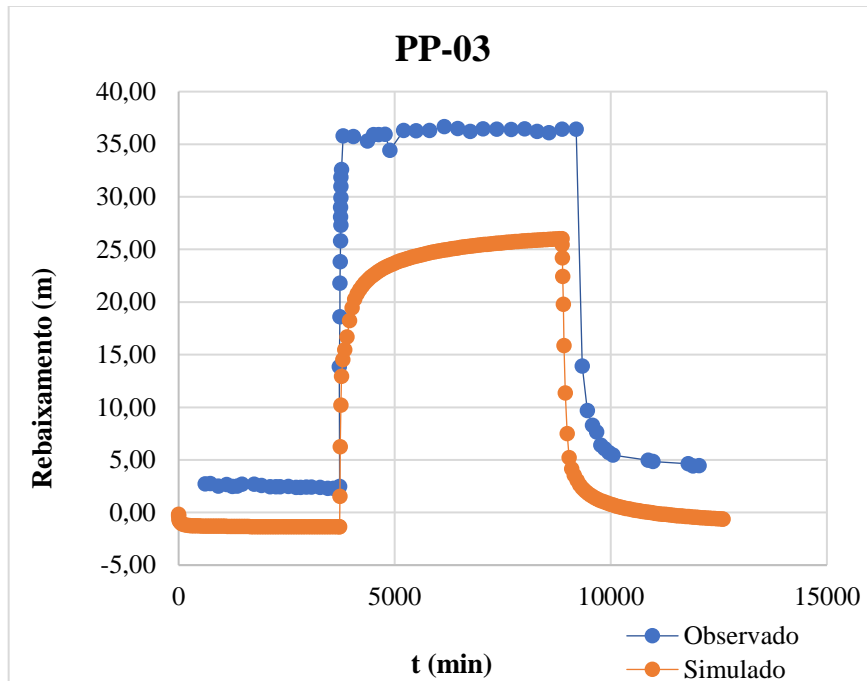
Fonte – Elaborado pela própria autora.

Figura 22. Gráfico comparativo entre dados de rebaixamento, observado (linha azul) e simulado (linha laranja), do poço de monitoramento PMN-05, com seção filtrante na zona de transição.



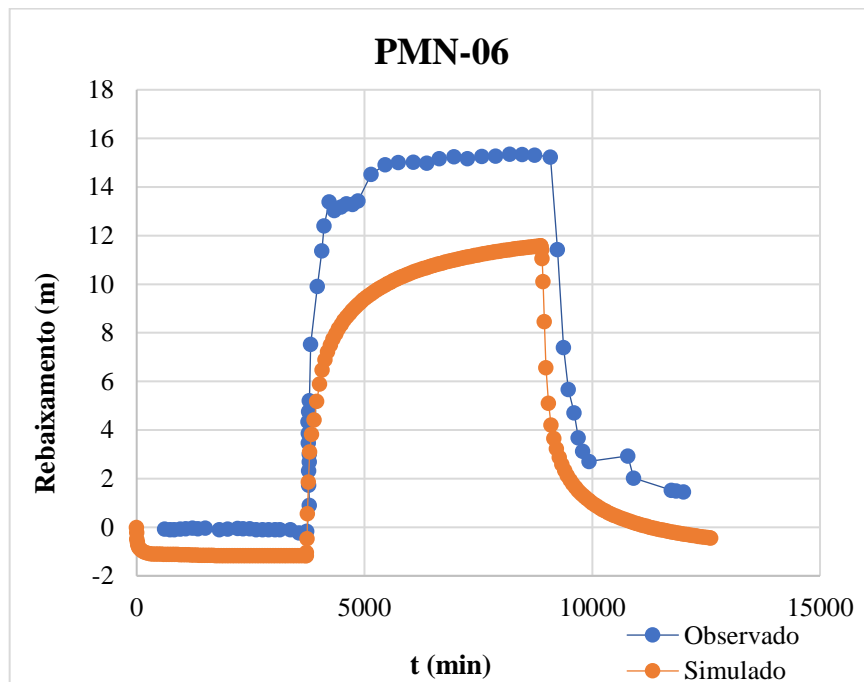
Fonte – Elaborado pela própria autora.

Figura 23. Gráfico comparativo entre dados de rebaixamento, observado (linha azul) e simulado (linha laranja), do poço de bombeamento PP-03, com seção filtrante na zona de transição.



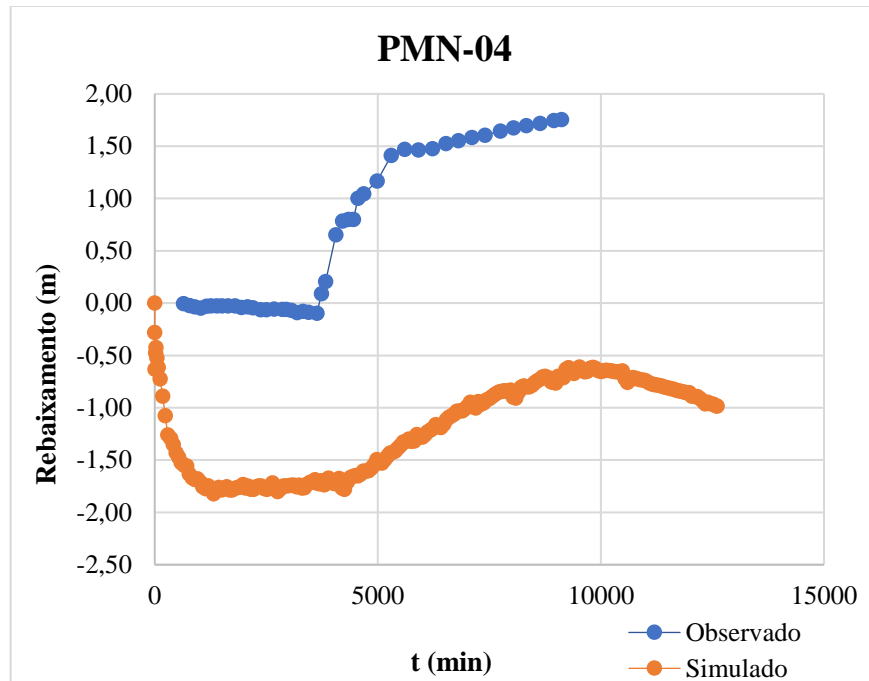
Fonte – Elaborado pela própria autora.

Figura 24. Gráfico comparativo entre dados de rebaixamento, observado (linha azul) e simulado (linha laranja), do poço de monitoramento PMN-06, com seção filtrante na zona de transição.



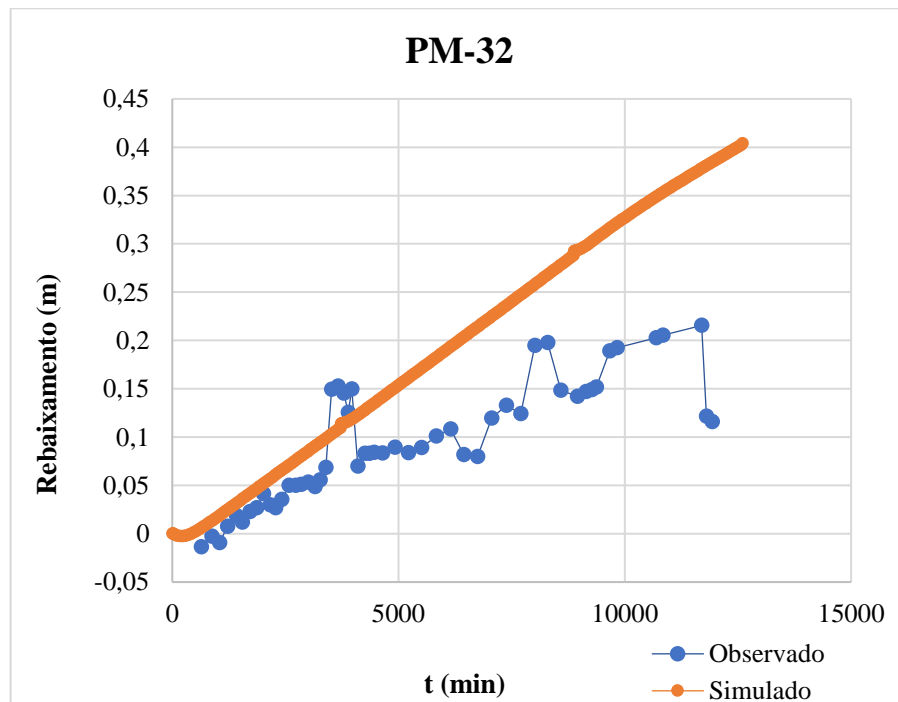
Fonte – Elaborado pela própria autora.

Figura 25. Gráfico comparativo entre dados de rebaixamento, observado (linha azul) e simulado (linha laranja), do poço de monitoramento PMN-04, com seção filtrante na zona de transição



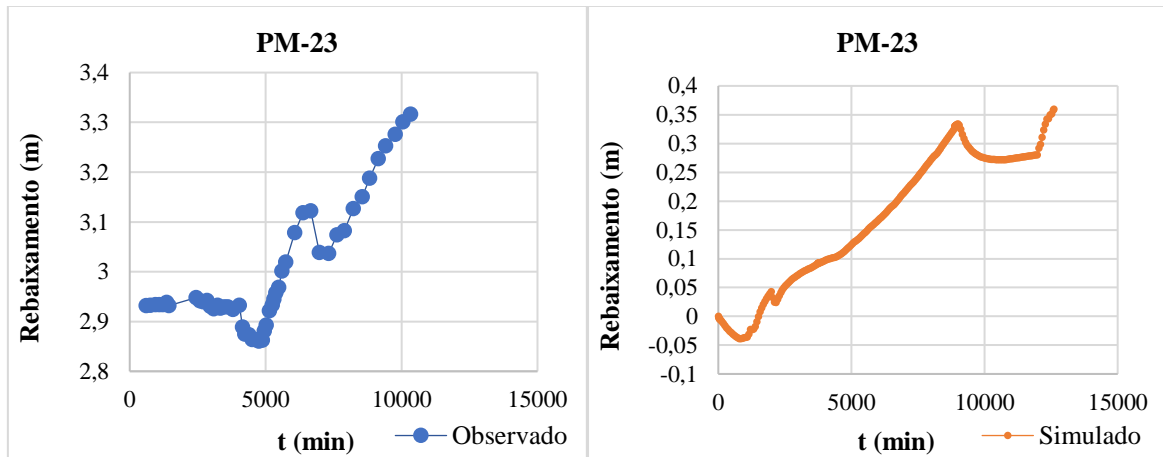
Fonte – Elaborado pela própria autora.

Figura 26. Gráfico comparativo entre dados de rebaixamento, observado (linha azul) e simulado (linha laranja), do poço de monitoramento PM-32, com seção filtrante no saprólito



Fonte – Elaborado pela própria autora.

Figura 27. Gráficos comparativos entre dados de rebaixamento, observado (linha azul) e simulado (linha laranja), do poço de monitoramento PM-23, com seção filtrante no saprólito.



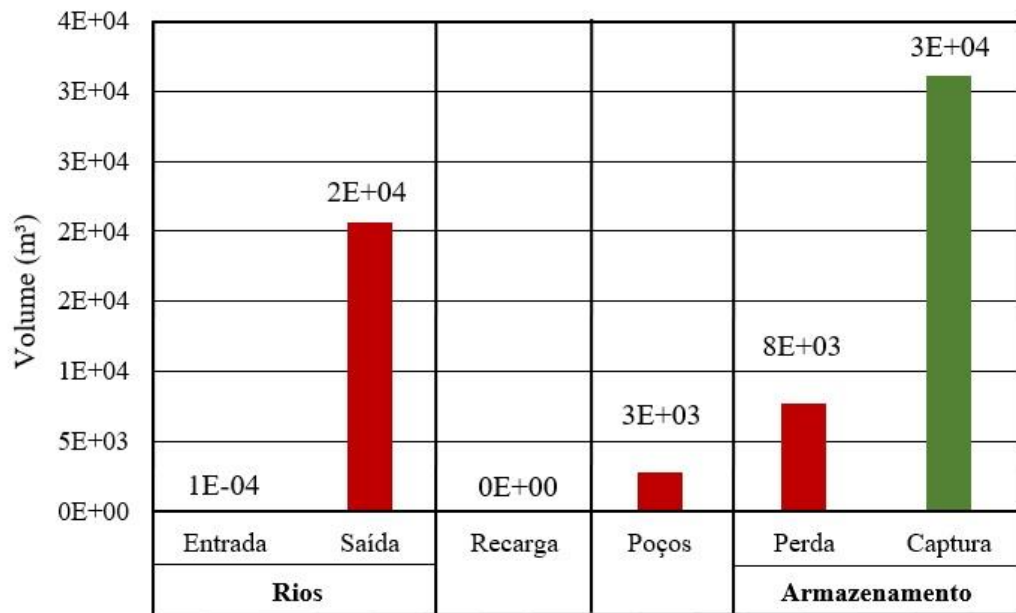
Fonte – Elaborado pela própria autora.

Ressaltando novamente que os poços PM-23 e PMN-04 são vizinhos, porém, com seção filtrante no saprólito e zona de transição, respectivamente. Nota-se, assim como no teste de bombeamento observado, que há um rebaixamento maior no PMN-04 em relação ao PM-23. Esta diferença salienta a distinção entre a camada de maior condutividade hidráulica, representada pela zona de transição, em relação à camada superior.

5.6 Balanço de fluxo

Como resultado do modelo, tem-se balanço de fluxo ao final dos 12.600 minutos, equivalente à 8 dias e 18 horas apresentado na Fig. 28. A somatória de entrada de água no aquífero é muito baixo, de apenas $1E^{-04} \text{ m}^3$, equivalente a recarga pela drenagem. O volume total de saída do modelo perfaz 23.453 m^3 , que consiste na saída de água pela drenagem (20.603 m^3) e pelo bombeamento dos poços (2.850 m^3). Quanto ao armazenamento, houve uma perda de $7.704,7 \text{ m}^3$ e captura de 31.131 m^3 .

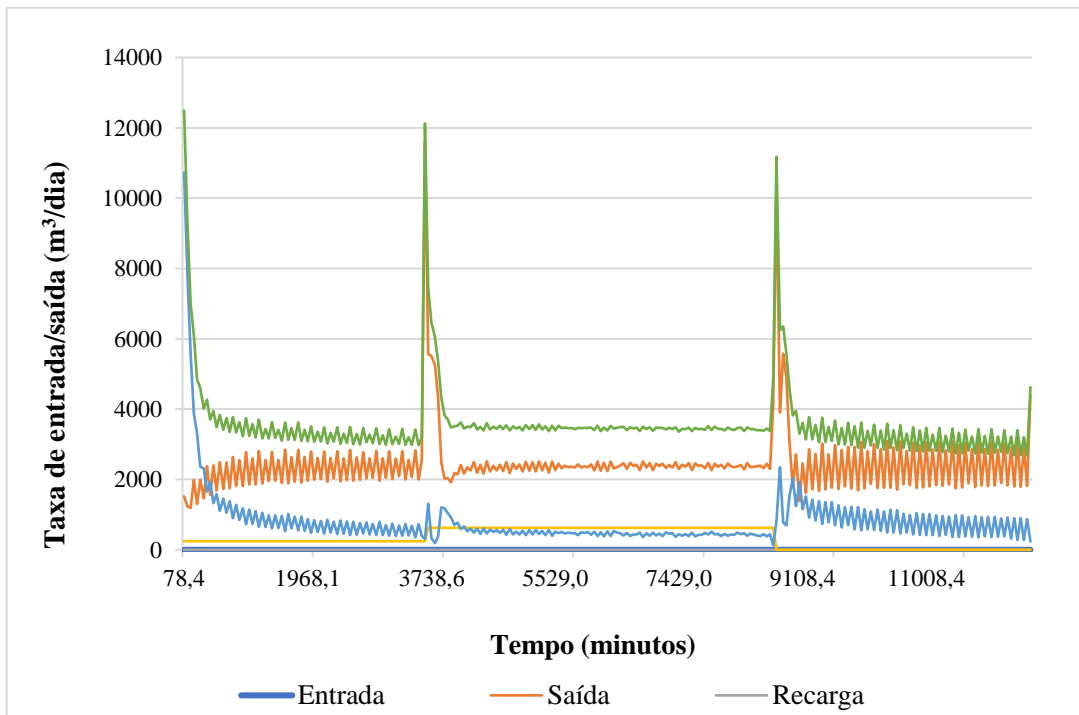
Figura 28. Balanço hídrico do modelo ao fim do teste de bombeamento.



Fonte – Elaborado pela própria autora com base nos dados fornecidos pelo *software* FEFLOW.

A Fig. 29 apresenta a variação dos fluxos de entrada e saída do aquífero e extração por poços de bombeamento ao longo do teste de bombeamento.

Figura 29. Variação dos fluxos de entrada e saída do modelo ao longo do ensaio.

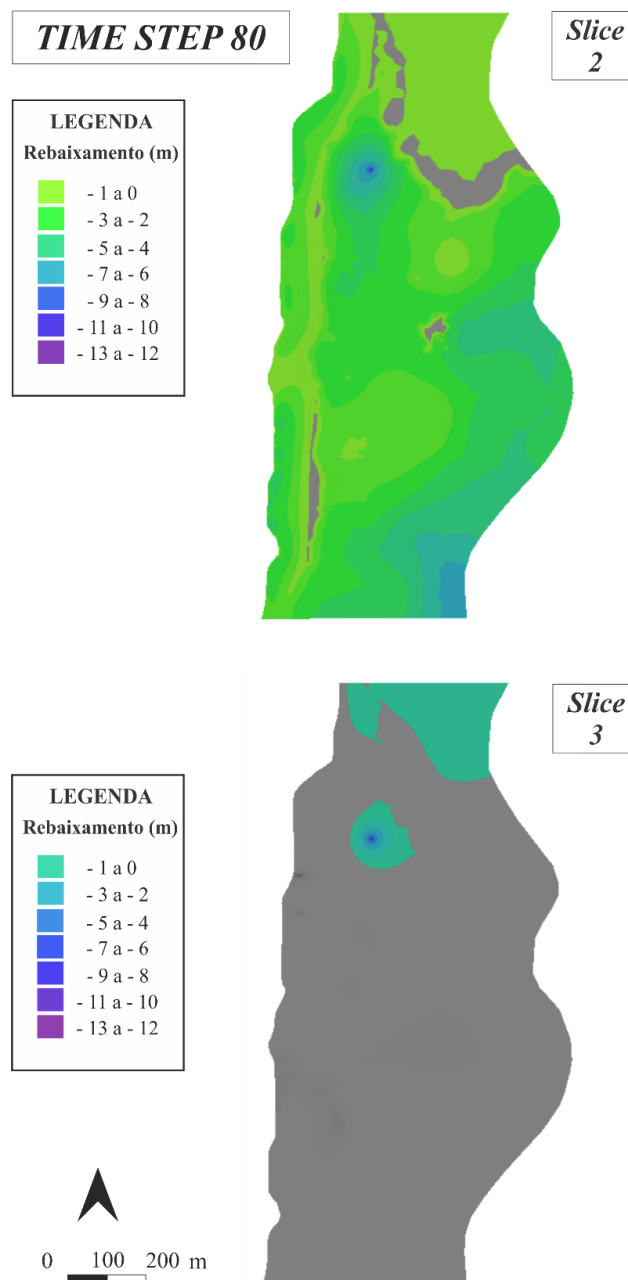


Fonte – Elaborado pela própria autora com base nos dados fornecidos pelo *software* FEFLOW.

5.7 Rebaixamento

O poço bombeado PP-02 atingiu o mais próximo de estabilização após aproximadamente 2.000 minutos do início ensaio e permaneceu até o início do bombeamento do PP-03, aos 3.727 minutos. Ao analisar o rebaixamento das *slices* 2 - localizada 3 metros abaixo da topografia e próxima ao topo da camada saprolítica – e 3 - contato desta última com zona de transição - nota-se o cone de rebaixamento associado ao PP-02 aos 3.718,1 minutos, pouco tempo antes do início do bombeamento do PP-03 (Figura 30).

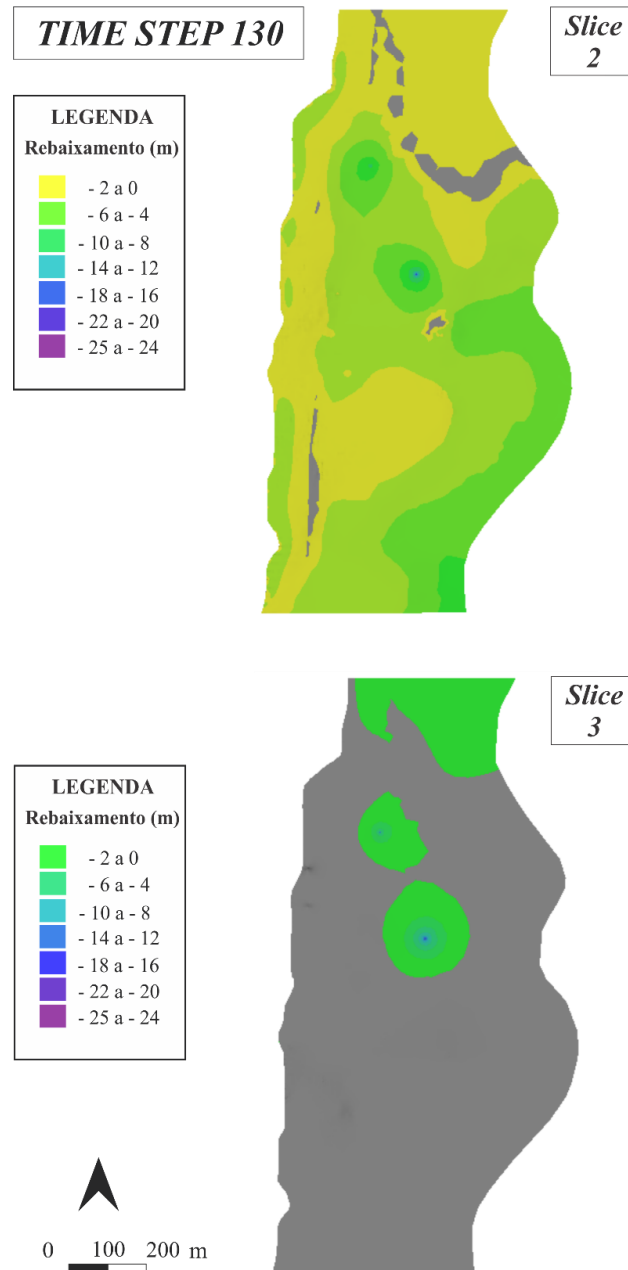
Figura 30. Mapa de isovalores de rebaixamento das *slices* 2 e 3 após 3718,1 minutos, equivalente ao 80º *time step* da simulação.



Fonte – Elaborado pela própria autora por meio do *software* FEFLOW.

Com o início do bombeamento do PP-03 surge um cone de rebaixamento associado a ele tanto na *slice* 2 quanto na 3 (Figura 31), que pode ser notado aos 5.979 minutos, quando o PP-03 está praticamente estabilizado e antes do desligamento das bombas aos 8.870 minutos.

Figura 31. Mapa de isovalores de rebaixamento das *slices* 2 e 3 após 5.979 minutos, equivalente ao 130^o *time step* da simulação.

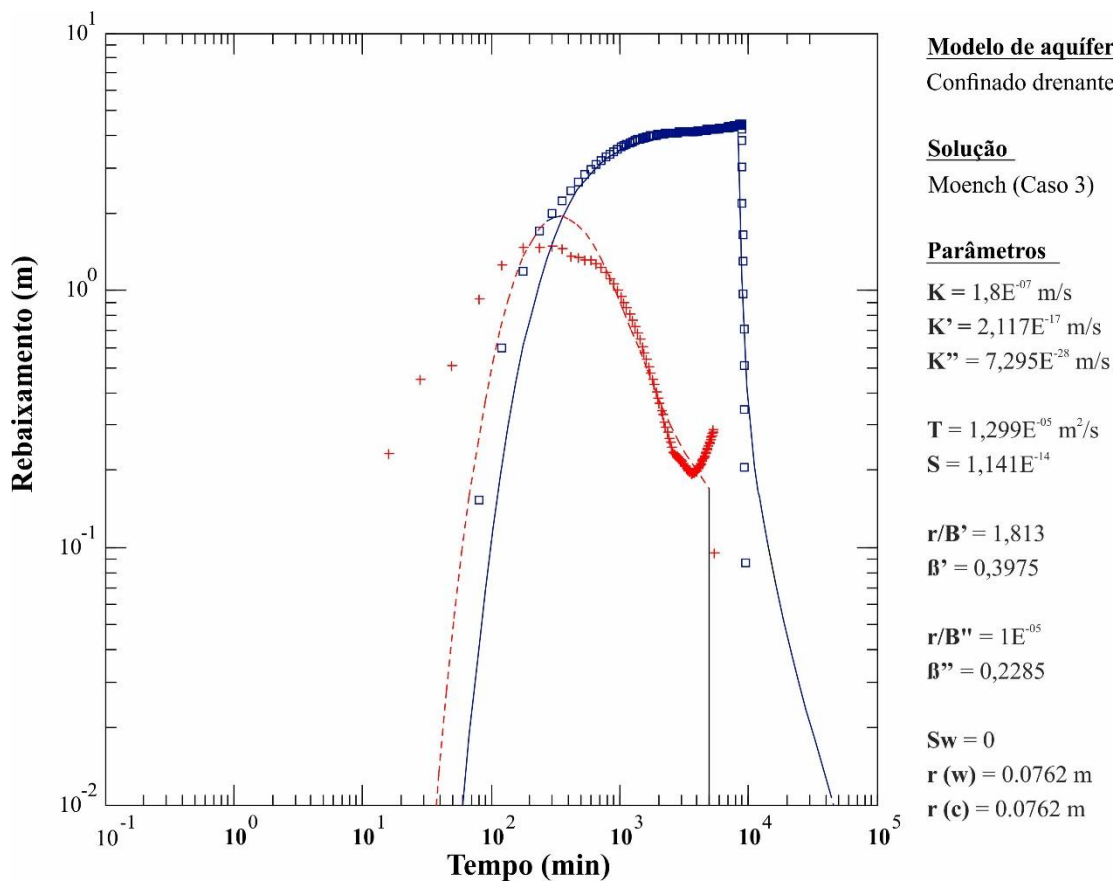


Fonte – Elaborado pela própria autora por meio do *software* FEFLOW.

5.8 Análise da curva diagnóstica dos dados simulados

Os dados de rebaixamento do teste de bombeamento simulado do poço PMN-05 possibilitaram a elaboração e interpretação da curva diagnóstica (Figura 32), permitindo comparação com os dados obtidos da análise dos dados observados.

Figura 32. Curva diagnóstica construída a partir dos dados de rebaixamento simulados do PMN-05 (pontos) e modelo analítico ajustado (linhas). Os parâmetros estimados são: K – Condutividade hidráulica do aquífero, K' – Condutividade hidráulica do aquítarde superior, K'' – Condutividade do aquítarde inferior, T – Transmissividade, S – Armazenamento, r/B' e b' – parâmetros de drenança do aquítarde superior, r/B'' e b'' – parâmetros de drenança do aquítarde inferior, Sw – fator de efeito de poço, $r(w)$ - raio do poço e $r(c)$ - raio da perfuração.



Fonte – Elaborado pela própria autora.

Os valores de condutividade hidráulica estimados pelo *software* AQT SOLVE estão sujeitos à um grande erro associado às suposições feitas na descrição matemática do modelo conceitual proposto, como foi descrito no subcapítulo 5.2 deste trabalho, que aborda a análise da curva diagnóstica dos dados de rebaixamento observado do mesmo poço, PMN-05. Deste modo, é desconsiderado para efeito de comparação os parâmetros hidrodinâmicos estimados e apenas considerado a comparação entre os modelos analíticos que se adequaram à curva.

Assim com a análise da curva observada, o modelo analítico que mais se ajustou adequadamente foi o caso 3 de Moench (1985), definido como aquífero confinado drenante. Nota-se, portanto, que o modelo analítico resultante dos dados observados e simulados são iguais.

6 CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos pela interpretação dos dados de teste de bombeamento observado e simulado, pode-se afirmar que o modelo conceitual que considera a existência de uma zona de transição, camada altamente fraturada e de alta permeabilidade, pode ser uma opção na modelagem de aquífero fraturado associado às rochas gnáissico-migmatíticas do Complexo Amparo. Por outro lado, este resultado não descarta a aplicação de outros modelos conceituais, como o de geração de fraturas por tectonismo e descompressão.

A filmagem ótica aponta para uma camada com alto índice de fraturas significativas no quesito hidrogeológico entre os 20 e 80 metros de profundidade, sendo este trecho a zona de transição. Ademais, dados de rebaixamento do teste de vazão constante com bombeamento de poços, cuja seção filtrante localiza-se neste estrato altamente fraturado, apontam para uma maior influência sobre os da mesma camada, do que a superior, correspondente ao saprólito.

Por meio da análise da curva diagnóstica dos dados do ensaio, foi possível definir o modelo analítico ajustado, determinado como confinado drenante com fluxo radial infinito, caso 3 de Moench (1985). Este resultado, somado aos valores de condutividade hidráulica médios das camadas, indicam que a zona de transição atua como um aquífero confinado e o saprólito como estrato confinante.

Este conjunto de dados possibilitou elaborar um modelo hidrogeológico utilizando o *software* FEFLOW. Com isso, foi possível simular o ensaio de vazão constante, que apresentou semelhanças tanto nos rebaixamentos como, também, na análise da curva diagnóstica do poço de monitoramento PMN-05, que também resultou em aquífero confinado drenante.

Apesar de apresentar a camada altamente fraturada, que seria a zona de transição, o fato de atuar como aquífero confinado drenante contrasta com o modelo conceitual proposto por Lachassagne *et al.* (2011) de geração de fraturas por intemperismo. Deste modo, recomenda-se a investigação detalhada desta comportamento e suas implicações e associações com os modelos conceituais existentes. Ressaltando que aquíferos confinados drenantes em rochas graníticas e gnáissico-migmatíticas já foram descritos em bibliografias internacionais.

Além disso, recomendam-se novos estudos voltados para a aplicação do modelo conceitual de geração de fraturas por intemperismo e presença de zona de transição em outras áreas com as mesmas características, com foco no transporte de massa. Deste modo, visto a viabilidade deste método, aplicá-lo não só no gerenciamento das águas, como também nos processos de remediação, levando em consideração que os órgãos ambientais passam a exigir modelagens hidrogeológicas com mais frequência.

REFERÊNCIAS

- AB'SÁBER, Aziz Nacib. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. Ateliê Editorial, 2003.
- ACWORTH, R. I. **The development of crystalline basement aquifers in a tropical environment**. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, v. 20, n. 4, p. 265-272, 1987.
- ANDERSON, Mary P.; WOESSNER, William W.; HUNT, Randall J. **Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport**. Academic press, 2015.
- BASEI, Miguel Angelo Stipp *et al.* **Geologia da folha de Amparo 1: 50.000**. 1986.
- BISTRICHI, Carlos Alberto. **Análise estratigráfica e geomorfológica do Cenozóico da região de Atibaia-Bragança Paulista, Estado de São Paulo**. 2001. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista.
- BONFIM, Luiz Fernando Costa. **Mapa de domínios/subdomínios hidrogeológicos do Brasil em ambiente SIG: concepção e metodologia**. 2010.
- BONNET, Eric *et al.* **Scaling of fracture systems in geological media. Reviews of geophysics**, v. 39, n. 3, p. 347-383, 2001.
- BOURDET, Dominique *et al.* A new set of type curves simplifies well test analysis. **World oil**, v. 196, n. 6, p. 95-106, 1983.
- BOURDET, Dominique *et al.* Use of pressure derivative in well test interpretation. **SPE Formation Evaluation**, v. 4, n. 02, p. 293-302, 1989.
- ANA, Agência Nacional de Água. **Atlas Brasil – Abastecimento Urbano de Água**, v. 1, 2010.
- CABRAL, J. J. S. P.; DEMETRIO, J. G. A. Aplicação de modelos em Hidrogeologia. **Hidrogeologia: Conceitos e aplicações**, Fortaleza CPRM, LABHID-UFPE, p. 367-389, 1997.
- CAMPOS NETO, M. da C.; PERROTA, M. M.; PELOGGIA, A. U. G. **A porção ocidental da Faixa Alto Rio Grande (SP-MG)**. SBG, Congr. Bras. Geol, v. 36, p. 2615-2630, 1990.
- CAVALCANTE, I. N.; SANTIAGO, M. M. F.; REBOUÇAS, Aldo C. **Características hidroquímicas dos aquíferos-manto de intemperismo e fraturado, Atibaia, SP**. Resumos, 1991.
- CHILTON, P. J.; SMITH-CARINGTON, A. K. **Characteristics of the weathered basement aquifer in Malawi in relation to rural water supplies**. IAHS Press, 1984.
- CHOW, Ven Ten. On the determination of transmissibility and storage coefficients from pumping test data. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 33, n. 3, p. 397-404, 1952.
- DE ALMEIDA, F. F. M. *et al.* The Precambrian evolution of the South American cratonic margin south of the Amazon River. In: **The South Atlantic**. Springer, Boston, MA, 1973. p. 411-446.
- DE ALMEIDA, Fernando Flávio Marques; HASUI, Yociteru. **O Pré-Cambriano do Brasil**. Editora Edgard Blücher, 1984.

DEWANDEL, Benoît *et al.* A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. **Journal of hydrology**, v. 330, n. 1-2, p. 260-284, 2006.

DIERSCH, H. J. G. **FEFLOW: Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media**. 2014.

DINIZ, João Alberto Oliveira *et al.* **Mapa hidrogeológico do Brasil ao milionésimo: nota técnica**. CPRM, 2014.

DOMENICO, P. A.; MIFFLIN, M. D. Water from low-permeability sediments and land subsidence. **Water Resources Research**, v. 1, n. 4, p. 563-576, 1965.

DUFFIELD, Glenn M. AQTESOLV for Windows Version 4.5 User's Guide, HydroSOLVE. Inc., Reston, VA, 2007.

EBERT, Heinz. **Ocorrências de fácies granulíticas no sul de Minas Gerais e em áreas adjacentes em dependência da estrutura orogênica: hipóteses sobre sua origem**. An. Acad. Bras. Ciênc, v. 40, p. 215-229, 1968.

EMBRAPA. **Clima**. Disponível em: <https://www.cnpf.embrapa.br/pesquisa/efb/clima.htm>. Acesso em: 18.03.2020.

FEITOSA, Fernando A. Carneiro *et al.* **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. CPRM, 2008.

FETTER, C. W., 2001, **Applied Hydrogeology**.

GEOCLOCK. **Diagnóstico ambiental complementar**. SP/P3403/R085/2005. 2005.

GEOCLOCK. **Diagnóstico ambiental no entorno da área da Magneti Marelli e conceitos de remediação**. SP/P4099/R0241/2007. 2007a.

GEOCLOCK. **Investigação ambiental complementar e monitoramento hidroquímico**. SP/P4464/R0427/2007. 2007b.

GEOCLOCK. **Investigação ambiental complementar, recalibração do modelo matemático e revisão da avaliação de risco à saúde humana**. SP/P5201/R0538/2010. 2010.

HAMMOND, Patrick A. Reliable yields of public water-supply wells in the fractured-rock aquifers of central Maryland, USA. **Hydrogeology journal**, v. 26, n. 1, p. 333-349, 2018.

HASUI, Y. & OLIVEIRA, M. A. F. 1984. A Província Mantiqueira: Setor Central. *In*: Almeida & Hasui (edit.) 1984, **O Pré-Cambriano do Brasil**, Edgard Blucher, 344 p.

HASUI, Yociteru. **A grande colisão pré-cambriana do sudeste brasileiro e a estruturação regional**. Geociências, p. 141-169, 2010.

HEILBRON, Monica *et al.* Província Mantiqueira. **Mantesso-Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, CDR**, p. 203-234, 2004.

IBGE - EMBRAPA - **Mapa de Solos do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, 2001 - Escala 1:5.000.000**.

IBGE. **Folha Topográfica de Amparo (SF-23-Y-A-VI-1)**. Rio de Janeiro, 1983. Escala: 1:50.000.

IBGE. **Mapa de Clima do Brasil**. 2002.

KRUSEMAN, Gideon P.; DE RIDDER, Nicolaas Arie; VERWEIJ, Johanna Maria. **Analysis and evaluation of pumping test data**. The Netherlands: International institute for land reclamation and improvement, 1970.

LACHASSAGNE, Patrick; WYNS, Robert; DEWANDEL, Benoît. **The fracture permeability of hard rock aquifers is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes**. Terra Nova, v. 23, n. 3, p. 145-161, 2011.

LEI, Qinghua; LATHAM, John-Paul; TSANG, Chin-Fu. **The use of discrete fracture networks for modelling coupled geomechanical and hydrological behaviour of fractured rocks**. Computers and Geotechnics, v. 85, p. 151-176, 2017.

LEPSCH, Igo F. **Formação e conservação dos solos**. Oficina de textos, 2016.

MOENCH, Allen F. Transient flow to a large-diameter well in an aquifer with storative semiconfining layers. **Water Resources Research**, v. 21, n. 8, p. 1121-1131, 1985.

MORAIS, S. M. **Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil: Integração Geológica da Folha Campinas**. 1999.

NEVES, M. A.; MORALES, N. 2007. **Well productivity controlling factors in crystalline terrains of southeastern Brazil**. Hydrogeology Journal, 15(3): 471-482.

PEDE, Marco Aurélio Zequim. **Caracterização da condutividade hidráulica do embasamento cristalino alterado saturado na região metropolitana de São Paulo**. 2004.

QGIS DEVELOPMENT TEAM *et al.* QGIS geographic information system. **Open source geospatial foundation project**, 2016.

RENARD, Philippe; GLENZ, Damian; MEJIAS, Miguel. Understanding diagnostic plots for well-test interpretation. **Hydrogeology Journal**, v. 17, n. 3, p. 589-600, 2009.

ROSS, Jurandy Luciano Sanches; MOROZ, Isabel Cristina. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo: escala 1: 500.000**. 1997.

SÃO PAULO (Estado). **Decreto nº. 59.263, de 5 de junho de 2013**. Dispõe sobre diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento de áreas contaminadas. São Paulo, SP, 2013. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/2013/decreto-59263-05.06.2013.html>. Acesso em: 09.07.2020.

SIAGAS. Poço 3500048120. Disponível em: <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/detalhe.php?ponto=3500048120>. Acesso em 24/08/2020a.

SIAGAS. Poço 3500048123. Disponível em: <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/detalhe.php?ponto=3500048123>. Acesso em 24/08/2020b.

SPITZ, Karlheinz; MORENO, Joanna. **A practical guide to groundwater and solute transport modeling**. John Wiley and sons, 1996.

TAYLOR, Richard; HOWARD, Ken. **A tectono-geomorphic model of the hydrogeology of deeply weathered crystalline rock: evidence from Uganda**. Hydrogeology Journal, v. 8, n. 3, p. 279-294, 2000.

TORRES, Fillipe Tamiozzo Pereira; MARQUES NETO, Roberto; MENEZES, Sebastião de Oliveira. **Introdução à geomorfologia**. São Paulo: Cengage Learning, 2012.

UNIÃO NACIONAL DE BIOENERGIA. **Monitoramento climatológico: Início da Estação 26/05/2008 até 17/03/2020 – Município: Amparo - SP.** Disponível em: https://www.udop.com.br/download/estatistica/economia_chuvas/2008a2020_historico_chuva_amparo.pdf. Acesso em: 09.07.2020.

WANG, Herbert. F.; ANDERSON, Mary P. **Introduction to groundwater modeling: finite difference and finite element methods.** Freeman, 1982.

WEATHER SPARK. **Condições meteorológicas médias de Amparo – Brasil.** Disponível em: <https://pt.weatherspark.com/y/30333/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Amparo-Brasil-durante-o-ano>. Acesso em: 09.07.2020.

WERNICK, E. **A geologia da região de Amparo (Leste do Estado de São Paulo).** Rio Claro: FFCL, 1967.

WERNICK, E. *et al.* **Geochronological studies by Rb/Sr method in rocks of the Jundiá block and surroundings.** Revista Brasileira de Geociências, v. 6, n. 2, p. 125-135, 1976.

WRIGHT, Ernest Peter. **The hydrogeology of crystalline basement aquifers in Africa.** Geological Society, London, Special Publications, v. 66, n. 1, p. 1-27, 1992.

ANEXO A – VALORES DE CARGA HIDRÁULICA (05/12/2004)

Tabela A. Carga hidráulica dos poços de bombeamento e observação do teste de bombeamento no dia 05/12/2004.

POÇO	CARGA HIDRÁULICA (m)
PP-01	671,98
PP-02	665,75
PP-03	678,26
PM-11	684,12
PM-13	674,72
PM-16	678,07
PM-23	684,64
PM-24	677,00
PM-25	666,64
PM-26	670,47
PM-29	672,31
PM-30	671,68
PM-31	674,11
PM-32	666,75
PM-33	676,65
PM-34	667,98
PM-35	673,20
PM-36	674,39
PM-37	672,38
PMN-03	674,72
PMN-04	681,88
PMN-05	665,75
PMN-06	678,26
PMN-07	671,98
PMN-08	671,44

Fonte – Elaborada pela própria autora com base nos dados da GEOCLOCK (2005).

ANEXO B – VALORES DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Condutividade hidráulica dos poços para cálculo da média geométrica e respectivos métodos de ensaio

Tabela B. Condutividade hidráulica dos poços no Saprólito.

SAPRÓLITO					
POÇO	MÉTODO	K (m/s)	POÇO	MÉTODO	K (m/s)
PM-10	Teste de <i>Slug</i>	3,10E ⁻⁰⁷	PM-39	Teste de <i>Slug</i>	1,89E ⁻⁰⁷
PM-11	Teste de <i>Slug</i>	1,15E ⁻⁰⁷	PM-40	Teste de <i>Slug</i>	7,24E ⁻⁰⁸
PM-12	Teste de <i>Slug</i>	5,94E ⁻⁰⁷	PM-41	Teste de <i>Slug</i>	1,50E ⁻⁰⁷
PM-13	Teste de <i>Slug</i>	2,16E ⁻⁰⁷	PM-42	Teste de <i>Slug</i>	3,83E ⁻⁰⁶
PM-14	Teste de <i>Slug</i>	4,95E ⁻⁰⁷	PM-43	Teste de <i>Slug</i>	2,03E ⁻⁰⁶
PM-15	Teste de <i>Slug</i>	6,89E ⁻⁰⁷	PM-44	Teste de <i>Slug</i>	9,82E ⁻⁰⁸
PM-17	Teste de <i>Slug</i>	4,78E ⁻⁰⁷	PM-45	Teste de <i>Slug</i>	3,77E ⁻⁰⁷
PM-18	Teste de <i>Slug</i>	8,65E ⁻⁰⁷	PM-46	Teste de <i>Slug</i>	1,60E ⁻⁰⁷
PM-23	Teste de <i>Slug</i>	1,15E ⁻⁰⁷	PM-47	Teste de <i>Slug</i>	5,99E ⁻⁰⁸
PM-24	Teste de <i>Slug</i>	4,37E ⁻⁰⁸	PM-48	Teste de <i>Slug</i>	8,90E ⁻⁰⁸
PM-26	Teste de <i>Slug</i>	2,60E ⁻⁰⁷	PM-49	Teste de <i>Slug</i>	4,54E ⁻⁰⁷
PM-27	Teste de <i>Slug</i>	1,69E ⁻⁰⁷	PM-50	Teste de <i>Slug</i>	1,74E ⁻⁰⁶
PM-28	Teste de <i>Slug</i>	1,71E ⁻⁰⁷	PM-51	Teste de <i>Slug</i>	3,38E ⁻⁰⁸
PM-29	Teste de <i>Slug</i>	3,07E ⁻⁰⁷	PM-52	Teste de <i>Slug</i>	1,53E ⁻⁰⁶
PM-30	Teste de <i>Slug</i>	5,10E ⁻⁰⁷	PM-53	Teste de <i>Slug</i>	5,34E ⁻⁰⁶
PM-32	Teste de <i>Slug</i>	5,00E ⁻⁰⁶	PM-54	Vazão Constante	7,31E ⁻⁰⁶
PM-33	Teste de <i>Slug</i>	1,46E ⁻⁰⁶	PM-55	Teste de <i>Slug</i>	1,61E ⁻⁰⁶
PM-34	Teste de <i>Slug</i>	1,32E ⁻⁰⁶	PM-56	Teste de <i>Slug</i>	5,10E ⁻⁰⁸
PM-35	Teste de <i>Slug</i>	4,10E ⁻⁰⁷	PM-57	Teste de <i>Slug</i>	4,55E ⁻⁰⁷
PM-36	Teste de <i>Slug</i>	9,90E ⁻⁰⁷	PM-58	Teste de <i>Slug</i>	4,70E ⁻⁰⁷
PM-37	Teste de <i>Slug</i>	8,50E ⁻⁰⁷	PM-59	Teste de <i>Slug</i>	2,31E ⁻⁰⁷
PM-38	Teste de <i>Slug</i>	1,06E ⁻⁰⁶	PM-60	Teste de <i>Slug</i>	3,56E ⁻⁰⁶

Fonte – Elaborada pela própria autora com base nos dados da GEOCLOCK (2007).

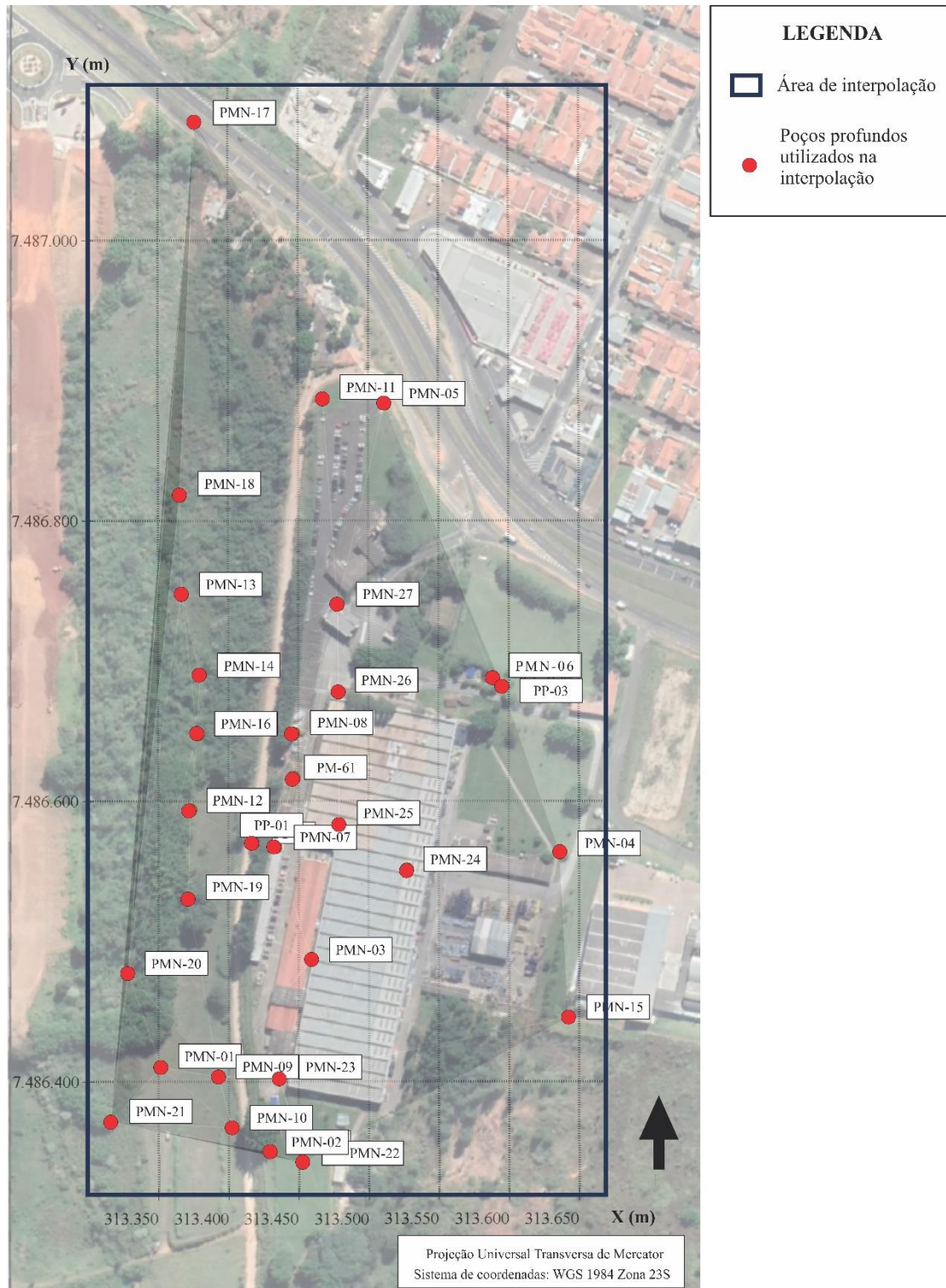
Tabela C. Condutividade hidráulica dos poços na Zona de transição.

ZONA DE TRANSIÇÃO		
POÇO	MÉTODO	K (m/s)
PMN-11	Teste de <i>Slug</i>	2,25E ⁻⁰⁶
PMN-12	Vazão Constante	1,92E ⁻⁰⁶
PMN-13	Vazão Constante	1,47E ⁻⁰⁵
PMN-14	Vazão Constante	6,58E ⁻⁰⁷
PMN-15	Vazão Constante	4,24E ⁻⁰⁷
PMN-16	Vazão Constante	3,71E ⁻⁰⁶
PMN-17	Vazão Constante	4,18E ⁻⁰⁶
PMN-18	Teste de <i>Slug</i>	7,18E ⁻⁰⁶
PMN-19	Teste de <i>Slug</i>	1,26E ⁻⁰⁶
PMN-20	Teste de <i>Slug</i>	8,33E ⁻⁰⁶
PMN-21	Teste de <i>Slug</i>	1,19E ⁻⁰⁵
PMN-22	Vazão Constante	1,44E ⁻⁰⁵
PMN-23	Teste de <i>Slug</i>	5,19E ⁻⁰⁶
PMN-24	Teste de <i>Slug</i>	1,80E ⁻⁰⁶
PMN-25	Vazão Constante	3,39E ⁻⁰⁶
PMN-26	Vazão Constante	5,37E ⁻⁰⁶
PMN-27	Teste de <i>Slug</i>	2,78E ⁻⁰⁶
PM-61	Vazão Constante	2,57E ⁻⁰⁵

Fonte – Elaborada pela própria autora com base nos dados da GEOCLOCK (2007).

ANEXO C – LOCALIZAÇÃO DOS POÇOS COM PERFIS CONSTRUTIVOS

Localização dos poços os quais dados foram utilizados na determinação do contato entre saprólito e zona de transição por meio da interpolação pelo método da krigagem no *software* Earth Volumetric Studio.



Fonte – Elaborada pela própria autora.

ANEXO D – PROFUNDIDADE DA SEÇÃO FILTRANTE EM RELAÇÃO À TOPOGRAFIA

POÇO	COTA TOPOGRÁFICA (m)	PROFUNDIDADE DA SEÇÃO FILTRANTE (m)
PMN-01	672,8	24,0
PMN-02	682,2	19,0
PMN-03	682,7	21,9
PMN-04	687,3	40,1
PMN-05	675,5	32,8
PMN-06	683,6	35,2
PMN-07	684,3	25,0
PMN-08	683,2	25,1
PMN-09	677,0	20,0
PMN-10	679,5	20,2
PMN-11	673,9	24,0
PMN-12	672,1	12,0
PMN-13	666,5	16,3
PMN-14	669,3	18,4
PMN-15	690,8	33,5
PMN-16	670,5	13,2
PMN-17	662,2	12,9
PMN-18	665,0	26,5
PMN-19	675,2	22,0
PMN-20	671,1	11,0
PMN-21	670,3	18,5
PMN-22	684,1	16,1
PMN-23	681,5	18,7
PMN-24	685,0	33,8
PMN-25	685,0	31,0
PMN-26	684,4	21,0
PMN-27	680,0	28,0
PP-01	682,0	23,5
PP-03	683,8	36,0

GEOCLOCK. Diagnóstico ambiental complementar. SP/P3403/R085/2005. 2005.

GEOCLOCK. Diagnóstico ambiental no entorno da área da Magneti Marelli e conceitos de remediação. SP/P4099/R0241/2007. 2007.

GEOCLOCK. Investigação ambiental complementar e monitoramento hidroquímico. SP/P4464/R0427/2007. 2007.

GEOCLOCK. Investigação ambiental complementar, recalibração do modelo matemático e revisão da avaliação de risco à saúde humana. SP/P5201/R0538/2010. 2010.

ANEXO E – PROFUNDIDADES DAS PRINCIPAIS FRATURAS DETERMINADAS PELAS ANÁLISES DAS FILMAGENS ÓTICAS

PP-01	PP-02	PP-03
Cota topográfica: 682 m	Cota topográfica: 674 m	Cota topográfica: 684 m
Profundidade das fraturas	Profundidade das fraturas	Profundidade das fraturas
25,56 m	29,78 m	41,28 m
27,90 m	31,18 m	44,26 m
29,34 m	33,98 m	50,16 m
32,29 m	34,78 m	50,93 m
32,74 m	36,68 m	61,63 m
33,66 m	39,97 m	65,90 m
37,55 m	42,78 m	75,09 m
44,71 m	66,07 m	
44,95 m	66,40 m	
52,47 m	80,47 m	
59,48 m	84,29 m	
63,11 m	87,64 m	
65,05 m	88,94 m	
75,06 m		
77,30 m		

ANEXO F - TIME STEPS DA SIMULAÇÃO

TIME STEP	MINUTOS
0	0,0
1	0,1
2	5,1
3	11,1
4	17,9
5	29,6
6	49,7
7	78,4
8	118,1
9	168,1
10	218,1
11	268,1
12	318,1
13	368,1
14	418,1
15	468,1
16	518,1
17	568,1
18	618,1
19	668,1
20	718,1
21	768,1
22	818,1
23	868,1
24	918,1
25	968,1
26	1018,1
27	1068,1
28	1118,1
29	1168,1
30	1218,1
31	1268,1
32	1318,1
33	1368,1
34	1418,1
35	1468,1
36	1518,1
37	1568,1
38	1618,1
39	1668,1

TIME STEP	MINUTOS
40	1718,1
41	1768,1
42	1818,1
43	1868,1
44	1918,1
45	1968,1
46	2018,1
47	2068,1
48	2118,1
49	2168,1
50	2218,1
51	2268,1
52	2318,1
53	2368,1
54	2418,1
55	2468,1
56	2518,1
57	2568,1
58	2618,1
59	2668,1
60	2718,1
61	2768,1
62	2818,1
63	2868,1
64	2918,1
65	2968,1
66	3018,1
67	3068,1
68	3118,1
69	3168,1
70	3218,1
71	3268,1
72	3318,1
73	3368,1
74	3418,1
75	3468,1
76	3518,1
77	3568,1
78	3618,1
79	3668,1

TIME STEP	MINUTOS
80	3718,1
81	3726,0
82	3731,0
83	3738,6
84	3748,5
85	3765,1
86	3794,9
87	3833,1
88	3879,0
89	3929,0
90	3979,0
91	4029,0
92	4079,0
93	4129,0
94	4179,0
95	4229,0
96	4279,0
97	4329,0
98	4379,0
99	4429,0
100	4479,0
101	4529,0
102	4579,0
103	4629,0
104	4679,0
105	4729,0
106	4779,0
107	4829,0
108	4879,0
109	4929,0
110	4979,0
111	5029,0
112	5079,0
113	5129,0
114	5179,0
115	5229,0
116	5279,0
117	5329,0
118	5379,0
119	5429,0

TIME STEP	MINUTOS
120	5479,0
121	5529,0
122	5579,0
123	5629,0
124	5679,0
125	5729,0
126	5779,0
127	5829,0
128	5879,0
129	5929,0
130	5979,0
131	6029,0
132	6079,0
133	6129,0
134	6179,0
135	6229,0
136	6279,0
137	6329,0
138	6379,0
139	6429,0
140	6479,0
141	6529,0
142	6579,0
143	6629,0
144	6679,0
145	6729,0
146	6779,0
147	6829,0
148	6879,0
149	6929,0
150	6979,0
151	7029,0
152	7079,0
153	7129,0
154	7179,0
155	7229,0
156	7279,0
157	7329,0
158	7379,0
159	7429,0

TIME STEP	MINUTOS
160	7479,0
161	7529,0
162	7579,0
163	7629,0
164	7679,0
165	7729,0
166	7779,0
167	7829,0
168	7879,0
169	7929,0
170	7979,0
171	8029,0
172	8079,0
173	8129,0
174	8179,0
175	8229,0
176	8279,0
177	8329,0
178	8379,0
179	8429,0
180	8479,0
181	8529,0
182	8579,0
183	8629,0
184	8679,0
185	8729,0
186	8779,0
187	8829,0
188	8870,0
189	8875,0
190	8887,0
191	8898,9
192	8910,9
193	8934,0
194	8969,0
195	9009,3
196	9058,4
197	9108,4
198	9158,4
199	9208,4
200	9258,4
201	9308,4
202	9358,4

TIME STEP	MINUTOS
203	9408,4
204	9458,4
205	9508,4
206	9558,4
207	9608,4
208	9658,4
209	9708,4
210	9758,4
211	9808,4
212	9858,4
213	9908,4
214	9958,4
215	10008,4
216	10058,4
217	10108,4
218	10158,4
219	10208,4
220	10258,4
221	10308,4
222	10358,4
223	10408,4
224	10458,4
225	10508,4
226	10558,4
227	10608,4
228	10658,4
229	10708,4
230	10758,4
231	10808,4
232	10858,4
233	10908,4
234	10958,4
235	11008,4
236	11058,4
237	11108,4
238	11158,4
239	11208,4
240	11258,4
241	11308,4
242	11358,4
243	11408,4
244	11458,4
245	11508,4

TIME STEP	MINUTOS
246	11558,4
247	11608,4
248	11658,4
249	11708,4
250	11758,4
251	11808,4
252	11858,4
253	11908,4
254	11958,4
255	12008,4
256	12058,4
257	12108,4
258	12158,4
259	12208,4
260	12258,4
261	12308,4
262	12358,4
263	12408,4
264	12458,4
265	12508,4
266	12558,4
267	12600,0