UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Aplicação do método Discrete Fracture Network para definição do modelo conceitual hidrogeológico do aquífero fraturado da região de Jurubatuba, São Paulo

DAPHNE SILVA PINO

Tese apresentada ao Programa Geociências -Recursos Minerais e Hidrogeologia para obtenção do título de Doutor em Ciências

Área de concentração: Hidrogeologia

Orientador: Prof. Dr. Reginaldo Antônio Bertolo Co-orientadora: Dra. Amélia João Fernandes

SÃO PAULO 2019 Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Serviço de Biblioteca e Documentação do IGc/USP Ficha catalográfica gerada automaticamente com dados fornecidos pelo(a) autor(a) via programa desenvolvido pela Seção Técnica de Informática do ICMC/USP

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de catalogação da publicação: Sonia Regina Yole Guerra - CRB-8/4208 | Anderson de Santana - CRB-8/6658

Pino, Daphne Silva

Aplicação do método Discrete Fracture Network para definição do modelo conceitual hidrogeológico do aquífero fraturado da região de Jurubatuba, São Paulo / Daphne Silva Pino; orientador Reginaldo Antônio Bertolo; coorientadora Amélia João Fernandes. -- São Paulo, 2019. 241 p.

Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia) -- Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2019.

1. aquífero fraturado. 2. fraturas. 3. hidráulica. 4. Jurubatuba. 5. DFN. I. Bertolo, Reginaldo Antônio, orient. II. Fernandes, Amélia João, coorient. III. Título.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Aplicação do método Discrete Fracture Network para definição do modelo conceitual hidrogeológico do aquífero fraturado da região de Jurubatuba, São Paulo

DAPHNE SILVA PINO

Orientador: Prof. Dr. Reginaldo Antonio Bertolo

Tese de Doutorado

Nº 610

COMISSÃO JULGADORA

Dr. Reginaldo Antonio Bertolo

Dr. Ingo Daniel Wahnfried

Dra. Mirna Aparecida Neves

Dr. José Luiz Albuquerque Filho

Dr. Rodrigo César de Araújo Cunha

Dr. Gerson Cardoso da Silva Júnior

SÃO PAULO 2019

Aos meus pais, Francisco e Marina.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer o apoio das instituições cujo suporte foi fundamental para a realização desta pesquisa, através de financiamentos e bolsas de estudos: FINEP (processo 1824/2010), FAPESP (processos 2013/10311-03 e 2015/02474-5), Ministério Público de São Paulo (TAC 25/09), CAPES (Bolsa Demanda Social), PDSE/CAPES (processo n. 88881.134986/2016-01), Programa de Aperfeiçoamento de Ensino (PAE) do IGc-USP. Por favor, continuem incentivando a ciência brasileira e jovens cientistas como eu.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Reginaldo Bertolo, por ter confiado em mim para a realização deste projeto. Por sempre ter a porta aberta para conversar, tirar dúvidas e tomar um cafezinho.

A minha co-orientadora, Dra. Amélia Fernandes, por ter embarcado em mais este projeto comigo. Pelas ótimas conversas sobre Estrutural, por estar sempre aberta a ouvir e aconselhar.

Aos professores Veridiana Martins, Ricardo Hirata, Alexandra Suhogusoff, Luiz Ferrari, por todos os papos geológicos ao longo dos anos deste trabalho. Aos amigos e colegas do CEPAS/USP, pelo companheirismo em campo e em laboratório, pelos papos científicos e pelos "papos furados" – em especial ao Paulo Lojkasek Lima e Silvia A. M. Ferreira, meus companheiros de projeto, e também a Paulo Lima, Elí Caçador, Rafael Salaroli, Gabriel Damasio, César Miyata, Rafael Terada, Paulo Galvão, Sasha Hart, Marcos Barbosa e Fabio Sartorio. Aos funcionários do Instituto de Geociências (IGc), sempre dispostos a ajudar para os preparativos de campo.

Aos membros do grupo G360, da University of Guelph, em especial à Prof^a. Dra. Beth Parker, Dr. Pat Quinn e Dr. Peeter Pehme. Aos colegas de campo e de escritório, Paulo Casado, Juliana Camilo, Marina Nunes, Ryan Kroeker e Rashmi Jadeha. Aos amigos Kortney Acton, Carla Wiese e Art Zantinge.

Aos estimados colegas da Engesolos, em especial Nilton Myashiro e Fernando Ferraz, por "vestirem a camisa" do projeto, pelas valiosas contribuições em campo e pela curiosidade científica que nos move. À Advanced Logic Technology (ALT), por facilitar nosso acesso ao *software* WellCAD. Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e ao Centro de Pesquisas em Meio Ambiente (Cepema), pela parceria nos trabalhos de investigação em campo. Aos diretores e funcionários dos locais em que realizamos atividades de campo, por nos permitirem acesso às propriedades e estarem sempre dispostos a ajudar.

Por fim, agradeço à minha família, pelo apoio incondicional durante esta aventura de realizar uma pesquisa de Doutorado. Aos meus pais, Francisco e Marina, que sempre me incentivaram a buscar meus sonhos e sempre foram meu porto seguro. A minha irmã, Ingrid, que sempre acreditou em mim e sempre esteve por perto, mesmo quando a distância era grande (e pelas conversas sobre DataViz). Às minhas avós (*in memoriam*) e tias, por todo o carinho. Obrigada família por me ajudarem a chegar até aqui.

"Eu estou entre os que acreditam que há grande beleza na ciência." – Marie Curie

Resumo

PINO, D. S. (2019). Aplicação do método Discrete Fracture Network para definição do modelo conceitual hidrogeológico do aquífero fraturado da região de Jurubatuba, São Paulo. Tese de Doutorado. São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 238p.

Este trabalho consistiu em uma investigação de detalhe em um aquífero cristalino fraturado, com manto inconsolidado sobreposto a rochas cristalinas sãs do Complexo Embu com o objetivo de conhecer o arcabouço estrutural e hidráulico para investigação de uma área contaminada por solventes organoclorados na região do Canal Jurubatuba, São Paulo. Destaca-se que pela primeira vez foi aplicado com sucesso o método Discrete Fracture Network (DFN) em uma região tropical, envolvendo minuciosa coleta de informações estruturais em testemunhos de sondagem e perfilagens geofísicas, além da instrumentação empregada para a medição de transmissividade e cargas hidráulicas. Foi perfurado um poço com cerca de 60m de profundidade, com recuperação contínua de testemunhos, cuja descrição foi feita em campo. Foram realizadas perfilagens geofísicas: calibre, gama natural, imageamentos acústico, óptico, de temperatura (tipo ALS, trazido pela primeira vez ao Brasil), além de ensaios hidráulicos com sistemas de obturadores de pressão. Uma membrana flexível de poliuretano foi instalada no furo aberto para evitar contaminação cruzada, sendo retirada apenas no momento da instalação do sistema de monitoramento multinível. Foi instalado um sistema tipo Westbay, com 15 zonas de monitoramento, o primeiro deste tipo a ser instalado no Brasil. Em outra perfuração, foi instalado um sistema tipo CMT, com 7 zonas de monitoramento. Adicionalmente, em três pocos preexistentes foram coletados dados estruturais em perfilagens acústica e de calibre, além de ensaios hidráulicos. Afloramentos próximos à sondagem realizada foram estudados para uma melhor compreensão das estruturas da área. Observou-se que materiais geológicos anteriormente considerados em contato abrupto na verdade apresentam contatos graduais, com importante alternância de materiais de distintas competências e porosidades duplas. Além disso, constatou-se a ocorrência de fluxo predominantemente descendente entre as camadas, e a perfilagem de temperatura e ensaios com obturadores indicaram continuidade de características hidráulicas entre diferentes materiais. A importância do fluxo descendente é suplantada pelo fluxo horizontal no intervalo de 9.5 a 14.6m, conforme sugerido pelas assinaturas isotópicas de oxigênio e deutério fortemente empobrecidas. Os trechos com transmissividade mais elevada estão relacionados ao gnaisse fino com as famílias de fraturas A (sub-horizontal) e B (N064/27, mergulho para SE), ou à intercalação de gnaisse fino, pegmatito e gnaisse bandado e combinação das famílias A e B, indicando que o fluxo não é necessariamente função de uma única orientação de estruturas, mas que seu potencial pode ser aumentado diante da associação de mais de uma família de fraturas. Algumas das famílias de fraturas aqui identificadas foram ainda relacionadas a estruturas descritas em trabalhos regionais.

PALAVRAS-CHAVE: aquífero fraturado, fraturas, hidráulica, Jurubatuba, DFN

ABSTRACT

PINO, D. S. (2019). Application of the Discrete Fracture Network method to define the hydrogeological conceptual model of the fractured aquifer in the Jurubatuba region, Sao Paulo, Brazil. PhD Thesis. São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 239p.

This work consisted of a detailed investigation of a fractured crystalline aquifer, with an unconsolidated overburden with a crystalline bedrock from the Embu Complex. The objective was knowing the structural and hydraulic framework for investigating an area contaminated by organochlorine solvents in the Jurubatuba Channel region, in Sao Paulo, Brazil. It is noteworthy that for the first time the Discrete Fracture Network (DFN) method was successfully applied in a tropical region, with detailed data from rock core and geophysical profiling, in addition to the instrumentation used for the measurement of transmissivity and hydraulic loads. . A borehole about 60m deep was drilled, with continuous rock core recovery, described in the field. Geophysical profiling was performed: caliper, natural gamma, acoustic and optical televiewer, temperature (ALS type, brought to Brazil for the first time), as well as hydraulic tests with packer systems. A flexible polyurethane membrane was installed in the open borehole in order to prevent cross-contamination, being removed only for installing the multilevel monitoring system. A Westbay system with 15 monitoring zones was installed, the first of its kind to be installed in Brazil. In another drilling, a CMT type system with 7 monitoring zones was installed. Additionally, in three preexisting wells, structural data was collected in caliper and acoustic profiles, as well as in hydraulic tests. Outcrops near the boreholes were studied to better understand the fracture framework of the area. It was observed that geological materials previously considered in abrupt contact actually have gradual contacts, with important alternation of materials of different competences and double porosities. In addition, a predominantly downward flow between layers was found, and temperature profiling and packer tests indicated continuity of hydraulic characteristics between different materials. The importance of downward flow is supplanted by horizontal flow from 9.5 to 14.6m, as suggested by strongly depleted oxygen and deuterium isotopic signatures. The portions with higher transmissivities are related to fine gneiss with the fracture sets A (subhorizontal) and B (N064/27, dipping to SE), or the intercalation of fine gneiss, pegmatite and banded gneiss and combination of families A and B, indicating that the flow is not necessarily a function of a single fracture orientation, rather its potential can actually be increased by combining more than one fracture family. Finally, some of the fracture families identified here were also related to structures described in regional works.

KEYWORDS: fractured aquifer, fractures, hydraulics, Jurubatuba, DFN

SUMÁRIO

RESUMO	VII
ABSTRACT	VIII
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS	XVI
SIGLAS E ABREVIATURAS	XVII
1. INTRODUCÃO E JUSTIFICATIVA	1
2 ORIETIVOS	5
2. ODJETTVOS	
3. CONTEXTO GEOLOGICO E HIDROGEOLOGICO	/
3.1. CONTEXTO GEOLÓGICO	7
3.1.1. Embasamento cristalino	8
3.1.2. Bacia Sedimentar de São Paulo (BSP)	8
3.1.3. Solos residuais	9
3.1.4. Geologia estrutural e tectonica	12
3.2. CONTEXTO HIDROGEOLOGICO	14
4. ABORDAGENS DE ESTUDO DE AQUÍFEROS FRATURADOS	19
4.1. ANÁLISE DE AFLORAMENTOS E CARACTERIZAÇÃO DA REDE DE FRATURAS	19
4.2. HISTÓRIA TECTÔNICA E VARIAÇÕES NA ABERTURA DE FRATURAS	20
4.3. PERFILAGENS GEOFÍSICAS	23
4.4. SELAGEM DE FUROS COM MEMBRANA FLEXÍVEL	25
4.5. PERFILAGEM DE TEMPERATURA TIPO FONTE DE LINHA ATIVA (ALS)	26
4.6. Ensaios hidráulicos	
4.7. CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA RELATIVA	32
4.8. MONITORAMENTO DE CARGA HIDRÁULICA EM POÇOS MULTINÍVEIS	32
4.9. ISÓTOPOS AMBIENTAIS: OXIGÊNIO E DEUTÉRIO	33
4.10. MÉTODO DFN: INVESTIGAÇÃO DE CONTAMINAÇÃO DE AQUÍFEROS FRATURAD	OS POR
SOLVENTES CLORADOS	35
5. MATERIAIS E MÉTODOS	39
5.1. LEVANTAMENTO DE FRATURAS EM AFLORAMENTOS	40
5.2. Sondagens de investigação	40
5.3. DESCRIÇÃO DE TESTEMUNHOS DE SONDAGEM	45
5.4. PERFILAGENS GEOFÍSICAS	47
5.4.1. Calibre	
5.4.2. Gama natural	
5.4.3. Imageamento acústico (ATV) e óptico (OPTV)	
5.5. FLUTE BLANK LINER E PERFILAGEM DE TEMPERATURA (ALS)	52
5.6. PERFIL COM <i>HEATPULSE FLOWMETER</i>	55
5.7. ENSAIOS HIDRÁULICOS COM OBTURADORES	57
5.8. INSTALAÇÃO DO POÇO WESTBAY	65
5.9. MEDIÇÃO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA RELATIVA NO SOLO COM DPIL	68
5.10. INSTALAÇÃO DO POÇO CMT	71

5.11.	. MONITORAMENTO DE CARGAS HIDRÁULICAS	74
5.12.	. Análises isotópicas em água subterrânea	75
5.13.	. Poço tubular profundo	76
6. l	RESULTADOS E DISCUSSÃO	79
6.1.	Geologia da área de estudo	
6.2.	CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL	
	6.2.1. Estruturas de testemunhos	83
	6.2.2. Estruturas dos perfis ATV e OPTV	
	6.2.3. Estruturas de afloramentos	
	6.2.4. Famílias de fraturas identificadas em linhas de levantamento	
6.3.	CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA	103
	6.3.1. Zonas hidrogeológicas no perfil de temperatura	103
	6.3.2. Zonas de entrada e saída de água nos poços 1501, 1502 e 1503	106
	6.3.3. Condutividade hidráulica no aquífero raso	113
	6.3.4. Transmissividade do aquífero cristalino	118
	6.3.5. Design dos poços multiníveis	126
	6.3.6. Cargas e gradientes hidráulicos dos sistemas multiníveis	128
	6.3.7. Assinaturas de isótopos estáveis	132
6.4.	MODELO DE FLUXO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA	135
6.5.	RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS EM ROCHAS CRI	STALINAS
FRAT	URADAS	139
7. (CONCLUSÕES	145
8. 1	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	149
9. <i>A</i>	APÊNDICES	165
9.1.	APÊNDICE I: MODELOS DE FICHAS DE CAMPO	166
9.2.	APÊNDICE II: PROJETO DO POÇO WESTBAY	169
9.3.	APÊNDICE III: CORREÇÃO DE VIÉS DE ORIENTAÇÃO	173
9.4.	APÊNDICE IV: PERFIS GEOFÍSICOS DO MP-01 EM DETALHE	192
9.5.	APÊNDICE V: PERFIS GEOFÍSICOS DO 1501 EM DETALHE	199
9.6.	APÊNDICE VI: PERFIS GEOFÍSICOS DO 1502 EM DETALHE	206
9.7.	Apêndice VII: perfis geofísicos do 1503 em detalhe	219
9.8.	APÊNDICE VIII: GRADIENTES HIDRÁULICOS POR TRECHO	234

LISTA DE FIGURAS

Figura 20 - Visão geral das estações de tratamento dos testemunhos: (i) gazebo azul - estação
de descrição e coleta de amostras, (ii) primeiro gazebo branco (fechado por cortinas brancas) -
estúdio fotográfico, (iii) segundo gazebo branco (aberto, ao fundo) - triturador de amostras. 46
Figura 21 – Interior da segunda estação: estúdio fotográfico. Notem-se as cortinas brancas e o
refletor para homogeneizar a luz incidente e o suporte para a bandeja de testemunho
Figura 22 – Fotografia de testemunho de sondagem tirada na estação do estúdio fotográfico.
Figura 23 – Estação de descrição litológico-estrutural de testemunhos e coleta de amostras. 47
Figura 24 – Sonda de calibre típica, com o conjunto de três "braços" (a) aberto e (b) fechado.
Figura 25 – Sonda de gama natural (preta)
Figura 26 – Sonda OPTV. Notem-se as câmeras na base da sonda (à esquerda) 51
Figura 27 – Sonda ATV da RG 51
Figura 28 – Sonda ATV da MSI (frente, prateada) com sonda de gama natural acoplada (atrás,
preta)
Figura 29 – Cálculo da orientação de uma fratura a partir de sua identificação em perfil ATV
ou OPTV
Figura 30 - (a) Instalação do FLUTe blank liner. Sua descida é possibilitada pela pressão
exercida pela água inserida por dentro do liner (mangueira preta) e pela consequente saída de
água do furo pelas fraturas que o interceptam. (b) FLUTe instalado, preso no topo do
revestimento com abraçadeira
Figura 31 – Utilização do FLUTe Green Machine para a retirada do liner do MP-01 53
Figura 32 – (a) Sonda ALS com centralizador. (b) Detalhe dos quatro sensores da sonda ALS.
Figura 33 – Sonda <i>heatpulse flowmeter</i> (HPFM) da RG
Figura 34 - Sonda HPFM da MSI (a) com um dos sensores expostos, (b) com os diverters
instalados
Figura 35 – Laboratório móvel de campo em 01/02/2016 57
Figura 36 – Esquema dos equipamentos para a realização de ensaios hidráulicos: (a) dentro do
poço; (b) dentro do trailer; (c) para testes de slug e bail; (d) para ensaios de carga constante e
de bombeamento/injeção
Figura 37 – Alguns dos componentes de dentro do poço: (a, b) obturadores, tubo ranhurado
(intervalo de teste), (c) passa-cabos e (d) transdutores de pressão e temperatura

Figura 38 - Equipamentos de superfície para ensaios de slug e bail: (a) visão geral, e (b)
acoplados no poço temporário61
Figura 39 – Sequência dos ensaios nos testes com obturadores62
Figura 40 - Componentes do sistema Westbay: (a) porta de monitoramento (seta verde indica
a entrada de água); (b) porta de bombeamento (seta amarela), colar magnético (seta vermelha)
e porta de monitoramento (seta azul); (c) obturadores (tubos verdes) e tubos lisos (tubos
brancos)
Figura 41 – Montagem do sistema Westbay em superfície e instalação do poço: (a) descida do
conjunto no furo; (b) acoplamento de obturador; (c) ferramenta para teste de estanqueidade. 67
Figura 42 – Ensaios com DPIL. (a) Detalhe da ponteira e filtro (prateado) da ferramenta. (b)
Estação de trabalho e perfuratriz ao fundo69
Figura 43 – Esquema da ferramenta DPIL69
Figura 44 – Perfil esquemático do princípio do método DPIL70
Figura 45 – Preparo do tubo CMT para corte das seções filtrantes71
Figura 46 – Instalação do CMT: (a) furos-guia para instalação da porta de monitoramento; (b)
ferramenta de corte das portas do CMT; (c) realização de corte na altura da marcação, e (d)
instalação do plug após os cortes/aberturas laterais para instalação de porta. (e) Fechamento
inferior dos canais com <i>plugs</i> 73
Figura 47 - Preparação do CMT em superfície, com indicação de centralizadores (setas
amarelas) e portas de monitoramento (setas vermelhas): (a) porta de monitoramento de canal
periférico; (b) porta de monitoramento do canal central; (c) inserção do tubo CMT no furo de
sondagem73
Figura 48 - Equipamentos para monitoramento de cargas hidráulicas no Westbay: (a) sonda
MOSDAX de monitoramento e amostragem; (b) tripé para controlar a descida da sonda; (c)
MAGI – interface da sonda74
Figura 49 – Canisters de 250mL (abaixo) e conectores de teflon com anéis de vedação (acima).
Figura 50 – Perfis de materiais geológicos e informações geotécnicas dos furos MP-01 e MP-
01A80
Figura 51 – Distribuição no MP-01 de (a) material geológico por tipo de estruturas, (b) material
geológico por mergulho das estruturas, (c) material geológico por mergulho de fratura de
espessura maior (FMJ)

Figura 52 –Distribuição no MP-01 de material geológico por (a) mergulho da fratura de
espessura menor (FMN); (b) mergulho da fratura contínua (FC); (c) mergulho da fratura
descontínua (FD)
Figura 53 – Exemplos de oxidação em fraturas: (a) deposição de óxidos em fratura contínua
(FC), (b) deposição de óxidos e alteração de coloração em fratura de espessura maior (FMJ),
(c) "halo" de alteração na matriz no entorno de fratura contínua (FC), (d) microfraturas (MF)
oxidadas
Figura 54 - Distribuição do grau de oxidação (ox. maior, menor ou ausente) em função do
mergulho de estruturas, para (a) solo de alteração (SA), (b) rocha alterada mole (RAM), e (c)
rocha alterada dura (RAD)
Figura 55 - Distribuição do grau de oxidação (ox. maior, menor ou ausente) em função do
mergulho de estruturas em rocha sã, para (a) gnaisse bandado (BGn), (b) gnaisse fino (FGn), e
(c) pegmatito (Peg)
Figura 56 – Perfis geofísicos em furo aberto no MP-01 e estruturas interpretadas a partir deles
e de testemunhos
Figura 57 – Perfis geofísicos em poço aberto e estruturas interpretadas a partir deles nos poços
1501, 1502 e 1503
Figura 58 - Projeção polar e diagrama de densidade das estruturas identificadas nos perfis de
ATV e OPTV da perfuração MP-01, e nos perfis de ATV nos poços 1501, 1502, 1503.
Diagramas de área igual, hemisfério inferior
Figura 59 - Projeção polar das estruturas medidas nas scanlines em afloramentos de canteiro
de obras. Projeção de área igual, hemisfério inferior
Figura 60 - Projeções polares das estruturas medidas em scanlines (perfuração MP-01 e poço
1501), antes e depois da correção do viés de orientação, com indicação das principais famílias
de fraturas. Projeções de área igual, hemisfério inferior
Figura 61 – Projeções polares das estruturas medidas em scanlines (poços 1502 e 1503), antes
e depois da correção do viés de orientação, com indicação das principais famílias de fraturas.
Projeções de área igual, hemisfério inferior
Figura 62 - Projeções polares das estruturas medidas em scanlines (MK2 e MK6), antes e
depois da correção do viés de orientação, com indicação das principais famílias de fraturas.
Projeções de área igual, hemisfério inferior
Figura 63 – Projeções dos polos médios das famílias de fraturas com espaçamentos corrigidos
no furo MP-01, nos poços 1501, 1502, 1503, e nos afloramentos MK-2 e MK-6. Projeção de
área igual, hemisfério inferior

Figura 64 – Resultados da perfilagem ALS: zonas hidrogeológicas e potencial de fluxo (coluna
BH flow) das estruturas identificadas através de ATV e OPTV104
Figura 65 – Ensaios com HPFM sob fluxo natural e induzido no poço 1501108
Figura 66 – Ensaios com HPFM sob fluxo natural e induzido no poço 1502110
Figura 67 – Ensaios com HPFM sob fluxo natural e induzido no poço 1503112
Figura 68 – Curva de calibração de campo para cálculo da resistência do tubo do DPIL114
Figura 69 – Perfilagem vertical com DPIL, para obtenção da condutividade hidráulica
horizontal relativa Kr a diferentes vazões Q114
Figura 70 - Localização em planta dos poços convencionais com e sem informações de
condutividade hidráulica, e material geológico interceptado pelas seções filtrantes. A posição
do poço tubular profundo e dos multiníveis Westbay e CMT também é indicada116
Figura 71 – Perfis obtidos no furo MP-01: calibre, materiais geológicos, transmissividade média
por intervalo (m ² /s), estruturas em ATV+OPTV e em testemunhos de sondagem121
Figura 72 - Transmissividade média em profundidade no MP-01 (15 a 60m) e em poços
convencionais próximos (0 a 15m), em função do material litológico do trecho ensaiado123
Figura 73 - Perfis obtidos nos poços 1501, 1502 e 1503: calibre, materiais geológicos,
transmissividade média por intervalo (m ² /s), e estruturas em ATV124
Figura 74 – Abertura hidráulica média de fraturas no MP-01125
Figura 75 – Abertura hidráulica média de fraturas nos poços 1501 e 1503126
Figura 76 - Perfis construtivos dos poços CMT e Westbay (MP-01) e comparação com
litologia, estruturas e transmisividades calculadas127
Figura 77 – Gradientes verticais representativos nos poços multiníveis CMT e Westbay 130
Figura 78 – Razões de isótopos estáveis ($\delta^{18}O$, δD) das amostras dos poços Westbay e CMT,
coletadas em 2016 e 2017, classificadas por material geológico
Figura 79 – Detalhe das razões de isótopos estáveis ($\delta^{18}O, \delta D$) das amostras dos poços Westbay
e CMT, coletadas em 2016 e 2017, classificadas por material geológico134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Identificação das sondagens de investigação realizadas. 42
Tabela 2. Síntese das sondas utilizadas
Tabela 3. Perfilagens realizadas em cada furo ou poço. 48
Tabela 4. Ensaios com HPFM nos poços tubulares
Tabela 5. Ensaios com obturadores no furo MP-01 e em poços tubulares
Tabela 6. Materiais geológicos identificados nos poços tubulares 1501, 1502 e 1503 82
Tabela 7. Categorias de fraturas com base em seu traço. 83
Tabela 8. Total de estruturas levantadas através das diferentes abordagens
Tabela 9. Características das linhas de levantamento
Tabela 10. Famílias de fraturas identificadas em linhas de levantamento 101
Tabela 11. Comparação entre as famílias de fraturas com grupos de fraturas de estudo regional.
Tabela 12. Relação das zonas hidrogeológicas identificadas através do ALS com material
geológico e famílias de fraturas
Tabela 13. Vazões medidas pelo HPFM para ensaios sob fluxo natural e induzido no poço 1501.
Tabela 14. Vazões medidas pelo HPFM para ensaios sob fluxo natural e induzido no poço 1502.
Tabela 15. Vazões medidas pelo HPFM para ensaios sob fluxo natural e induzido no poço 1503.
Tabela 16. Famílias de fraturas e principais entradas e saídas de água nos poços 1501, 1502 e
1503
Tabela 17. Transmissividades médias (m ² /s) obtidas a partir de testes de slug em poços de
monitoramento convencionais
Tabela 18. Ensaios realizados com obturadores em cada intervalo do MP-01 119
Tabela 19. Ensaios realizados com obturadores em cada intervalo dos poços 1501, 1502 e 1503.
Tabela 20. Características construtivas do poço de monitoramento CMT 128
Tabela 21. Características construtivas do poço de monitoramento Westbay 128
Tabela 22. Resumo comparativo de parâmetros litológicos, estruturais e hidráulicos 136

SIGLAS E ABREVIATURAS

1.1: ponto e utilizado como separador de	1.1:	decii	mal
--	------	-------	-----

[,]: vírgula é utilizada como separador de milhar

ALS: Active line source, perfilagem de temperatura tipo linha de fonte ativa

ALT: Advanced Logic Technology

ATV: Acoustic televiewer, imageamento acústico

BAT: Bacia Hidrográfica do Alto Tietê

BGn: gnaisse bandado

BSP: Bacia Sedimentar de São Paulo

CAPES: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CBH-AT: Comitê de Bacias Hidrográficas - Alto Tietê

CEPAS: Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas do IGc-USP

CETESB: CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CMT: poço multinível tipo Continuous Multichannel Tubing®

CNPq: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

COVISA: Coordenação de Vigilância em Saúde

D: razão de isótopos de hidrogênio, δD

DAEE: Departamento de Águas e Energia Elétrica

DFN: método Discrete Fracture Network, conforme descrito por Parker (2007)

DPIL: Direct Push Injection Logging

FAPESP: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo

FC: fratura contínua

FD: fratura descontínua

FGn: gnaisse fino

FLUTe: Flexible Liner Underground TechnologiesTM

FMJ: fratura de espessura maior

FMN: fratura de espessura menor

Fo: foliação

GMWL: Global Meteoric Water Line, linha de água meteórica global

HPFM: heatpulse flowmeter

IAEA: International Atomic Energy Agency, Agência Internacional de Energia Atômica

IGc-USP: Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo LIA: Laboratório de Isótopos Ambientais LMWL: Local Meteoric Water Line, linha de água meteórica local MLS: Multi-level system, sistema de monitoramento multinível MPSP: Ministério Público de São Paulo **MSI:** Mount Sopris Instruments O: razão de isótopos de oxigênio, δO OPTV: Optical televiewer, imageamento óptico PCE: percloretileno ou tetracloroeteno ou tetracloroetileno Peg: pegmatito RAD: rocha alterada dura (Vaz & Gurgueira, 2018) RAM: rocha alterada mole (Vaz & Gurgueira, 2018) RC: contato de rocha RCSB: *Rift* Continental do Sudeste do Brasil (Riccomini, 1989) RG: Robertson Geologging Ltd. RMSP: Região Metropolitana de São Paulo RS: rocha sã Sabesp: Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo SA: solo de alteração (Vaz & Gurgueira, 2018) SAC: Sistema Aquífero Cristalino SAS: Sistema Aquífero Sedimentar SedAl: sedimentos aluvionares USP: Universidade de São Paulo Ve: veio VSMOW: Vienna Standard Mean Ocean Water ZUPI: Zona de Uso Predominantemente Industrial

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Na literatura científica mundial, os aquíferos cristalinos fraturados são em geral menos abordados do que os aquíferos sedimentares, devido não apenas à sua maior complexidade hidráulica em função dos efeitos de heterogeneidade e de escala, mas também à necessidade de maiores investimentos para a condução de estudos. A compreensão da dinâmica do fluxo da água subterrânea nos aquíferos fraturados depende da caracterização geométrica de suas estruturas (foliação, dobras, zonas de cisalhamento rúptil-dúctil, falhas e fraturas). Há um consenso, entretanto, sobre a importância de um avanço no conhecimento da avaliação de aquíferos cristalinos fraturados, dada a sua importância para o abastecimento de água em muitas regiões do globo.

Na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), poucos são os casos de investigação ambiental em aquíferos cristalinos; em geral, os estudos se limitam à porção sedimentar e rasa (Barbosa, 2015). Este é o caso do Canal do Jurubatuba (Figura 1), uma área reconhecidamente complexa não somente geologicamente, mas inclusive do ponto de vista do gerenciamento ambiental. Sedimentos aluviais da Bacia de São Paulo estão sobrepostos a uma expressiva camada de manto inconsolidado e ao embasamento gnáissico e granítico do Complexo Embu.



Figura 1 – Região do Canal Jurubatuba (a antiga ZUPI 131, contorno vermelho) no contexto do município de São Paulo. Fonte: Servmar et al. (2009).

O manejo inadequado de solventes organoclorados e outras substâncias tóxicas por indústrias que se instalaram na área desde a década de 1950 provocou a contaminação do subsolo e da água subterrânea. A intensa explotação da água subterrânea por poços tubulares provocou fortes potenciais hidráulicos verticais descendentes e possibilitou o transporte da contaminação para o aquífero cristalino fraturado, mais profundo. A contaminação das diferentes porções aquíferas gerou restrições ao uso do recurso hídrico na região, classificadas em três níveis (Figura 2): Zona de Alta Restrição (vermelho), com 10.75 km²; Zona de Média Restrição (preto), com 31 km²; e zona de Baixa Restrição (cinza), com 18 km² (Deliberação CBH-AT nº 01 de fevereiro de 2011). Cálculos simples indicam que os prejuízos econômicos, gerados pela restrição de acesso à água subterrânea dos poços interditados, atingem a ordem de milhões de reais por ano. Riscos à saúde humana devidos à utilização da água subterrânea contaminada por usuários de poços ilegais e não cadastrados no Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), os quais são estimados na ordem de centenas, também são decorrentes desse cenário.



Figura 2 – Zonas de restrição e controle para captação e uso da água subterrânea.

Fonte: CBH-AT (2011).

Diversas fontes de contaminação foram identificadas no aquífero sedimentar na região do Jurubatuba. A detecção de contaminantes também em poços de abastecimento profundos pode ser explicada tanto pelas interconexões de fraturas, como pelo efeito de transporte dos contaminantes através dos próprios poços de abastecimento, ou ainda por ambos os efeitos ocorrendo simultaneamente. Entretanto, ainda não há uma compreensão precisa das responsabilidades pela contaminação no aquífero fraturado. Esta complexa situação fez com que a CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) classificasse a região de Jurubatuba como uma das áreas críticas no Estado de São Paulo, criando a demanda de um procedimento de gerenciamento diferenciado para a definição de estratégias de intervenção, de comunicação de risco e de gestão da informação.

Para melhor avaliar essa contaminação, é essencial conhecer a hidráulica do aquífero fraturado e sua relação com o aquífero sedimentar. Nesse contexto, este Doutorado aplicou tecnologias avançadas diversas para a avaliação de detalhe do aquífero cristalino fraturado em uma área contaminada no Jurubatuba – uma indústria cujos poços de monitoramento registraram concentrações de tetracloroeteno (PCE) da ordem de vários mg/L (ou partes por milhão, ppm) em profundidades próximas a 15m, em que ocorre a base do manto inconsolidado. Tais concentrações são bastante elevadas, considerando-se que concentrações da ordem de parte por bilhão (ppb) já são capazes de tornar a água não potável.

Os estudos de caracterização dos aquíferos no Jurubatuba são focados no aquífero sedimentar, e se associam a relatórios técnicos desenvolvidos por empresas de consultoria ambiental, que na maioria dos casos não são publicados em periódicos de revisão por pares, e não há dados locais sobre a interação entre o manto inconsolidado e a rocha sã. Os modelos conceituais de contaminação nesses relatórios em geral são derivados de métodos tradicionais de investigação, baseados na execução de sondagens para amostragem de solo, avaliação da qualidade da água subterrânea, instalação de poços de monitoramento convencionais e (raramente) execução de testes hidráulicos.

Dada a complexidade de estudos no aquífero fraturado e o escasso conhecimento a seu respeito na região do Jurubatuba, esta pesquisa de Doutorado almejou ampliar o entendimento do modelo conceitual hidrogeológico local, por meio da aplicação do método *Discrete Fracture Network*, DFN (Parker, 2007; Parker et al., 2012). Os estudos consistiram na realização de testes hidráulicos e na instalação de um sistema multinível de monitoramento de água subterrânea (MLS) na porção do aquífero fraturado, em uma nova perfuração na rocha sã, em um ponto estratégico. Ademais, foram realizadas descrições detalhadas das litologias, estruturas e hidrogeologia locais.

Além da produção de conhecimentos acerca do aquífero cristalino local, objetivou-se testar a viabilidade de aplicação das diferentes técnicas para o gerenciamento ambiental no Estado de São Paulo. Em termos de contribuições científicas, um conjunto de procedimentos e técnicas foi testado pela primeira vez em aquífero cristalino fraturado em região tropical, em que a camada de intemperismo (alteração de rocha) é bastante expressiva.

Trabalhos apresentados em congressos nacionais e internacionais relacionados a este estudo incluem: Pino et al. (2016a, 2016b, 2016c, 2018, 2019a, 2019b); Lojkasek-Lima et al. (2015, 2016, 2017, 2018); Bertolo et al. (2015).

2. OBJETIVOS

Este doutorado teve como objetivo geral desenvolver um modelo conceitual hidrogeológico em escala de detalhe para o aquífero fraturado cristalino de uma área industrial do Jurubatuba. Os objetivos específicos foram:

- Aplicar o método DFN (*Discrete Fracture Network*) desenvolvido por Parker (2007) para o caso de regiões tropicais, em que há expressiva camada de solo de alteração e rocha alterada mole (manto inconsolidado) sobre a rocha sã cristalina;
- Caracterizar a litologia e as estruturas (com ênfase nas rúpteis) dos níveis aquíferos locais cristalino e sedimentar;
- Descrever a geometria da rede de fraturas observadas no *site*;
- Identificar as transmissividades em intervalos discretos e relacioná-las com os grupos de fraturas e descrever os potenciais hidráulicos verticais do sistema;
- Comparar o modelo conceitual hidrogeológico local com trabalhos anteriores;
- Apresentar recomendações e sugestões acerca dos procedimentos testados nesta pesquisa para o gerenciamento de áreas contaminadas em cenários geológicos complexos, em particular caracterizados por rochas cristalinas fraturadas.

7. CONCLUSÕES

Foi aplicado com sucesso o método DFN em uma região tropical (Canal Jurubatuba, na cidade de São Paulo, SP), onde uma expressiva camada de materiais de alteração recobrem o embasamento (cerca de 7m de solo de alteração e 10m de rocha alterada mole, RAM, sobre 10m de rocha alterada dura, RAD, e então, rocha sã, RS). O principal desafio foi a perfuração e recuperação de testemunhos de materiais de competências bastante distintas que se intercalavam, a exemplo do veio de quartzo em meio ao solo de alteração e da interface RAM/RAD. O cenário geológico de espessos mantos de intemperismo sobre a rocha sã é característico de regiões de clima tropical, tendo sido uma aplicação inédita do método DFN. Uma vez que a recuperação contínua de testemunhos é um dos princípios que definem o método, a adequação do sistema de perfuração (da coroa de perfuração e do sistema de circulação de água) foi fundamental para o sucesso das investigações, pois possibilitou o maior índice de recuperação possível nos trechos de interface SA/RAM e RAM/RAD.

Localmente, identificou-se a seguinte sequência de materiais geológicos, da base para o topo: rocha sã (intercalação de gnaisse fino, gnaisse bandado e pegmatito), rocha alterada dura (rocha com sinais de intemperismo químico), rocha alterada mole (rocha mais intemperizada, em que a porosidade da matriz passa a ter um papel mais relevante na circulação da água subterrânea), solo de alteração e depósitos aluvionares. Não foram observados sedimentos da Bacia de São Paulo (BSP) nos pontos de estudo.

Foram descritas 977 estruturas no total, entre testemunhos (408), perfilagens geofísicas (520) e afloramentos (49), dando-se ênfase às estruturas rúpteis, devido à sua importância para a circulação da água subterrânea. A maioria das fraturas identificadas é de baixo a médio ângulo de mergulho, em função do viés de orientação das linhas de levantamento principais (poços verticais). Dessa forma, ressalta-se a importância de serem realizados levantamentos em no mínimo três linhas de levantamento aproximadamente ortogonais entre si sempre que possível, a fim de abranger o maior número de orientações de estruturas e eliminar pontos cegos. Para este trabalho havia poucos afloramentos disponíveis por se tratar de uma região de planície de inundação, de modo que foram aproveitadas as exposições de rocha em um grande canteiro de obras.

Os dados coletados permitiram caracterizar 05 famílias de fraturas no total, relacionadas com a litologia: (i) família A, sub-horizontal, no BGn e no FGn associado a BGn e Peg; (ii) família B, de orientação média N064/37 (mergulho para SE), no BGn associado a FGn e Peg; (iii) família C, de orientação média N000-035/37-49 (mergulho para SE), no BGn;

(iv) família D, de orientação média de N315-322/80-86 (mergulho para NE ou SW), no BGn; e (v) família E, de orientação média N012-040/71-90 (mergulho para SE), no BGn. A relação dessas famílias com grandes estruturas de estudos regionais indicou a representatividade do levantamento realizado.

A avaliação de gradientes hidráulicos e dados isotópicos mostrou, de modo geral, fluxo descendente até cerca de 40 m de profundidade, com exceção do intervalo de 10 a 14.5 m (na RAM), em que as assinaturas isotópicas de oxigênio e deutério sugerem um fluxo horizontal importante. Entre 52 e 60 m constatou-se fluxo vertical ascendente – onde ocorre uma associação de rochas e de famílias de fraturas, e alguns dos valores de transmissividade mais elevados para a rocha sã.

Em função de ensaios com obturadores, os trechos mais relevantes para o fluxo da água subterrânea compreendem a combinação de mais de uma família de fraturas, em geral envolvendo as famílias A e B, com transmisividades hidráulicas calculadas na ordem de 1E-04 m²/s.

A classificação das razões isotópicas em função do litotipo parecem surgir alguns grupos mais bem definidos, de modo que seriam necessárias mais campanhas analíticas, preferencialmente em outras épocas do ano hidrológico (inclusive envolvendo outros poços), a fim de apontar com clareza que tipo de resposta os isótopos estão refletindo. Análises de isótopos de estrôncio também poderiam contribuir nesse sentido.

As famílias de fraturas identificadas neste estudo puderam ser relacionadas àquelas definidas em estudo regional no Jurubatuba descrito na literatura, com base nos intervalos de direção e mergulho das estruturas. A associação a eventos tectônicos foi limitada pela amostragem de detalhe em poucos pontos, e devido às rochas pré-cambrianas aqui estudadas terem passado por muitas fases de deformação rúptil, dificultando o reconhecimento de todos os eventos de sua história tectônica. Por outro lado, em termos de caracterização hidráulica, o presente estudo trouxe novos dados, mais detalhados, em relação aos descritos na literatura.

Este projeto contribuiu ainda ao testar diversos procedimentos com potencial para uso no gerenciamento de áreas contaminadas em cenários geológicos complexos, como no caso do Jurubatuba. Foram apresentadas recomendações em relação a cada uma das técnicas empregadas e, quando possível, sugestões de adaptação ao cenário geológico e econômico brasileiro, para a realização de projetos tanto acadêmicos como comerciais de investigação ambiental.

Em resumo, neste estudo realizado essencialmente em 1-D, observou-se que materiais geológicos anteriormente considerados em contato abrupto, na verdade apresentam contatos

graduais, com importante alternância de materiais de distintas competências e porosidades duplas. Além disso, constatou-se a ocorrência de fluxo predominantemente descendente entre as camadas, e a perfilagem de temperatura tipo ALS e ensaios com obturadores indicaram continuidade de características hidráulicas entre diferentes materiais. A importância do fluxo descendente é suplantada pelo fluxo horizontal na porção da RAM, conforme sugerido pelas assinaturas isotópicas fortemente empobrecidas. A ocorrência frequente das famílias A e B, juntamente com seu baixo/médio ângulo de mergulho e a observação de feições de oxidação em fraturas do testemunho, sugere que o fluxo horizontal da água subterrânea tenha ainda uma componente importante para SE. Verificou-se ainda a conexão hidráulica entre distintos níveis do aquífero, de 12 a 45.3 m (Zonas III, IV, V, VI, X e XI). Não obstante, os trechos com transmissividade mais elevada estão relacionados ao FGn com as famílias de fraturas A e B, ou à intercalação de FGn, Peg e BGn e as famílias A e B, indicando que o fluxo não é necessariamente função de uma única orientação de estruturas, mas que seu potencial pode ser aumentado diante da associação de mais de uma família de fraturas.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbott, M. D.; Lini, A.; Bierman, P. R. (2000). δ¹⁸O, δD and ³H measurements constrain groundwater recharge patterns in an upland fractured bedrock aquifer, Vermont, USA. Journal of Hydrology, 228: 101-12.
- ABEF Associação Brasileira de Engenharia de Fundações. (1989). Research on foundation engineering. *In:* XII ICSMF, 9-45.
- Almeida, F. F. M. (1976). The system of continental rifts bordering the Santos Basin, Brazil. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 48: 15-26.
- Almeida, F. F. M.; Riccomini, C.; Dehira, L. K.; Campanha, G. A. C. (1984). Tectônica da Formação Itaquaquecetuba na Grande São Paulo. *In:* 33º Congresso Brasileiro de Geologia, Anais..., 4: 1794-1808.
- Alves, A. (2009). Petrogênese de plútons graníticos do leste paulista: geocronologia, geoquímica elemental e isotópica. Tese de Doutoramento. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 122p.
- Alves, A.; Janasi, V. A.; Campos-Neto, M.; Heaman, L.; Simonetti, A. (2013). U-Pb geochronology of the granite magmatism in the Embu Terrane: implications for the evolution of the Central Ribeira Belt, SE Brazil. Precambrian Research, 230: 1-12.
- Bairos, K. P. (2012). Insights from use of a 3-D Discrete-Fracture Network Numerical Model for Hydraulic Test Analysis. Dissertação de Mestrado, University of Guelph. 82p.
- Banner, J. L. (2004). Radiogenic isotopes: systematics and applications to Earth surface processes and chemical stratigraphy. Earth-Science Reviews, 65: 141-94.
- Barbosa, M. B. (2015). Sistema de informações geográficas aplicado ao gerenciamento da contaminação da antiga ZUPI 131, Jurubatuba, São Paulo. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 137p.
- Barton, C. A.; Zoback, M. D.; Moos, D. (1995). Fluid flow along potentially active faults in crystalline rock. Geology, 23 (8): 683-686.
- Benedikt, J.; Girg, P.; Kotrla, L.; Takáč, P. (2018). Origin of the p-Laplacian and Missbach. Electronic Journal of Differential Equations, 2018 (16): 1-17.
- Bertachini, A. C. (1987). Estudo das características hidrogeológicas dos terrenos cristalinos sob clima úmido, na região de Jundiaí. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 180p.
- Bertolo, R. A. (1996). Relações entre rios e o Aquífero Sedimentar da Bacia de São Paulo.Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 108p.

- Bertolo, R. A.; Pino, D.; Lima, P. L.; Parker, B.; Hirata, R. (2015). Application of DFN approach for characterizing a fractured crystalline rock aquifer at a tropical region in São Paulo, Brazil. Aqua 2015, 42nd IAH Congress, Abstracts: p122. Rome, Italy.
- Black, W. H.; Smith, H. R.; Patton, F. D. (1986). Multiple-level ground water monitoring with the MP system. *In:* Surface and Borehole Geophysical Methods and Ground Water Instrumentation Conference and Exposition, Proceedings..., NGWA, Denver, Colorado, p. 41-61.
- Bullen, T. D. & Kendall, C. (1998). Tracing of weathering reactions and water flowpaths: a multi-isotope approach. *In:* Kendall, C. & McDonnell, J. J. 2006. Isotope tracers in catchment hidrology. Oxford, Elsevier. 611-46.
- Cavalcante, I. N. (1990). Estudo hidrogeológico de terreno cristalino com manto de intemperismo: área piloto de Atibaia (SP). Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 123p.
- Cavalcante, J. C. & Kaefer, L. Q. (1974). Geologia da folha de Santos (parcial). *In:* SBG, 28° Congresso Brasileiro de Geologia, Anais..., 4: 227-45.
- CBH-AT Comitê da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê. (2011). Áreas de restrição e controle para captação e uso das águas subterrâneas no município de São Paulo, na região do Jurubatuba, São Paulo.
- Cecílio Júnior, M. O. (2009). Estudo do comportamento de um túnel em solo residual de gnaisse por meio de ensaios triaxiais com controle de trajetória de tensões. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 204p.
- CEPAS Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas. (2016). Diagnóstico da disponibilidade hídrica subterrânea em contribuição ao plano de contingência de abastecimento de água na Região Metropolitana de São Paulo – Relatório Final.
- CETESB Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. (2005). Relatório: Estabelecimento de Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental.
- Chapman, S. W.; Parker, B. L.; Cherry, J. A.; McDonald, S. D.; Goldstein, K. J.; Frederick, J. J.; St. Germain, D. J.; Cutt, D. M.; Williams, C. E. (2013). Combined MODFLOW-FRACTRAN application to assess chlorinated solvente transport and remediation in fractured sedimentary rock. Remediation, 23 (3): 7-35.
- Cherry, J. A.; Parker, B. L.; Keller, C. (2007). A new depth-discrete multilevel monitoring approach for fractured rock. Ground Water Monitoring & Remediation, 27 (2): 57-70.

- Chiossi, N. J. (1974). Investigações sobre a agressividade da água subterrânea no Metrô de São Paulo. Cia METRÔ de São Paulo. *In:* 2º Congresso Internacional de Geologia de Engenharia, pp.26-39.
- Chiossi, N. J. (1980). Condições hidrogeológicas da Bacia Sedimentar de São Paulo. *In:* SBG/ABGE, Mesa Redonda: Aspectos Geológicos e Geotécnicos da Bacia Sedimentar de São Paulo, Publicação Especial, pp. 95-116.
- Clark, I. (2015). Groundwater geochemistry and isotopes. Boca Raton, CRC Press. 456p.
- Clark, I. & Fritz, P. (1997). Environmental isotopes in hydrogeology. Boca Raton, Lewis Publishers. 327p.
- Coimbra, A. M.; Riccomini, C.; Melo, M. S. (1983). A Formação Itaquaquecetuba: evidências de tectonismo no Quaternário paulista. *In:* 4º Simpósio Regional de Geologia, Atas, 253-266.
- Cooper, H. H. Jr. & Jacob, C. E. (1946). A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. Transactions, American Geophysical Union, 27 (4): 526-534.
- Cordani, U. G.; Coutinho, J. M. V.; Nutman, A. (2002). Geochronological constraints on the evolution of the Embu Complex. São Paulo. Journal of South American Earth Sciences, 14: 903-910.
- Coutinho, J. M. V. (1968). Petrologia do Pré-Cambriano em São Paulo e arredores. Tese de Provimento de Cátedra. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 174p.
- Coutinho, J. M. V. (1971). O falhamento de Cubatão. *In:* 25º Congresso Brasileiro de Geologia, São Paulo, Resumos.... Boletim 1: 130-131.
- Coutinho, J. M. V. (1972). Petrologia do Pré-Cambriano de São Paulo e arredores. Boletim IG, 3: 5-99.
- Craig, H. (1961). Standard for reporting concentration of deuterium and oxygen-18 in natural waters. Science, 133: 1833-4.
- Cruden, D. M. (1988). Subsurface fracture surveys using a borehole television camera and acoustic televiewer: discussion. Canadian Geotechnical Journal, 25: 843.
- DAEE Departamento de Águas e Energia Elétrica. (1975). Estudo de águas subterrâneas, Região Administrativa 1 – Grande São Paulo. 3 volumes.
- Damasio, G. V. (2108). Modelo hidrogeológico de uma área industrial na região de Jurubatuba, São Paulo. Monografia de Trabalho de Formatura. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 82p.

- Day-Lewis, F.; Johnson, C. D.; Paillet, F. L.; Halford, K. J. (2011). A computer program for flow-log analysis of single holes (FLASH). Ground Water, 49 (6): 926-931.
- Dietrich, P.; Butler Jr, J. J.; Flaib, K. (2008). A rapid method for hydraulic profiling in unconsolidated formations. Ground Water, 46 (2): 323–328.
- Dietze, M. & Dietrich, P. (2012). Evaluation of vertical variations in hydraulic conductivity in unconsolidated sediments. Ground Water, 50 (3): 450-456.
- Domenico, P. & Schwartz, F. (1990). Physical and Chemical Hydrogeology. New York, John Wiley & Sons. 824p.
- Drogue, C. (1985). Geothermal gradients and ground water circulations in fissured and karstic rocks: The role played by the structure of the permeable network. Journal of Geodynamics, 4 (1–4): 219–231.
- Einarson. M. D & Cherry, J.A. (2002). A new multilevel ground water monitoring system using multichannel tubing. Groundwater Monitoring & Remediation, 22 (4): 52-65.
- Estação IAG-USP. (2016). Estação Meteorológica IAG-USP: Resumo mensal. Disponível em: http://www.estacao.iag.usp.br/Mensais.
- Fanti, A. C. (2015). Investigação de aquífero fraturado para entendimento de fluxo e transporte de contaminantes clorados: estudo de caso em Valinhos, SP. Dissertação de Mestrado. Instituo de Geociências, Universidade de São Paulo. 147p.
- Faure, G. (1986). Principles of Isotope Geology. 2nd edition. New York, John Wiley & Sons. 589p.
- Fernandes, A. J. (1991). O Complexo Embu no leste do Estado de São Paulo: contribuição ao conhecimento da litoestratigrafia e da evolução estrutural e metamórfica. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 120p.
- Fernandes, A. J. (2008). Aquíferos fraturados: uma revisão dos condicionantes geológicos e dos métodos de investigação. Revista do Instituto Geológico, 29 (1/2): 49-72.
- Fernandes, A. J. & Rouleau, A. (2008). Simulação de deslocamentos em fraturas em basaltos da Formação Serra Geral (Ribeirão Preto, SP) e implicações para a sua transmissividade. *In:* XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Anais... Natal, Brazil. CD-ROM, 20p.
- Fernandes, A. J. & Rudolph, D. L. (2001). The influence of Cenozoic tectonics on the groundwater-production capacity of fractured zones: a case study in Sao Paulo, Brazil. Hydrogeology Journal, 9: 151-167.
- Fernandes, A. J.; Perrota, M.; Salvador, E.; Azevedo, S.; Gimenez Filho, A.; Stefani, F.; Paulon, N. (2005). Aquíferos Fraturados. *In:* Rocha, G.; Fernandes, A. J.; Mancuso, M. (ed.) Mapa

de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo. Nota explicativa. DAEE/IG/ CPRM/IPT, p. 66-84.

- Fernandes, A. J.; Fiume, B.; Bertolo, R.; Hirata, R. C. A. (2016a). Modelo geométrico de fraturas e análise da tectônica rúptil aplicados ao estudo do fluxo do aquífero cristalino, São Paulo (SP). Revista do Instituto de Geociências, 16 (3): 71-88.
- Fernandes, A. J.; Christofoletti, C.; Pino, D. S.; Simonato, M. D.; Pinhatti, A.; Connicelli, B. P.; Hirata, R.; Bertolo, R. (2016b). Avaliação regional e identificação de critérios para locação de poços nos aquíferos fraturados da RMSP. XIX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Anais. Campinas, Brasil. 15p.
- Ferreira, S. A. M. (2017). Processos microbiológicos associados à degradação de solventes organoclorados na água subterrânea – Jurubatuba – São Paulo – SP. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 128p.
- Fiume, B. (2013). Geologia estrutural de detalhe para elaboração de modelo conceitual de circulação de água subterrânea: estudo de caso em Jurubatuba, SP. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 167p.
- Forchheimer, P. (1901), Wasserbewegung durch Boden, Forschtlft ver. D. Ing., 45: 1782–1788.
- Francese, R.; Mazzarini, F.; Bistacchi, A.; Morelli, G.; Pasquare, G.; Praticelli, N.; Robain, H.; Wardel, N.; Zaja, A. (2009). A structural and geophysical approach to the study of fractured aquifers in the Scansano-Magliano in Toscana Ridge, southern Tuscany, Italy. Hydrogeology Journal, 17: 1233-1246.
- Franch, F. A. J. (2008). Influência do tipo de revestimento superficial no fluxo não saturado e sua influência na estabilidade de taludes. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- Freeze, R. A. & Cherry, J. A. (1979). Groundwater. Prentice Hall. 605p.
- FUSP Fundação de Apoio à Universidade de São Paulo. (2002). Plano da Bacia do Alto Tietê. Relatório Final.
- FUSP Fundação de Apoio à Universidade de São Paulo. (2009). Plano da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê. Relatório Final.
- Futai, M. M.; Cecílio Jr, M. O.; Abramento, M. (2012). Resistência ao cisalhamento e deformabilidade de solos residuais da Região Metropolitana de São Paulo. *In:* ABMS, Solos das Regiões Metropolitanas de São Paulo e Curitiba, 155-187.
- Gat Jr, I. A. (1971). Comments on the stable isotope method in regional groundwater investigation. Water Resource Research, 7: 980.

- Gaudreault, M. (1996). Analyse numérique des phénomènes mécaniques et hydrauliques en périphérie d'excavations en massifs rocheux fracturés: le cas de la Mine Niobec, St-Honoré (Québec). Dissertação de Mestrado, Université du Québec à Chicoutimi. 139p.
- Gaudreault, M.; Rouleau, A.; Archambault, G. (1994). A numerical and field study of the role of stress perturbation on rock mass permeability around mine openings. 47th Canadian Geotechnical Conference, Proceedings: 389-398.
- Groshong, R. H. (2006). *3-D Structural Geology*. Springer-Verlag. Disponível em: http://extras.springer.com/2006/978-3-540-31054-9>.
- Hasui, Y. (1975). Geologia da folha de São Roque. Boletim IG, 6: 157-183.
- Hasui, Y. & Carneiro, C. D. R. (1980). Origem e Evolução da Bacia Sedimentar de São Paulo.
 In: ABGE-SBG, Mesa Redonda: aspectos geológicos e geotécnicos da Bacia Sedimentar de São Paulo, Publicação Especial, pp. 5-13.
- Hasui, Y. & Oliveira, M. A. F. (1984). Província Mantiqueira Setor Central. *In:* Almeida, F.F. M. & Hasui, Y. (Coords.). O Pré-Cambriano do Brasil. Edgard Blucher Ltda. 378p.
- Hasui, Y.; Sadowski, G. R.; Carneiro, C. D. R. (1976). Considerações sobre a estratigrafia do Pré-Cambriano na região de São Paulo. Boletim IG, 7: 107-112.
- Hennies, W. T.; Hasui, Y; Penalva, F. (1967). O falhamento transcorrente de Taxaquara. *In:* 21º Congresso Brasileiro de Geologia, Anais..., pp. 159-68.
- Hirata, R & Ferreira, L. (2001). Os aquíferos da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê: disponibilidade hídrica e vulnerabilidade à poluição. Revista Brasileira de Geociências, 31 (1): 43-50.
- Hoek, E. & Bray, J. (1981). Rock slope engineering. Institute of Mining and Metallurgy, London.
- Hvorslev, M. J. (1951). Time-lag and soil permeability in ground water observations. Bulletin 36, U.S. Army Engineering Waterways Experimental Station, Vicksburg, Mississipi.
- IPT Instituto de Pesquisas Tecnológicas. (1981). Mapa geológico do Estado de São Paulo. Escala: 1:500.000. São Paulo: IPT.
- Johnson, C. D. & Williams, J. H. (2003). Hydraulic logging methods a summary and field demonstration in Conyers, Rockdale County, Georgia. *In:* Williams, L. J. (ed.). Methods used to assess the occurrence and availability of ground water in fractured-crystalline bedrock - an excursion into areas of Lithonia Gneiss in eastern metropolitan Atlanta, Georgia. Georgia Geologic Survey, Guidebook 23, pp. 40-47.

- Juliani, C. (1992). O embasamento pré-cambriano da Bacia de São Paulo. In: ABAS/ABGE/SBG-SP, Seminário Problemas Geológicos e Geotécnicos na Região Metropolitana de São Paulo, pp. 3-20.
- Juliani, C.; Beljavskis, P.; Schorscher, H. D. (1986). Petrogênese do vulcanismo e aspectos metalogenéticos associados: Grupo Serra do Itaberaba na Região do São Roque – SP. *In:* 34º Congresso Brasileiro de Geologia, Anais..., 2: 730-43.
- Keller, C. (2004). How to locate and flow test every major fracture in a borehole in one hour. *In:* NGWA EPA Fracture Rock Conference, Proceedings.
- Keller, C. (2009). Liners and packers: similarities and differences. NGWA/EPA Fractured Rock Conference, 12p.
- Keller, C. (2012). Hydro-geologic spatial resolution using flexible liners. The Professional Geologist AIPG, may-june: 45-51.
- Keller, C.; Cherry, J. A.; Parker, B. L. (2013). New method for continuous transmissivity profiling in fractured rock. Groundwater, 52 (3): 352-367.
- Kennel, J. R. (2008). Advances in rock core VOC analyses for high resolution characterization of chlorinated solvent contamination in a dolostone aquifer. Dissertação de Mestrado, University of Guelph. 226p.
- Keys, S. (1990). Techniques of water-resources investigations of the United States Geological Survey. USGS Report. 165p.
- L'Apicirella, E. S. P. (2009). Contaminação e áreas de restrição de uso de água subterrânea no entorno do Canal Jurubatuba em São Paulo SP. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 125p.
- Lamontagne, E. (2001). Étude hydromécanique d'une fracture en cisaillement sous contrainte normale constante. Tese de Doutoramento. Université du Québec à Chicoutimi. 495p.
- Lane, J. W.; Williams, J. H.; Johnson, C. D.; Savino, S. D. M.; Haeni, F. P. (2002). An integrated geophysical and hydraulic investigation to characterize a fractured-rock aquifer, Norwalk, Connecticut. Water Resources, 01-4133: 30p.
- Lapcevic, P.A. (1988). Results of borehole packer tests at the Ville Mercier Groundwater Treatment Site. National Water Research Institute, Burlington, Ontario.
- Lapcevic, P.A., Novakowski, K.S., Sudicky, E.A. (1999). The interpretation of a tracer experiment conducted in a single fracture under conditions of natural groundwater flow. Water Resources Research, 35 (8): 2301–2312.
- Lau, J. S. O.; Auger, L. F.; Bisson, J. G. (1987). Subsurface fracture surveys using a borehole television camera and acoustic televiewer. Canadian Geotechnical Journal, 24: 499-508.

- Lau, J. S. O.; Auger, L. F.; Bisson, J. G. (1988). Subsurface fracture surveys using a borehole television camera and acoustic televiewer: reply. Canadian Geotechnical Journal, 25: 844-845.
- Lerner, D. N. (2002). Identifying and quantifying urban recharge: a review. Hydrogeology Journal, 10: 143-152.
- Leroueil, S. & Vaughan, P.R. (1990). The general and congruent effects of structure in natural clays and weak rocks. Géotechnique, 40 (3): 467-488.
- Lo, H-C.; Chen, P-J.; Chour, P-Y.; Hsu, S-M. (2014). The combined use of heat-pulse flowmeter logging and packer testing for transmissive fracture recognition. Journal of Applied Geophysics, 105: 248-258.
- Lojkasek-Lima, P. (2018). Caracterização de detalhe do perfil vertical de contaminação em um aquífero cristalino fraturado e intemperizado Jurubatuba São Paulo SP. Tese de Doutoramento. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 160p.
- Lojkasek-Lima, P.; Pino, D. S.; Casado, P. Parker, B.L; Hirata and R.;Bertolo, R. (2015). Detailed Evaluation of a Vertical Weathering Profile in a Crystalline Bedrock Aquifer. NGWA Conference on Groundwater in Fractured Rock, Abstracts. Burlington, EUA.
- Lojkasek-Lima, P.; Pino, D. S.; Parker, B.; Hirata, R.; Bertolo, R. (2016). Application of multiple enhancing rock core recovery and sampling in a vertical bedrock weathering profile.X Seminário Ekos Brasil, Resumos. São Paulo, Brasil.
- Lojkasek-Lima, P.; Pino, D.S.; Ferreira, S. M. F.; Parker, B. L.; Aravena, R.; Hirata, R. A.; Bertolo, R. A. (2017). High resolution characterization of a contaminated weathered crystalline bedrock aquifer. The University Consortium, Abstracts. Guelph, Canada.
- Lojkasek-Lima, P.; Pino, D. S.; Ferreira, S. M.; Bertolo, R. A.; Parker, B. L.; Aravena, R. (2018). Detailed characterization of a contaminant vertical profile in a weathered crystalline fractured bedrock – Jurubatuba – São Paulo, Brazil. The University Consortium, Abstracts. Guelph, Canada.
- Martins, V. T. S.; Murakami, C. S. D.; Grohmann, C. H. (2013). Sr and Pb isotopes in surface water and bottom sediments from a public water supply reservoir, São Paulo, Brazil. *In*: Goldschmidt Conference, Itália. Abstracts – Mineralogical Magazine, 77: 1698.
- Mattila, J. & Tammisto, E. (2012). Stress-controlled fluid flow in fractures at the site of a potential nuclear waste repository, Finland. Geology, 40: 299-302.
- Mauldon, M. & Mauldon, J. G. (1997). Fracture sampling on a cylinder: from scanlines to boreholes and tunnels. Rock Mechanics and Rock Engineering, 30 (3): 129-144.

- Melo, M. S.; Caetano, S. L. V.; Coimbra, A. M. (1986). Tectônica e sedimentação na área das Bacias de São Paulo e Taubaté. *In:* 34º Congresso Brasileiro de Geologia, Anais..., 1: 321-36.
- Melo, M. S.; Coimbra, A. M.; Riccomini, C. (1989). Evolução dos conhecimentos sobre a geologia da Bacia de São Paulo na década de oitenta. *In:* Workshop Geologia da Bacia de São Paulo, Coletânea das comunicações apresentadas no workshop, pp.1-11.
- Meyer, J. R.; Parker, B. L.; Cherry, J. A. (2008). Detailed hydraulic head profiles as essential data for defining hydrogeologic units in layered fractured sedimentary rock. Environmental Geology, 56: 27-44.
- Meyer, J. R.; Parker, B. L.; Cherry, J. A. (2010). Characteristics of high resolution hydraulic head profiles and vertical gradients in fractured sedimentary rocks. Journal of Hydrogeology, 517: 493-507.
- Meyer, J. R.; Parker, B. L.; Cherry, J. A.; (2014). Characteristics of high resolution hydraulic head profiles and vertical gradients in fractured sedimentary rocks. Journal of Hydrogeology, 517: 493-507.
- Missbach, A. (1937). Listy Cukrov, 55, 293.
- Molz, F. J. & Young, S. C. (1993). Development and application of borehole flowmeters for environmental assessment. The Log Analyst, 3: 13-23.
- Monteiro, M. D. (2016). Contribuição à caracterização hidrogeológica de maciços fraturados e solos residuais em projetos de obras subterrâneas na Região Metropolitana de São Paulo.
 Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 148p.
- Morin, R. H. & Savage, W. Z. (2003). Effects of crustal stresses on fluid transport in fractured rock: case studies from northeastern and southwestern USA. Hydrogeology Journal, 11: 100-112.
- Morin, R. H.; Hess, A. E.; Paillet, F. L. (1988). Determining the distribution of hydraulic conductivity in a fractured limestone aquifer by simultaneous injection and geophysical logging. Ground Water, 26 (5): 587-595
- Morin, R.; Carleton, G. B.; Poirier, S. (1997). Fractured-aquifer hydrogeology from geophysical logs; the Passaic Formation, New Jersey. Groundwater, 35 (2): 328-338.
- Morin, R. H.; Senior, L. A.; Decker, E. R. (2000). Fractured-aquifer hydrogeology from geophysical logs: Brunswick Group and Lockatong Formation, Pennsylvania. Groundwater, 38 (2): 182-192.

- Morin, R.; Godin, R.; Nastev, M.; Rouleau, A. (2007). Hydrogeologic controls imposed by mechanical stratigraphy in layered rocks of the Chateauguay River Basin, a U.S.-Canada transborder aquifer. Journal of Geophysical Research, 112.
- Mortimer, L; Aydin, A.; Simmons, C. T.; Love, A. J. (2011a). Is in situ stress important to groundwater flow in shallow fractured rock aquifers? Journal of Hydrogeology, 399 (3): 185-200.
- Mortimer, L; Aydin, A.; Simmons, C. T.; Heinson, G.; Love, A. J. (2011b). The role of in situ stress in determining hydraulic connectivity in a fractured rock aquifer (Australia). Hydrogeology Journal, 19: 1293-1312.
- Munn, J. D. (2012). High resolution discrete fracture network characterization using inclined coreholes in a Silurian dolostone aquifer in Guelph, Ontario. Tese de Doutoramento, University of Guelph. 60p.
- Novakowski, K. S. (2000). Fate and transport in fractured rock. *In:* Lehr, J. (Ed.), Standard Handbook of Environmental Science, Health, and Technology. McGraw-Hill Inc., p. 4.74-4.86.
- Paillet, F. L. (1995). Using borehole flow logging to optimize hydraulic test procedures in heterogeneous fractured aquifers. Hydrogeology Journal, 3 (3): 4-20.
- Paillet, F. L. (1998). Flow modeling and permeability estimation using borehole flow logs in heterogeneous fractured formations. Water Resources Research, 34 (5): 997-1010.
- Paillet, F. L. (2000). A field technique for estimating aquifer parameters using flow log data. Ground Water, 34 (5): 997-1010.
- Paillet, F. L. (2004). Borehole flowmeter applications in irregular large-diameter boreholes. Journal of Applied Geophysics, 55: 39-59.
- Paillet, F. L.; Hess, A. E.; Cheng, C. H.; Hardin, E. (1987). Characterization of fracture permeability with high-resolution vertical flow measurements during borehole pumping. Ground Water, 25 (1): 28-40.
- Parisot, E. H. (1983). As águas subterrâneas no centro-oeste do município de São Paulo.Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 93p.
- Parker, B. L. (2007). Investigating contaminated sites on fractured rock using the DFN approach. *In:* NGWA Fractured Rock Conference: State of the Science and Measuring Success in Remediation, Proceedings. 18p.
- Parker, B. L. (2011). The Discrete Fracture Network approach for investigating contaminated sites on fractured sedimentary rock. *In:* GeoHydro, Québec, Expanded Abstracts.

- Parker, B. L.; Cherry, J. A.; Chapman, S. W. (2012). Discrete fracture network approach for studying contamination. *In:* AQUA mundi, 6052: 101-116.
- Parker, B. L.; Chapman, S. W.; Goldstein, K. J.; Cherry, J. A. (2018). Multiple lines of field evidence to inform fracture network connectivity at a shale site contaminated with dense non-aqueous pase liquids. *In:* Ofterdinger, U.; MacDonald, A. M.; Comte, J. C.; Young, M. E. (eds). Groundwater in fractured bedrock environments. Geological Society, London, Special Publications, 479.
- Peacock, D. C. P. & Sanderson, D. J. (2018). Structural analyses and fracture characterisation: Seven pillars of wisdom. Earth-Sciences Reviews, 184: 13-28.
- Pede, M. A. (2004). Caracterização da condutividade hidráulica do embasamento cristalino alterado saturado na Região Metropolitana de São Paulo. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. 106p.
- Pehme, P. E. (2012). New approaches to the collection and interpretation of high sensitivity temperature logs for detection of groundwater flow in fractured rock. Tese de Doutoramento. University of Waterloo. 324p.
- Pehme, P. E.; Greenhouse, J. P.; Parker, B. L. (2007a). The active line source (ALS) technique, a method to improve detection of hydraulically active fractures and estimate rock thermal conductivity. AIH Conference, Ottawa. 8p.
- Pehme, P. E.; Parker, B. L.; Cherry, J. A.; Greenhouse, J. P. (2007b). The potential for compromised interpretations when based on open borehole geophysical data in fractured rock. NGWA/USEPA Fractured Rock Conference. 12p.
- Pehme, P. E.; Greenhouse, J. P.; Parker, B. L. (2007c). The active line source temperature logging technique and its application in fractured rock hydrogeology. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 12 (4): 307-322.
- Pehme, P.E.; Parker, B. L.; Cherry, J. A.; Greenhouse, J. P. (2010). Improved resolution of ambient flow through fractured rock with temperature logs. Groundwater, 48 (2): 191-205.
- Pehme, P. E.; Parker, B. L.; Cherry, J. A.; Molson, J. W.; Greenhouse, J. P. (2013). Enhanced detection of hydraulically active fractures by temperature profiling in lined heated bedrock boreholes. Journal of Hydrogeology, 484: 1-15.
- Pehme, P. E.; Parker, B. L.; Cherry, J. A.; Blohm, D. (2014). Detailed measurement of the magnitude and orientation of thermal gradients in lined boreholes for characterizing groundwater flow in fractured rock. Journal of Hydrology, 513: 101-114.
- Perrotta, M. M.; Salvador, E. D.; Lopes, R. C.; D'Agostinho, L. Z. (2005). Mapa Geológico do Estado de São Paulo, escala 1:750.000. São Paulo, CPRM (Programa Levantamentos

Geológicos Básicos do Brasil). Breve descrição das unidades litoestratigráficas aflorantes no Estado de São Paulo. 195p.

- Petelet-Giraud, E.; Négrel, P.; Gourcy, L.; Schmidt, C.; Schirmer, M. (2007). Geochemical and isotopic constraints on groundwater-surface water interactions in a highly anthropized site. The Wolfen Bitterfeld megasite (Mulde subcatchment, Germany). Environmental Pollution, 148: 707-17.
- Pierce, A.; Chapman, S. W.; Zimmerman, L. K.; Hurley, J. C.; Aravena, R.; Cherry, J. A.; Parker, B. L. (2018). DFN-M field characterization of sandstone for process-based site conceptual model and numerical simulations of TCE transport with degradation. Journal of Contaminant Hydrology, 212: 96-114.
- Pino, D.S. (2012). Structural hydrogeology in the Kenogamy Uplands, Quebec, Canada. Dissertação de Mestrado, Université du Quebec à Chicoutimi. 184p.
- Pino, D. S.; Barbosa, M. B.; Lojkasek-Lima, P.; Sartorio, F.; Hirata, R.; Bertolo, R. (2016a). Development of a Mobile Unit for Packer Testing (MUST) in Brazil for a fractured bedrock aquifer characterization: preliminary results. 2016 Consortium Meeting, Abstracts. Guelph, Canada.
- Pino, D. S.; Lojkasek-Lima, P.; Barbosa, M. B.; Parker, B.; Hirata, R.; Bertolo, R. (2016b). Detailed vertical evaluation of a contaminated fractured crystalline aquifer using the DFN approach: case study of Jurubatuba, São Paulo. X Seminário Ekos Brasil, Resumos. São Paulo, Brasil.
- Pino, D.S.; Lojkasek-Lima, P.; Barbosa, M. B.; Parker, B.; Hirata, R.; Bertolo, R. (2016c). Aplicação do método Discrete Fracture Network para estudo Hidrogeológico Estrutural de aquífero fraturado: caso da região de Jurubatuba, São Paulo (SP). 48º Congresso Brasileiro de Geologia, Resumos, ST25 (5277). Porto Alegre, Brasil.
- Pino, D. S.; Lojkasek-Lima, P.; Ferreira, S. A. M.; Barbosa, M.; Hirata, R.; Fernandes, A.; Parker, B.; Bertolo, R. (2018). Perfil hidrogeológico estrutural vertical de aquífero cristalino fraturado na região de Jurubatuba, São Paulo. XX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Resumos, Campinas, SP.
- Pino, D. S.; Fernandes, A. J.; Bertolo, R. A. (2019a). Caracterização hidrogeológica e estrutural de aquíferos fraturados em região de clima tropical. 1º Simpósio de Pós-Graduação do Instituto de Geociências, Resumos, São Paulo, SP.
- Pino, D. S.; Lojkasek-Lima, P.; Ferreira, S. A. M.; Parker, B.; Aravena, R.; Hirata, R.; Bertolo,R. (2019b). Assessing discrete contaminant mass distribution and storage capacity in weathered bedrock aquifers in tropical regions. Groundwater Remediation using

Nano/biotechnology with focus on the Contaminated Resources in Brazil – GRUN, Abstracts, Campinas, SP.

- Pollard, D. D. & Aydin, A. (1988). Progress in understanding jointing over the past century. Geological Society of America Bulletin, 100: 1181-1204.
- Priest, S. D. (1993). Discontinuity analysis for rock engineering. London, Chapman & Hall. 473p.
- Quinn, P. M.; Parker, B. L.; Cherry, J. A. (2011a). Using constant head step tests to determine hydraulic apertures in fractured rock. Journal of Contaminant Hydrology, 126 (1-2): 85-99.
- Quinn, P.; Cherry, J.; Parker, B. (2011b). Quantification of non-Darcian flow observed during packer testing in fractured sedimentary rock. Water Resources Research, 47 (W09533), 15p.
- Quinn, P.; Cherry, J.; Parker, B. (2012). Hydraulic testing using a versatile straddle packer system for improved transmissivity estimation in fractured-rock boreholes. Hydrogeology Journal,20 (8): 1529-1547.
- Quinn, P.; Parker, B. L.; Cherry, J. A. (2013). Validation of non-Darcian flow effects in slug tests conducted in fractured rock boreholes. Journal of Hydrogeology, 486: 505-518.
- Quinn, P.; Cherry, J. A.; Parker, B. L. (2015). Combined use of straddle packer testing and FLUTe profiling for hydraulic testing in fractured rock boreholes. Journal of Hydrology, 534: 439-454.
- Quinn, P.; Cherry, J. A.; Parker, B. L. (2016). Depth-discrete specific storage in fractured sedimentary rock using steady-state and transient single hole hydraulic tests. Journal of Hydrogeology, 542: 756-771.
- Rede das Águas. (2002). A Bacia Hidrográfica do Tietê. Disponível em: http://www.rededasaguas.org.br>.
- Ribeiro, L. A. F. S. (2012). Perfilagens geofísicas de poços tubulares profundos, região do Canal Jurubatuba, São Paulo (SP). Monografia de Trabalho de Formatura. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Ribeiro, L. A. F. S. (2016). Constraining a Discrete Fracture Network statistic model for the Tunnel City Group sandstones in Cottage Grove-WI using outcrops and boreholes. Dissertação de Mestrado. University of Guelph. 98p.
- Riccomini, C. (1989). O rift continental da região sudeste do Brasil. Tese de Doutoramento. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 256p.
- Riccomini, C. & Coimbra, A.M. (1992). Geologia da Bacia Sedimentar de São Paulo. *In:* Solos da Cidade de São Paulo. ABMS & ABEF. p. 37-94.

- Riccomini, C.; Coimbra, A.M.; Takiya, H. (1992). Tectônica e sedimentação na Bacia de São Paulo. *In:* ABAS/ABGE/SBG-SP, Seminário Problemas Geológicos e Geotécnicos na Região Metropolitana de São Paulo, p 21-45. 1992.
- Riccomini, C.; Sant'Anna, L. C.; Ferrari, A. L. (2004). Evolução Continental do Rift Continental do Sudeste do Brasil. *In:* Neto, V. M.; Bartorelli, A.; Carneiro, C. D. R.; Neves, B. B. B. (orgs). Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. Beca, São Paulo, 385-405.
- Robinson, D. A.; Binley, A.; Crook, N.; Day-Lewis, F. D.; Ferre, T. P. A.; Grauch, V. J. S.;
 Knight, R.; Knoll, M.; Lakshmi, V.; Miller, R.; Nyquist, J.; Pellerin, L.; Singha, K.; Slater,
 L. (2008). Advancing process-based watershed hydrological research using near surface
 geophysics: a vision for, and review of, electrical and magnetic geophysical methods.
 Hydrological Processes, 22: 3604–3635.
- Rocha, G. A.; Gonçales, V. G.; Rebouças, A. C.; Barreto, L. M. B. (1989). Hidrogeologia da Bacia de São Paulo: estágio atual de conhecimento. *In:* Workshop Geologia da Bacia de São Paulo, Coletânea das comunicações apresentadas no workshop, pp. 44-59.
- Rouleau, A. & Gale, J. E. (1985). Statistical characterization of the fracture system in the Stripa Granite, Sweden. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 22 (6): 353-367.
- Rowland, S. M.; Duebendorfer, E. M.; Schiefelbein, I. S. (2007). Structural Analysis and Synthesis: a laboratory course in Structural Geology. 3rd edition. Blackwell Publishing. 322p.
- Roy, D. W. (2011). Annexe 3B Cosinus Directeurs. Université du Québec à Chicoutimi. Notas de aula.
- Servmar Serviços Técnicos Ambientais Ltda. (2013). Relatório de Investigação Detalhada Complementar – Ergomat Indústria e Comércio Ltda. MA/12517/13/DSP. São Paulo.
- Servmar Serviços Técnicos Ambientais Ltda. (2018). Relatório de Investigação Ambiental Complementar, monitoramento analítico de vapores e de água subterrânea e avaliação de risco à saúde humana – Ergomat Indústria e Comércio Ltda. R14081-18. São Paulo.
- Servmar Serviços Técnicos Ambientais Ltda; Departamento de Águas e Energia Elétrica DAEE; Instituto Geológico IG; Projeto Aquíferos. (2009). Projeto Jurubatuba: Restrição e controle de uso de água subterrânea. 113p.
- Silva, J. A. F. (2017). Definição dos mecanismos de recarga e origem das águas subterrâneas dos aquíferos da região do Canal Jurubatuba, SP. Tese de Doutoramento. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 132p.

- Snow, D. (1965). A parallel plate model of fractured permeable media. Tese de Doutoramento. University of California. 331p.
- Snow, D. (1968). Rock fracture spacings, openings and porosities. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, 94 (1).
- Snow, D. (1969). Anisotropic permeability of fractured media. Water Ressources Research, 5 (6): 1273-1289.
- Stearns, D. W. (1969). Certain aspects of fracture in naturally deformed rocks. *In:* Riecker, R.E. (ed), Rock mechanics seminar. 97-118. Massachusetts, Air Force Cambridge Research Laboratory.
- Sterling, S. N.; Parker, B. L.; Cherry, J. A.; Williams, J. H.; Lane Jr. J. W.; Haeni, F. P. (2005). Vertical cross contamination of trichloroethylene in a borehole in fractured sandstone. Ground Water, 43 (4): 557-573.
- Sultan, M.; Wagdy, A.; Manocha N.; Sauck, W.; Gelil, K. A.; Youssef, A. F.; Becker, R.; Milewski, A.; Alfy, Z. E.; Jones, C. (2008). An integrated approach for identifying aquifers in transcurrent fault systems: the Najd shear system of the Arabiam Nubian shied. Journal of Hydrology, 349: 475-488.
- Takiya, H. (1991). Aplicação dos métodos quantitativos espaciais a dados geológicos da Bacia de São Paulo. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 109p.
- Taylor, R. & Howard, K. (2000). A tectono-geomorphic model of the hydrogeology of deeply weathered crystalline rock: evidence from Uganda. Hydrogeology Journal, 8: 279-284.

Terzaghi, R. D. (1965). Sources of error in joint surveys. Geotechnique, 15 (3): 287-304.

- Theis, C. V. (1935). The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. Transactions, American Geophysical Union, 16: 519-524.
- Thiem, G. (1906). Hydrologische methoden. Gebhardt, Leipzig. 56p.
- USGS United States Geological Service. (2004). Isotope Traces Project Resources on Isotopes. Disponível em: < https://wwwrcamnl.wr.usgs.gov/isoig/res/>.
- Vaz, L. F. (1996). Classificação genética dos solos e dos horizontes de alteração de rocha em regiões tropicais. Solos e Rochas, 19 (2): 117-136.
- Vaz, L. F. & Gurgueira, M. D. (2018). Solos em Geologia de Engenharia. *In:* Geologia de Engenharia e Ambiental, ABGE, 912p.

- Vlach, S. R. F. (2001). Microprobe monazite constraints for an early (ca. 790 Ma) Brasiliano Orogeny: The Embu Terrane, Southeastern Brazil. *In:* III South American Symposium of Isotope Geology, Extended Abstract Volume.
- Wahnfried, I. (2010). Modelo conceitual de fluxo do aquitarde Serra Geral e do Sistema Aquífero Guarani na região de Ribeirão Preto, SP. Tese de Doutoramento. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 135p.
- Williams, J. H. & Paillet, F. L. (2002a). Using flowmeter pulse tests to define hydraulic connections in the subsurface: a fractured shale example. Journal of Hydrology, 265: 100-117.
- Williams, J. H. & Paillet, F. L. (2002b). Characterization of fractures and flow zones in a contaminated shale at the Watervliet Arsenal, Albany County, New York. US Geological Survey Open-File Report 01-385.
- Wyllie, D. C. & Mah. C. W. (2004). Rock slope engineering. Spon Press, 4th edition, London. 456p.
- Young, S. C. & Waldrop, W. R. (1989). An electromagnetic borehole flowmeter for measuring hydraulic conductivity variability. *In:* Conference Proceedings for New Field Techniques for quantifying the Physical and Chemical Properties of Heterogeneous Aquifers. Water Well Journal Publishing Company, Dallas, TX. pp. 463-474.
- Zeeb, C; Gôckus, D.; Bons, P.; Ajmi, H. A.; Rausch, R.; Blum, P. (2010). Fracture flow modelling based on satellite images of the Wajid Sandstone, Saudi Arabia. Hydrogeology Journal, 18 (7): 1699-1712.
- Zhang, K.; Wu, Y.S.; Houseworth, J. E. (2006). Sensitivity analysis of hydrological parameters in modeling flow and transport in the unsaturated zone of Yucca Mountain, Nevada, USA. Hydrogeology Journal, 14: 1599-1619.