



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA
DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

RBGEA

REVISTA BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

Volume 11 (01)

2021

ISSN 2237-4590

DOI: 10.29327/241867.11.1



**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA
DE ENGENHARIA E AMBIENTAL**

REVISTA BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

Publicação Científica da Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental

EDITORES

Prof. Dra. Alessandra Cristina Corsi – IPT
Prof. Dr. Eduardo Soares de Macedo – IPT
MSc. Erik Wunder – Estelar Engenheiros Associados

REVISORES

Adalberto Aurélio Azevedo – Consultor	João Francisco Alves Silveira – Consultor
Alberto Pio Fiori – UFPR	Jorge Kazuo Yamamoto – USP
Aline Freitas da Silva – DRM-RJ	José Alcino Rodrigues de Carvalho – Univ. Nova de Lisboa (Port.)
Andrea Valli Nummer – UFSM	José Augusto de Lollo – UNESP
Angelo José Consoni – TSAP	José Domingos Gallas – USP
Antonio Cendrero – Univ. da Cantabria (Espanha)	José Eduardo Zaine – UNESP
Antonio Manoel Santos Oliveira – UNG	José Luiz Albuquerque Filho – IPT
Candido Bordeaux Rego Neto – IPUF	Kátia Canil – UFABC
Carlos Geraldo Luz de Freitas – IPT	Leandro Eugênio da Silva Cerri – Consultor
Clovis Gonzatti – CIENTEC	Luis de Almeida Prado Bacellar – UFOP
Denise de la Corte Bacci – USP	Luiz Fernando D’Agostino – SENAI
Diana Sarita Hamburger – UFABC	Luiz Nishiyama – UFU
Dirceu Pagotto Stein – Geoexec	Malva Andrea Mancuso – UFSM
Edilson Pissato – USP	Marcelo Denser Monteiro – Metrô – SP / UAM
Eduardo Brandau Quitete – IPT	Marcilene Dantas Ferreira – UFSCar
Eduardo Goulart Collares – UEMG	Marcio A. Cunha – Consultor
Emilio Velloso Barroso – UFRJ	Maria Heloisa B.O. Frascá – Consultora
Eraldo L. Pastore – Consultor	Marta Luzia de Souza – UEM
Fábio Soares Magalhães – Walm Engenharia	Nelson Meirim Coutinho – GEORIO
Filipe Antonio Marques Falcetta – IPT	Newton Moreira de Souza – UnB
Flávio Almeida da Silva – Engecorps	Noris Costa Diniz – UnB
Frederico Garcia Sobreira – UFOP	Reinaldo Lorandi – UFSCar
Ginaldo Campanha – USP	Renato Luiz Prado – USP
Helena Polivanov – UFRJ	Ricardo Vedovello – IG/SIMA
Jair Santoro – IG/SIMA	Yociteru Hasui – Consultor

APOIO EDITORIAL

Denise Amaral e Didiana Dórea

PROJETO GRÁFICO E DIAGRAMAÇÃO

Rita Motta – Editora Tribo da Ilha

Volume 11 (01)

2021

ISSN 2237-4590

DOI: 10.29327/241867.11.1



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA
DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

DIRETORIA ABGE GESTÃO 2021/2022

Presidente: Delfino Luiz Gouveia Gambetti
Vice Presidente: Fernando Facciolla Kertzman
Diretora Secretária: Marcela Penha Pereira Guimaraes
Diretora Financeira: Silvia Maria Kitahara
Diretora de Comunicação: Maria Heloisa B. Oliveira Frascá
Diretor de Eventos: Otávio C. Brasil Gandolfo

Conselho Deliberativo da ABGE: Ana Elisa Abreu, Delfino Luiz Gouveia Gambetti, Fabio Augusto Gomes Vieira Reis, Fernando Facciolla Kertzman, Iramir Barba Pacheco, Ivan José Delatim, João Antônio Curtis, João Paulo Monticeli, José Luiz Albuquerque Filho, José Tarcísio de Melo Pinheiro, Marcela Penha Pereira Guimarães, Maria Heloisa B. Oliveira Frascá, Otávio C. Brasil Gandolfo, Renata Augusta Rocha N. de Oliveira, Ricardo Antônio Abrahão, Ricardo Vedovello e Silvia Maria Kitahara.

NÚCLEO RIO DE JANEIRO

Presidente: Marcela Tuler Castelo Branco
Conselho Deliberativo: Thiago Dutra dos Santos, Aline Pimentel da Silva, Altair Carrasco de Souza, Ana Caroline Duarte Dutra, Analice Ramos Pereira Gomes, Cristiane Tinoco dos Santos, Giovanna Tristão da Cunha, Nelson Meirim Coutinho e Raquel Batista Medeiros da Fonseca.

NÚCLEO MINAS GERAIS

Presidente: Romildo Dias Moreira Filho
Conselho Deliberativo: Frederico Nascimento Mendes Bezerra, Ellen Delgado Fernandes, Alberto Ferreira do Amaral, Ângelo Almeida Zenobio, Fabio Soares Magalhães, Inácio Diniz Carvalho, Luís de Almeida P. Bacellar, Maria Giovana Parizzi, Thiago Baptista Teixeira e Yan Lucas de Oliveira Pereira dos Santos.

NÚCLEO SUL

Presidente: Erik Wunder
Conselho Deliberativo: Débora Lamberty, Adriana Ahrendt Talamini, Mariano Badalotti Smaniotto, Malva A. Mancuso, Andréa V. Nummer, Cezar Augusto Burkert Bastos, Adelir José Strieder e Karina Retzlaff Camargo.

NÚCLEO CENTRO OESTE

Presidente: Gabriel do Nascimento Ribeiro
Conselho Deliberativo: Bruna Maria Cruz Fernandes, Caiubi Emanuel Souza Kuhn, Patrícia de Araújo Romão, Rodrigo Luiz Gallo Fernandes, Diogo Eduardo de Oliveira Martins, Raphael Teixeira de Paiva Citon e Kurt João Albrecht.

NÚCLEO NORTE

Presidente: Dianne Danielle Farias Fonseca
Conselho Deliberativo: Milena Marília Nogueira de Andrade, Sheila Gatinho Teixeira, Claudio Fabian Szlafsztain, Elton Rodrigo de Andretta, Iris Celeste Nascimento Bandeira e José Sidney Barros.

SECRETARIA ABGE

Gerente Executiva: Luciana Marques
Analista Administrativa: Didiana Dórea
Estagiária Administrativa: Denise Amaral

ABGE Central

Av. Prof. Almeida Prado, 532 | Prédio 36 | Cidade Universitária | São Paulo – SP
Fones: (11) 3767-4361 | (11) 3719-0661
E-mail: abge@abge.org.br | Site: abge.org.br



APRESENTAÇÃO

Sejam bem vindos à primeira edição de 2021 da RBGEA – Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental.

Esta edição conta com 6 artigos técnico-científicos que apresentam temas da geologia aplicada à ocupação urbana, à cartografia geotécnica, à geotecnia de mineração, à engenharia de túneis e ao uso de métodos geofísicos para investigação de áreas contaminadas.

Marques e colaboradores apresentam um estudo da erodibilidade no Parque Nacional Municipal das Timbaúbas, localizado no município de Juazeiro do Norte, no sul do Ceará, através de ensaios de Inderbtizen e ensaios de sucção em amostras deformadas e indeformadas do solo. Sandre e colaboradores fazem uma consolidação em ambiente SIG dos dados reunidos pelo mapeamento de riscos associados a escorregamentos em áreas de encosta e margens de córregos com as informações referentes a mapeamentos de suscetibilidade, vulnerabilidade social e vulnerabilidade física do município de São Paulo. Oliveira e Aguiar nos oferecem um método para a avaliação do potencial de aderência dos materiais terrosos (clogging) nas partes frontais de tuneladora e falam da importância de avaliar esta característica dos solos coesivos desde as fases iniciais de um projeto de escavação por tuneladoras TBM-EPB.

Aquino e colaboradores nos mostram os conceitos e os campos de aplicação da geofísica ambiental, dando especial ênfase àqueles métodos aplicáveis aos estudos de contaminação do espaço subterrâneo, além de indicar a norma nacional e os guias internacionais para orientação da aplicação da geofísica aos trabalhos de investigação ambiental. Libardi

e colaboradores apresentam imagens obtidas por televisionamento óptico de furos de sondagens executadas em jazidas de ferro do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais pelas quais foram desenvolvidos trabalhos de identificação e orientação das estruturas geológicas e análises cinemáticas para avaliar os tipos potenciais de ruptura dos taludes de cava de mineração.

Em nosso artigo em língua inglesa, Oliveira e Cunha apresentam um histórico da aplicação da geologia ao uso e ocupação do meio urbano e uma avaliação sobre a legislação do Distrito Federal em relação aos produtos gerados pela cartografia geotécnica.

Na seção Nossa História, abrimos espaço para a comemoração dos 60 anos do Comitê Brasileiro de Barragens – CBDB, cuja história, desde a sua criação, tem profunda interação com a geologia de engenharia, registrada pela participação de associados da Associação Paulista de Geologia de Engenharia – APGE como membros do Conselho do CBDB de 1961. Continuando com este entrosamento, a RBGEA publica nesta edição as palavras do Engenheiro José Bernardino Botelho, atual presidente do CBDB, e do nosso presidente da ABGE, Engenheiro Delfino Luiz Gouveia Gambetti. A revista publica também o trabalho do Geraldo Magela Pereira que nos conta uma breve história das usinas hidrelétricas.

Na seção Contribuições e Reflexões, publicamos o texto instigante do geólogo Leandro Cerri intitulado “O que acontece quando o aluno descobre que não aprendeu tudo o que deveria ter aprendido no curso?” que corresponde a um trecho de seu livro “Guia do Profissional Essencial: 5 passos para estru-

turar sua carreira no mercado pós-pandemia” e o texto de Malena D’Elia Otero e de Victor Arroyo da Silva do Vale que nos apresenta o comitê de jovens da Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, a ABGE Jovem, que assume a missão de aproximar os jovens profissionais da geologia aplicada à ABGE e aos profissionais mais experientes, consistindo, desta forma, um importante meio de transmissão de experiências e integração entre gerações.

Participe de nossa revista enviando seu artigo técnico, seu texto de reflexão, seu comentário ou sua sugestão para que possamos juntos fazer da RBGEA a revista de divulgação e integração da Geologia de Engenharia e Ambiental no Brasil.

Desejamos a todos uma ótima leitura.



SUMÁRIO

4 APRESENTAÇÃO

ARTIGOS CIENTÍFICOS

- 8** ANÁLISE DO POTENCIAL DE ERODIBILIDADE DE UM SOLO DE JUAZEIRO DO NORTE, CEARÁ
Maria dos Anjos de Sousa Marques Sobrinha
Ana Patrícia Nunes Bandeira
João Barbosa de Souza Neto
Sávilla Vieira Costa
Mateus Evangelista da Silva
- 23** CORRELAÇÕES ENTRE RISCO, SUSCETIBILIDADE E VULNERABILIDADE A ESCORREGAMENTOS NO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO
Lucas Henrique Sandre
Alfredo Borges de Campos
Eduardo Soares de Macedo
- 39** ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE CLOGGING E TRABALHABILIDADE DE MATERIAIS COESIVOS PARA ESCAVAÇÕES COM TUNELADORA EPB
Daniela Garroux Gonçalves de Oliveira
Gustavo Aguiar
- 62** GEOTECHNICAL MAPPING AND ITS APPLICATION IN CITY PLANNING AND ASSOCIATED LEGISLATION
Bruno Rodrigues de Oliveira
Yamila Khrisna Oliveira do Nascimento Cunha
- 74** MÉTODOS DA GEOFÍSICA AMBIENTAL APLICADOS À INVESTIGAÇÃO DE CONTAMINAÇÃO SUBTERRÂNEA
Wagner França Aquino
Márcio Corrêa da Silva
Douglas Bastianon
Paulo Sérgio Tonello

- 98** UTILIZAÇÃO DO TELEVISIONAMENTO ÓPTICO DE FUROS DE SONDAÇÃO NA AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DE TALUDES EM DEPÓSITOS DE FERRO
Douglas Marcel Quatiabara Sander Libardi
Paulo Salvadoretti
George Olufunmilayo Gasper
Oluwafemi Shekoni Ayodeji
André Cezar Zingano
João Felipe Coimbra Leite da Costa
Elias Kasparj Pooter

SEÇÃO ESPECIAL - 60 ANOS DO COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS

- 114** COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS 60 ANOS
Delfino Luiz Gouveia Gambetti

- 116** PALAVRAS DO PRESIDENTE DO CBDB
José Bernardino Botelho

- 117** HISTÓRIA DAS USINAS HIDRELÉTRICAS
Geraldo Magela Pereira

CONTRIBUIÇÕES E REFLEXÕES

- 129** O QUE ACONTECE QUANDO O ALUNO DESCOBRE QUE NÃO APRENDEU TUDO O QUE DEVERIA TER APRENDIDO NO CURSO?
Leandro Cerri

- 131** ABGE JOVEM: A UNIÃO DE JOVENS PROFISSIONAIS EM TEMPOS DE DISTANCIAMENTO SOCIAL
Malena D'Elia Otero
Victor Arroyo da Silva do Vale

ANÁLISE DO POTENCIAL DE ERODIBILIDADE DE UM SOLO DE JUAZEIRO DO NORTE, CEARÁ

ASSESSMENT OF POTENTIAL OF THE ERODIBILITY
OF A SOIL IN JUAZEIRO DO NORTE, CEARÁ STATE

MARIA DOS ANJOS DE SOUSA MARQUES SOBRINHA

(Universidade Federal do Cariri, Juazeiro do Norte, Ceará, Brasil, mariadosanjoss19@gmail.com)

ANA PATRÍCIA NUNES BANDEIRA

(Universidade Federal do Cariri, Juazeiro do Norte, Ceará, Brasil, ana.bandeira@ufca.edu.br)

JOÃO BARBOSA DE SOUZA NETO

(Universidade Federal do Cariri, Juazeiro do Norte, Ceará, Brasil, joao.barbosa@ufca.edu.br)

SÁVILLA VIEIRA COSTA

(Universidade Federal do Cariri, Juazeiro do Norte, Ceará, Brasil, savillacosta@gmail.com)

MATEUS EVANGELISTA DA SILVA

(Universidade Federal do Cariri, Juazeiro do Norte, Ceará, Brasil, mateus905@hotmail.com)

RESUMO ABSTRACT

O crescimento populacional das áreas urbanas tem provocado modificações ambientais decorrentes da ocupação desordenada, causando vários problemas, como os processos erosivos. No município de Juazeiro do Norte, sul do Ceará, o Parque Natural Municipal das Timbaúbas, apesar de ser Unidade de Conservação de Proteção Integral, com maior área verde do município, apresenta diversas erosões hídricas em forma de sulcos e ravinas. Neste contexto, este trabalho apresenta um estudo da erodibilidade do solo do Parque Natural Municipal das Timbaúbas, realizado por meio de ensaios básicos de caracterização do solo, ensaios de Inderbitzen e ensaios de sucção, realizados em amostras deformadas e indeformadas de solos. Resultados dos ensaios mostraram tratar-se de um solo arenoso silto-so (SM). Por meio do ensaio de Inderbitzen, obteve-se uma taxa de erodibilidade (K) superior a 0,1 g/cm²/min/Pa, classificando o solo com alta suscetibilidade a erosão. Através de ensaios de sucção pelo Método do Papel Filtro, verificou-se que para um teor de umidade

Urban population growth has caused environmental changes resulting from the disordered occupation and has led to several problems such as soil erosion. The Timbaúbas Municipal Nature Reserve, located in the municipality of Juazeiro do Norte, in the southern mesoregion of Ceará, has been presenting several intense erosive outbreaks despite it being classified as a conservation unit and defined as an Integral Protection Area (API), with the largest green area of the municipality, has linear erosion in the form of furrows and ravines. In this context, the present paper studies soil erodibility of The Timbaúbas Municipal Nature Reserve conducted through of the basic physical characterization tests, Inderbitzen tests and suction tests, made in deformed and undisturbed samples. Test results show that it is silty sand (SM) soil. An erodibility rate (K) of greater than 0.1 g/cm²/min/Pa was obtained using the Inderbitzen test, thus classifying the soil as highly susceptible to erosion. Suction tests using Filter Paper Method revealed that

de 0,85% a sucção foi de 944 kPa, enquanto para uma umidade de 8,7% a sucção foi de 13 kPa. Para variação de sucção entre 100 kPa e 10 kPa foi necessário grandes variações de umidade, ou seja, durante o período chuvoso espera-se maiores alterações das características do solo, resultando em uma maior infiltração e menor escoamento superficial, reduzindo a perda de massa por processos erosivos com a continuidade das chuvas. Por meio dos resultados obtidos conclui-se que o solo do Parque das Timbaúbas tem elevada suscetibilidade à erosão, sendo necessárias medidas estruturais para controlar e recuperar essa área antes das ocorrências das primeiras precipitações do período chuvoso.

Palavras-chave: Erosão, Ensaio de Laboratório, Inderbitzen, Papel Filtro, Sucção.

for 0.85% moisture content the suction was 944 kPa whereas for 8.7% humidity the suction was 13 kPa. For suction variation between 100 kPa and 10 kPa, large humidity variations were required. In other words, greater changes in soil characteristics are expected during the rainy season, resulting in greater infiltration and lower surface flow, leading to reduced mass loss caused by the continuous rain erosion. Results show that The Timbaúbas's Reserve soil is highly prone to erosion, requiring structural measures to control and recover its area ahead of the first precipitations during the rainy season.

Keywords: Erosion, Laboratory Tests, Inderbitzen, Filter Paper, Suction.

1 INTRODUÇÃO

Nas grandes cidades brasileiras o crescimento populacional tem provocado diversas modificações ambientais, ocasionadas principalmente pela ocupação desordenada, devido à falta de um planejamento urbano adequado. Consequentemente, isso favorece a ocorrência de diversos problemas ambientais, estando entre eles os processos erosivos.

Na zona urbana da Região do Cariri, interior do Ceará, as chuvas concentradas ocasionam arrasto de materiais livres da superfície, em decorrência do aumento do escoamento superficial devido ao uso e ocupação inadequados do solo, causando erosões hídricas em diversas áreas da região. Isso é o que vem ocorrendo no Parque Natural Municipal das Timbaúbas, localizado no

município de Juazeiro do Norte, que, apesar de ser instituído como Unidade de Conservação de Proteção Integral, apresenta diversos processos erosivos hídricos em forma de sulcos e ravinas.

Por meio do conhecimento dos danos e prejuízos que os efeitos da erosão ocasionam, afirma-se a necessidade do aprofundamento no estudo das causas e efeitos, para recuperação de áreas já afetadas por esse processo, assim como a busca por medidas para amenizar os seus efeitos danosos. Diante do exposto, este trabalho apresenta resultados de um estudo da erodibilidade do solo do Parque Natural Municipal das Timbaúbas, a fim de compreender o mecanismo das erosões que vem ocorrendo no local. As Figuras 1 e 2 apresentam, respectivamente, a localização da área de estudo e um detalhe do processo erosivo existente na área.

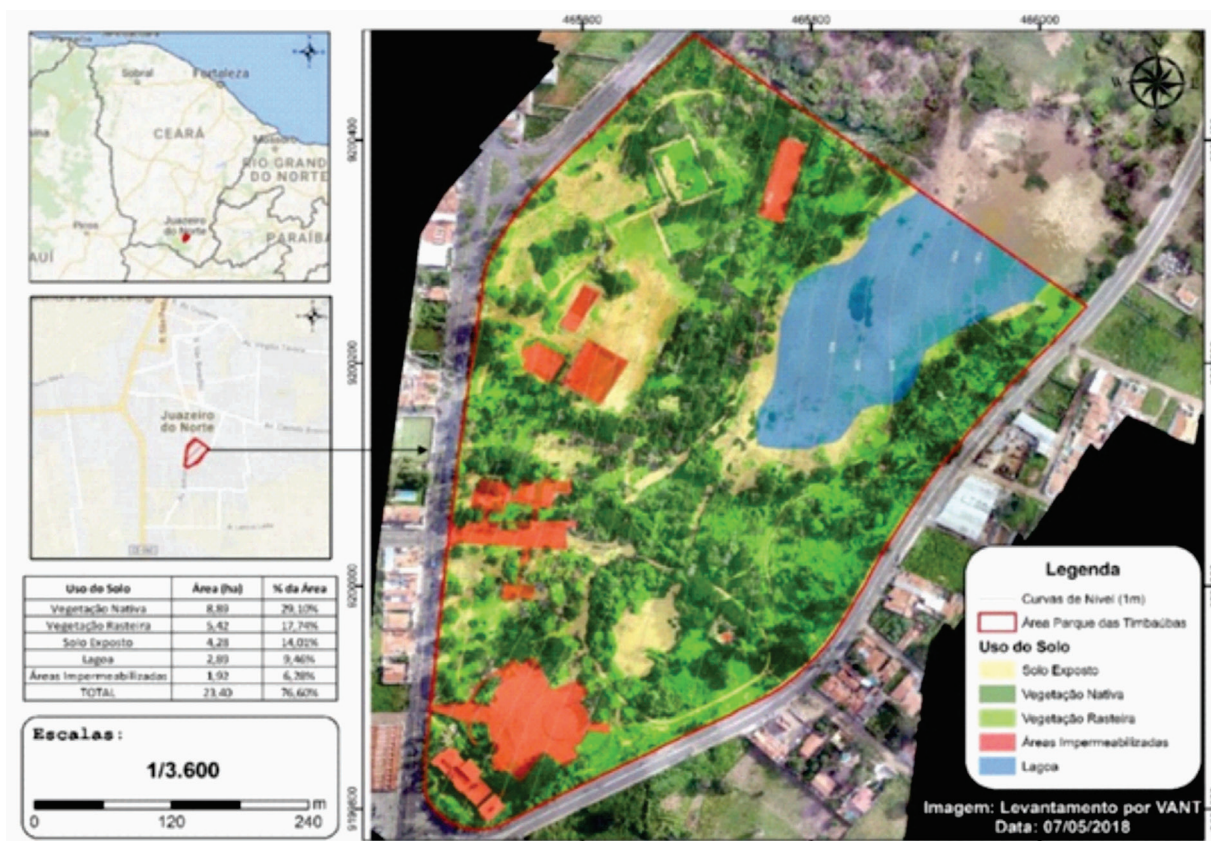


Figura 1. Localização do Parque Natural Municipal das Timbaúbas em Juazeiro do Norte, Ceará.

Fonte: Macedo (2019)



Figura 2. Erosão no Parque Natural Municipal das Timbaúbas.

Fonte: Macedo *et al* (2019)

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Conceitos de erosão

Bastos (1999) define erosão como sendo um conjunto de processos que são responsáveis pela desagregação, transporte e deposição de materiais através de agentes erosivos, tais como a água, vento e gelo. Quando o agente erosivo é a água, o processo erosivo é denominado de erosão hídrica. A erosão hídrica, por sua vez, pode ser classificada quanto à forma, pode ser laminar ou linear. A erosão laminar ocorre em área maior, conhecida também como erosão em lençol; enquanto a erosão linear é mais concentrada, formando sulcos, ravinas e voçorocas (Demarchi *et al.*, 2019).

A erosão caracterizada como sulco é um processo que ocorre em campos inclinados, onde os canais se formam com alguns centímetros de profundidade. Já o ravinamento corresponde ao canal de escoamento pluvial concentrado, podendo atingir até alguns metros de profundidade. Araujo *et al.* (2010) diz que os ravinamentos são canais visíveis e bem definidos, onde ocorre a remoção de solo pela ação da água e há concentração do fluxo sobre o solo, enquanto Magalhães (2001) admite que a voçoroca é a passagem do processo de ravinamento até atingir o lençol freático, tendo contribuições das águas superficiais e de subsuperfície no processo.

Para Camapum de Carvalho *et al.* (2006), a erosão é um fenômeno natural que promove a alteração do relevo, ou seja, trata-se de um agente de formação do relevo. Para Jorge e Guerra (2013), embora as erosões sejam consideradas fenômenos naturais, elas passam a ser um problema para os recursos ambientais quando as taxas de perda de solo ultrapassam os níveis naturais. Normalmente relacionada ao uso e ocupação inadequados do solo, vindo causar diversos danos ambientais.

2.2 Fatores condicionantes

A erosão ocorre devido a diversos fatores, tais como: clima, relevo, cobertura vegetal, ação antrópica e natureza do solo (Bertoni e Lombardi Neto, 1985 e Guerra e Mendonça, 2004). As características desses fatores agindo de forma associada podem acelerar os processos erosivos.

Quanto ao clima, Fendrich *et al.* (1991) afirmam que regiões de climas úmidos, tropical quente e temperado, com inverno seco e verão chuvoso apresentam uma maior propensão à erosão hídrica, que podem ocorrer em forma de sulcos, ravinas e voçorocas. Ainda no fator climático, o aspecto que apresenta uma maior influência no processo da erosão é a precipitação, que atua promovendo o desprendimento das partículas de solo, tanto pelo impacto das gotas de chuva (splash ou salpicamento) quanto pela formação do escoamento superficial (Couto, 2015). Para Guerra e Mendonça (2004) a intensidade, duração, frequência, particularidades das gotas de chuva e a energia cinética da chuva natural são importantes características que influenciam na intensidade das erosões hídricas pluviais.

Quanto ao relevo, esta característica é de grande influência no processo de erosão do solo, visto que intervém na velocidade do escoamento superficial a partir da declividade e o comprimento da rampa. Os terrenos que apresentam maior capacidade erosiva são terrenos mais acidentados, devido a maior facilidade de escoamento superficial; porém um terreno de baixa declividade poderá apresentar elevada intensidade erosiva (Infanti Júnior e Fornasari Filho, 1998), caso as propriedades da superfície conduzam a um grande escoamento superficial, como a impermeabilização e compactação de áreas e o efeito da sucção do solo.

No caso cobertura vegetal, Mannering e Meyer (1963) afirmam que a vegetação na superfície do solo impede o impacto direto das gotas de chuva e dissipa a sua energia, diminuindo a desagregação das partículas, tratando-se de uma defesa natural do solo contra o processo de erosão, conforme corrobora Pellegrini (2006). Segundo Bertoni e Lombardi Neto (1985), a cobertura vegetal provoca efeitos tais como: barreira física de proteção do solo, impedindo que as gotas de chuva atinjam o solo diretamente; dispersão da água através da interceptação e evaporação antes que atinja o solo; formação de canais no solo, a partir das raízes, aumentando a infiltração da água; diminuição da velocidade de escoamento devido ao aumento do atrito na superfície. Os autores ainda afirmam que a retirada dessa cobertura vegetal poderá contribuir diretamente para que o

processo erosivo ocorra, devido à alteração da velocidade de escoamento superficial da água. Para García-Ruiz (2010), a preservação da vegetação auxilia efetivamente na redução do escoamento superficial e conseqüentemente no transporte de sedimentos.

No que se refere ao fator antrópico, este é um dos principais fatores que contribui para o agravamento da intensidade dos processos de erosão, devido ao uso e ocupação inadequados do solo. Mota (1991) destaca algumas ações antrópicas inadequadas, sendo elas: desmatamento da mata ciliar, de terrenos de encostas; agricultura, através do cultivo impróprio de culturas; agropecuária; movimentos de terra de maneira inadequada; modificação do escoamento natural das águas, por meio de cortes e aterros; impermeabilização do solo com as pavimentações e execução de obras para ocupação sem coleta e destinação correta das águas pluviais.

Outro fator que interfere nas erosões trata-se da natureza do solo, que está diretamente ligada ao fenômeno de erodibilidade, consistindo no conjunto de características intrínsecas ao solo que determinam a suscetibilidade a erosão. Couto (2015) define a erodibilidade como sendo a maior ou menor facilidade com que o solo tende a sofrer erosão. As propriedades físicas, químicas e biológicas interferem nos processos de erosão, que ocorrem de forma diferenciada para os vários tipos de solos, visto que cada um possui um diferente processo de formação. Dentre as propriedades físicas que estão relacionadas ao processo, Bertoni e Lombardi (2005), enfatiza a estrutura, textura, permeabilidade e densidade. Llopis Trillo (1999) afirma que a estrutura está relacionada ao arranjo das partículas de solo, sendo um fator que condiciona propriedades como permeabilidade, densidade e sucção. O mesmo autor traz uma classificação para o potencial de erosão em função da textura do solo, sendo mais erodíveis os solos não coesivos, pela facilidade do desprendimento das partículas.

2.3 Métodos de avaliação e estimativa da erodibilidade

Os métodos de avaliação e estimativa do potencial de erodibilidade do solo estão associados a

ensaios de laboratório e de campo. No laboratório destacam-se os ensaios de caracterização do solo, Crumb Test, Slaking Test, resistência ao cisalhamento, sucção e Inderbtizen. Para Jacintho *et al* (2006), a propriedade física mais relevantes em relação à erosão consiste na distribuição dos poros, visto que parâmetros importantes para a compreensão do processo erosivo tais como sucção, coesão e permeabilidade, podem ser alterados devido a presença de macroporos interconectados. No campo ensaios de simulações de escoamentos, em parcelas erosivas, têm sido realizados por diversos pesquisadores. No presente trabalho será apresentado resultados de ensaios básicos de caracterização do solo, ensaios de sucção e ensaios de Inderbtizen, estando o referencial teórico limitado a esses ensaios.

2.3.1 Estimativa da potencialidade à erosão por meio de ensaios básicos de caracterização

Os ensaios de caracterização básica do solo são de fundamental importância, sendo comumente os primeiros ensaios a serem realizados em laboratório, com o intuito de classificar o solo e conhecer suas propriedades básicas, que influenciam na suscetibilidade do solo à erosão. Nesse grupo de ensaios enquadram-se: a análise granulométrica, Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade, Densidade real dos grãos. Por meio dos resultados obtidos nesses ensaios é possível classificar o solo pelo Sistema de Classificação Unificado dos Solos (SUCS) e estimar a potencialidade aos processos erosivos, segundo proposto por Llopis Trillo (1999).

Llopis Trillo (1999) relaciona a classificação do solo com a sua erodibilidade, sendo considerado mais erodíveis os solos com textura predominante de areia e silte, em que a baixa parcela de coesão, em comparação aos solos argilosos, e a massa menos pesada, em comparação aos pedregulhos, facilitam o processo de desagregação e transporte dos sedimentos. Neste contexto, solos classificados como ML (silte de baixa compressibilidade), MH (silte de alta compressibilidade), SM (areia siltosa) e SC (areia argilosa) são os mais erodíveis.

2.3.2 ENSAIO DE INDERBITZEN

O ensaio de Inderbitzen tem por finalidade avaliar a erodibilidade do solo por meio da simulação do efeito do escoamento superficial sobre o solo, submetendo uma amostra a condições que influenciam no processo erosivo, tais como vazão, inclinação da rampa e duração do escoamento. Diversos autores apresentam resultados de pesquisas sobre erodibilidade dos solos, em áreas rurais e urbanas, com a utilização deste ensaio, tais como os trabalhos de Fácio (1991), Bastos (1999), Lafayette (2006) e Meira (2008).

O ensaio de Inderbitzen foi desenvolvido em 1961 por Anton L. Inderbitzen através do estudo da erosão superficial do solo em sua publicação *An erosion test for soils*. O ensaio é utilizado para avaliar o índice de erodibilidade dos solos a partir de um canal hidráulico artificial. O precursor na utilização deste ensaio no Brasil foi Rego (1978), aplicando-o no estudo de erosões superficiais de taludes em solos residuais de gnaiss, no estado do Rio de Janeiro.

O ensaio de Inderbitzen é realizado através da utilização de uma rampa hidráulica com uma amostra de solo posicionada na parte inferior, onde será atingida uniformemente por uma lâmina d'água, simulando um escoamento e causando a erosão superficial do solo por um determinado tempo. Gomes (2006) ressalta que tal ensaio não leva em consideração a influência do impacto das gotas da chuva sobre o solo, responsável por desagregar partículas do solo. Portanto, o experimento consiste em uma aproximação da quantidade de sedimentos no escoamento superficial. A Figura (3) mostra um modelo de uma rampa hidráulica utilizada para a realização do ensaio.

Os resultados desse ensaio permitem construir um gráfico Tensão Cisalhante Hidráulica (τ_h) versus Perda de Solo (por idade de área e tempo de ensaio), sendo a Tensão Cisalhante Hidráulica dada pela equação (1).

$$\tau_h = \gamma_w \times h \times d \quad (1)$$

Onde:

γ_w é o peso específico da água em kN/m³;

h é altura da lâmina de fluxo em metros;

d é a declividade da rampa em graus.

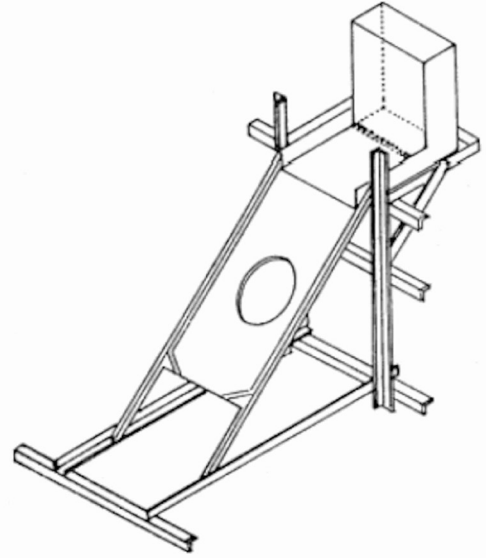


Figura 3. Rampa Hidráulica Utilizada no Ensaio de Inderbitzen.

Fonte: Fonseca e Ferreira (1981)

A partir do gráfico Tensão Cisalhante Hidráulica (τ_h) versus Perda de Solo determina-se a taxa de erodibilidade (K), que corresponde ao valor do coeficiente angular da equação da reta que melhor ajuste os pontos. Bastos (1999) classifica o potencial de erodibilidade dos solos em três classes distintas, em função da taxa de erodibilidade (K), conforme apresentada na tabela (1).

Tabela 1. Taxa de erodibilidade e classificação dos solos segundo Bastos (1999)

Taxa de erodibilidade (K) (g/cm ² /min/Pa)	Classificação
$K < 0,001$	baixa erodibilidade
$0,001 \leq K \leq 0,1$	mediana erodibilidade
$K > 0,1$	alta erodibilidade

2.3.3 Ensaio de sucção pelo método do papel filtro

Nos solos não saturados, quando o solo se encontra com baixo teor de umidade natural, o parâmetro de sucção intra-agregado (pressão neutra negativa) dificulta o processo de infiltração da água aumentando, conseqüentemente, o escoamento superficial e a perda de massa do solo (Bastos, 1999). Basicamente, a sucção dos solos é uma quantidade energética para avaliar a sua

capacidade de reter água. Quando a água livre migra dentro de um solo, ela pode ser adsorvida ou retida por ele. Para desprender esta água adsorvida, uma energia externa precisa ser aplicada. O valor da energia aplicada por unidade de volume de água para desprendê-la, é chamada de sucção (Lee e Wray, 1995).

Uma das técnicas utilizadas para avaliar a sucção dos solos trata-se da técnica do Papel Filtro, sendo um ensaio bastante simples e econômico, utilizado para determinar as sucções correspondentes às diferentes condições de umidade impostas (Marinho *et al*, 2015). O ensaio tem o objetivo de representar o comportamento da sucção matricial do solo, em que, a partir da amostra indeformada, molda-se um corpo de prova e coloca-o em contato com papel filtro específico

até que a umidade entre eles se estabilize. Bastos (1999), Souza Neto (2004) e Lafayette (2006) apresentam resultados de ensaios de sucção através desta técnica.

Marinho *et al* (2015) afirma que a sucção total é medida sem o contato direto entre o solo e o papel, onde o fluxo se dá por forças osmóticas. Quando ocorre o contato entre ambos, têm-se a sucção matricial, onde o fluxo ocorre por capilaridade. Para a sucção matricial, com o papel filtro em contato direto com o solo, exige-se um tempo de equilíbrio de sete dias, conforme Araújo e Campos (2013).

Para determinação da sucção podem ser utilizadas as equações (2) e (3), conforme os valores dos teores de umidade, segundo recomenda Chandler *et al* (1992).

$$\text{Para } w_{\text{papel}} \leq 47\%: \text{Sucção (kPa)} = 10^{4,84-0,0622 w (\%)} \tag{2}$$

$$\text{Para } w_{\text{papel}} > 47\%: \text{Sucção (kPa)} = 10^{6,05-2,48 w (\%)} \tag{3}$$

A partir dos valores da sucção e da umidade do papel, constrói-se a curva característica do solo de Umidade Volumétrica versus Sucção. A umidade volumétrica consiste no teor de umidade que relaciona o peso da água com o peso seco do solo, sendo calculada a partir do índice de vazios e grau de saturação do solo, conforme a equação (4). O ajuste da curva pode ser realizado utilizando a equação (5), proposta por Van Genuchten (1980), através do método dos mínimos quadrados por processos iterativos. As características do solo influenciam na forma da curva característica, onde solos arenosos possuem grande variação de umidade para pequena variação de sucção e solos argilosos necessitam de pequena variação na umidade para resultar em grande perda de umidade (Souza Neto, 2004). A Figura (4) apresenta exemplos de curvas características típicas de solos.

$$\theta_w = \frac{S \cdot e}{1+e} \tag{4}$$

Onde:

θ_w = umidade volumétrica;

S = grau de saturação;

e = índice de vazios.

$$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha_{vg} \cdot h)^{n_{vg}}]^{m_{vg}}} \tag{5}$$

Onde:

θ_w = umidade volumétrica;

θ_r = umidade residual;

θ_s = umidade volumétrica de saturação;

h = sucção do solo;

α_{vg} , n_{vg} e m_{vg} são parâmetros de ajuste.

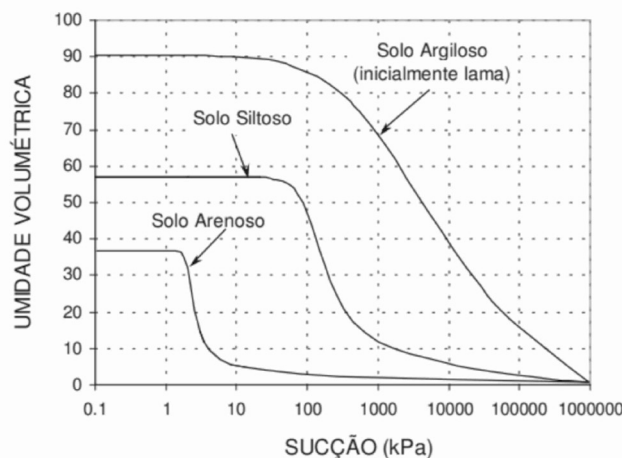


Figura 4. Curvas Características Típicas de Três Solos Distintos.

Fonte: Fredlund e Xing (1994).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização deste trabalho foram coletadas amostras de solo, deformada e indeformada, em área de alta incidência de processos erosivos (Figura 5). As amostras foram coletadas no mês de setembro de 2019, durante a estação seca da região (junho a dezembro), sendo transportadas ao Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal do Cariri (UFCA), onde foram realizados ensaios de caracterização básica, ensaios de Inderbitzen e ensaios de sucção, para a análise da perda de massa e análise da potencialidade do solo aos processos erosivos.



Figura 5. Coleta de Amostras Próximas de um Processo Erosivo (Coordenadas UTM: N. 465597; E. 10800042; Z. 24 S.

Fonte: Os autores (2020).

3.1 Ensaios de caracterização básica

Os ensaios de caracterização básica foram realizados seguindo as recomendações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), sendo eles:

- Preparação das amostras deformadas de acordo com a norma ABNT NBR 6457:2016;
- Análise granulométrica por sedimentação e peneiramento de acordo com a norma ABNT NBR 7181:1984;
- Determinação dos limites de liquidez e plasticidade de acordo com as normas ABNT NBR 6459/84 e ABNT NBR 7180/84 respectivamente;

- Determinação do peso específico real dos grãos e o teor de umidade natural de acordo com as normas ABNT NBR 6508:1994 e ABNT NBR 6457:2016.

3.2 Ensaios de inderbitzen

O equipamento utilizado no ensaio de Inderbitzen consistiu de uma rampa hidráulica de chapa metálica com 20 cm de largura e 120 m de comprimento, com uma abertura na sua parte inferior com diâmetro de 10 cm (Figura 6). Devido ao ensaio não ser normatizado, no presente trabalho foi utilizada basicamente as etapas metodológicas adotadas no trabalho de Lafayette (2006).

Neste estudo foram utilizados dois corpos de prova, sendo um na umidade natural e outro previamente inundado, por um período de uma hora antes do início do ensaio, tempo suficiente para saturar a mostra com textura predominantemente arenosa. A inclinação da rampa adotada no ensaio foi de 45°, visando avaliar a condição mais desfavorável, visto que a área de estudo apresenta pontos de erosão avançada com superfície do terreno com esta declividade. No topo da rampa hidráulica consta um reservatório de água, responsável por proporcionar o fluxo previsto. O controle de vazão se deu por meio de hardware Arduino conectado a um computador e a um sensor de vazão interligado à tubulação de água, esta controlada por um registro manual. O sensor de vazão consistiu de um corpo plástico com um rotor e um sensor de Efeito Hall e seu funcionamento se deu através do número de pulsos emitidos; e através dele determinou-se a vazão no registro. As vazões utilizadas no escoamento foram de 3,5 L/min, 6 l/min e 7 l/min. A determinação da velocidade do escoamento se deu pelo do método do corante, verificando quanto tempo foi necessário para que o corante percorresse uma distância conhecida. O material erodido pelo escoamento foi coletado em tempos de 1 min, 5 min, 10 min e 20 min após o início do ensaio. Posteriormente os materiais foram colocados em cápsulas e levados para a estufa, por um período mínimo de 24 horas, para a determinação da massa seca. Esse procedimento foi realizado para todas as vazões ensaiadas.



Figura 6. Vista do Equipamento de Inderbitzen (UFCA).

Fonte: Os autores (2020)

3.3 Ensaio de sucção pelo método do papel filtro

Para o ensaio de Sucção pelo Método do Papel Filtro, utilizou-se o papel do tipo Whatman Nº42, onde foi medida a sucção matricial, através do contato direto do papel com corpos de prova, em um ambiente hermeticamente fechado, para proporcionar o equilíbrio de pressão.

A curva característica foi determinada a partir de ensaios realizados em 10 corpos de prova indeformados, moldados através de anéis de tubo de PVC biselados, com diâmetro interno de 4,35 cm e altura de 2,42 cm em média (Figura 7). Os corpos de prova tiveram diferentes umidades iniciais, que foram alteradas por meio de processos de umedecimento, através de um pulverizador manual, a partir da amostra seca ao ar livre. O processo de umedecimento levou em consideração o peso da amostra, ou seja, calculou-se o peso necessário para que a amostra atingisse a umidade esperada por meio da adição de água pulverizada. Posteriormente a umidade real foi determinada a partir do peso da amostra antes do ensaio e após a secagem no final.

Durante a preparação dos corpos de prova colocou-se cuidadosamente um papel filtro na

parte superior e outro na parte inferior, posteriormente envolvendo-os com um plástico filme e em seguida lacrando-se com uma fita adesiva, para obter a máxima vedação e a mínima evaporação. A partir do quinto corpo de prova foram postos dois papéis filtro em cada lado, a fim de proteger o solo de perdas, para o papel que seria pesado. Na preparação dos corpos de prova utilizaram-se pinças e luvas durante toda a realização do procedimento, para minimizar a perda de umidade durante o manuseio.



Figura 7. Moldagem do Corpo de Prova para o Ensaio de Sucção.

Fonte: Os autores (2020)

Para o equilíbrio do teor de umidade na amostra, adotou-se um tempo de estabilização padrão de 10 dias. Após este período foram realizadas as pesagens dos papéis em uma balança digital analítica e, posteriormente, colocados em estufa à 105°C por 24h. Após esse tempo, pesaram-se novamente os papéis para determinação do teor de umidade. Para determinação da massa do papel seco utilizou-se um dessecador com sílica em gel como objeto de transporte da estufa até a balança, minimizando a variação da umidade do papel devido à umidade relativa do ar.

Para determinação da sucção foram utilizadas as Equações 1 e 2 propostas por Chandler *et al* (1992). A umidade volumétrica foi calculada conforme a Equação (4) e o ajuste da curva foi realizado utilizando a Equação (5), proposta por Van Genuchten (1980). A partir dos valores da sucção e da umidade do papel, construiu-se a curva característica do solo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização básica

Após a preparação da amostra deformada, realizou-se a análise granulométrica por meio do

peneiramento e da sedimentação do solo, com e sem defloculante (Figura 8). A partir das curvas obteve-se, os percentuais dos materiais constituintes do solo, conforme representados na Tabela (2).

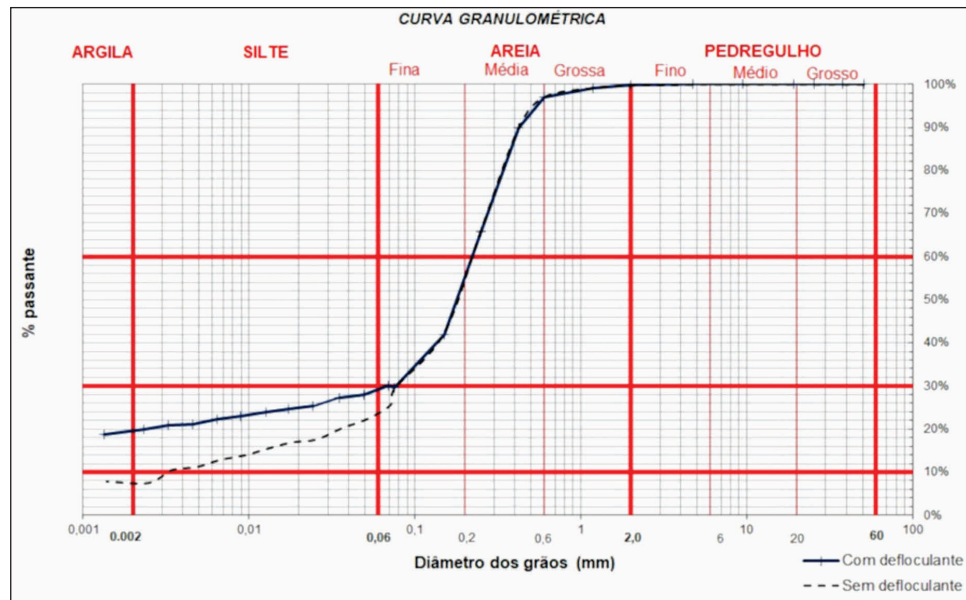


Figura 8. Curva Granulométrica do Solo.

Fonte: Os autores (2020)

Tabela 2. Resultados da Análise Granulométrica.

Materiais	% dos Materiais	
	Com defloculante	Sem defloculante
Pedregulho	0,25	0,25
Areia Grossa	2,71	2,66
Areia Média	42,14	41,79
Areia Fina	25,60	31,30
Silte	9,60	16,27
Argila	19,70	7,73
passa #200	29,59	29,29

Fonte: Os autores (2020)

Com base nos resultados, observa-se que o solo estudado é predominantemente arenoso, pois mais de 50% do seu material encontra-se na faixa entre 0,06 mm a 0,6 mm. O percentual de material argiloso é baixo (<20%), o que caracteriza solos suscetíveis à erosão. O limite de plasticidade (LP) foi de 12,7% e o limite de liquidez (LL) de 16,8%, resultando em um índice de plasticida-

de (IP) de 4,1%, caracterizando-se um solo pouco plástico. De acordo com a Classificação Unificada dos Solos, o solo estudado classifica-se como areia siltosa (SM). Conforme a relação entre a suscetibilidade à erosão e a textura dos solos, proposta por Llopis Trillo (1999), o solo em estudo tem elevada suscetibilidade a processos erosivos.

Observando as duas curvas granulométricas obtidas, conforme o ensaio normatizado e o ensaio realizado sem agitação e sem defloculante, é possível verificar que a sedimentação ocorreu mais rapidamente no ensaio sem agitação e sem defloculante, devido à agregação das partículas mais finas. Por meio desses resultados foi possível obter o valor da porcentagem de dispersão (PD), de acordo com a ABNT NBR 13602/96, sendo a razão entre os percentuais de partículas com diâmetros menores que 0,005 mm obtidos das curvas sem e com defloculante; e a razão de dispersão (RD), obtido através do método proposto por Middleton (1930), sendo a razão entre os percentuais de partículas com diâmetros menores que 0,05 mm obti-

dos das curvas sem e com defloculante 0,05 mm. A Tabela (3) apresenta os resultados. De acordo com Araújo (2000), a amostra de solo analisada foi considerada de baixa erodibilidade (PD<20%); no entanto, pelo critério proposto por Middleton (1930), baseado na Razão de Dispersão (RD), a amostra foi classificada como de solos erodíveis, apresentando RD superior a 15%.

Tabela 3. Resultados dos ensaios de dispersão SCS.

Porcentagem de Dispersão (PD)			Razão de Dispersão (RD)		
Argila (<0,005m) sem dispersão (%)	Argila (<0,005m) com dispersão (%)	PD (%)	Silte+argila (<0,05mm) sem dispersão (%)	Silte+Argila (<0,05mm) com dispersão (%)	RD (%)
3,82	21,20	18,02	12,22	27,96	43,71

Fonte: Os autores (2020)

4.2 Ensaios de inderbitzen

A partir dos ensaios de Inderbitzen foi possível determinar parâmetros relacionados ao escoamento e a erodibilidade dos solos. Os valores de velocidade de escoamento, altura da lâmina d’água e tensão cisalhante hidráulica, para as vazões três adotadas nos ensaios, estão apresentados na Tabela (4).

Tabela 4. Parâmetros do ensaio de Inderbitzen.

i	45°		
Q (l/min)	3,5	6	7
v (cm/s)	95,405	142,417	158,659
h (cm)	0,0306	0,0351	0,0368
τh (Pa)	3,057	3,511	3,677

Fonte: Os autores (2020)

As Figuras (9) e (10) exibem os resultados obtidos nos ensaios de Inderbitzen com a amostra natural e previamente inundada, respectivamente. A partir delas é possível observar que as maiores perdas de massa de solo ocorrem no início do ensaio, quando o primeiro trecho retilíneo apresenta declividade mais acentuada; o mesmo foi observado por Facio (1991). Após 10 minutos

Com relação ao resultado do ensaios de densidade real dos grãos do solo, a densidade das partículas do solo foi de 2,641 g/cm³, o que caracteriza solos com uma mineralogia com predominância de mineral quartzo na sua composição, sendo um tipo de mineral resistente ao desgaste por atrito.

do ensaio, a curva tende a se estabilizar, nos ensaios realizados nas duas amostras. Os resultados mostram que o solo natural apresentou maior perda de massa quando comparado com o ensaio realizado no solo previamente inundado, ou seja, no campo, os solos expostos a longos períodos de seca, são mais suscetíveis a sofrer processos de erosão no início das primeiras chuvas na localidade, sendo, desta forma, recomendável adotar práticas de conservação do solo e medidas para o disciplinamento do escoamento superficial, antes do início do período chuvoso.

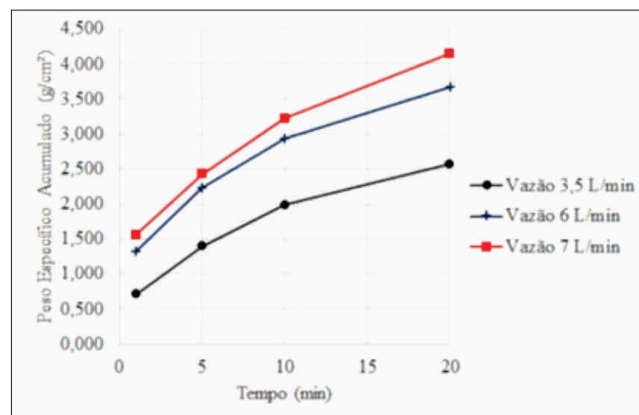


Figura 9. Tempo x Perda de Solo Acumulado Para Amostra Natural.

Fonte: Os autores (2020)

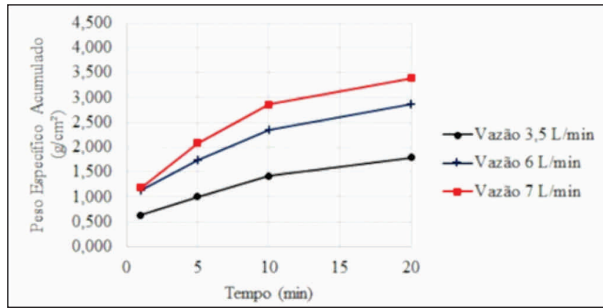


Figura 10. Tempo x Perda de Solo Acumulado Para a Amostra Inundada.

Fonte: Os autores (2020)

A partir dos gráficos da Tensão crítica *versus* Perda de solo acumulado, verificou-se que o solo possui baixos valores de tensões críticas, nos valores de 2,044 Pa para a amostra natural (Figura 11) e 2,359 Pa para a amostra inundada (Figura 12). Com relação à taxa de erodibilidade (K), as amostras apresentaram valores semelhantes; a amostra natural apresentou valor de K igual a 0,1263 g/cm²/min/Pa e a amostra previamente inundada apresentou valor de K igual a 0,1267 g/cm²/min/Pa. De acordo com a proposta de Bastos (1999), a amostra ensaiada pode ser classificada como altamente erodível. A Tabela (5) sintetiza os resultados.

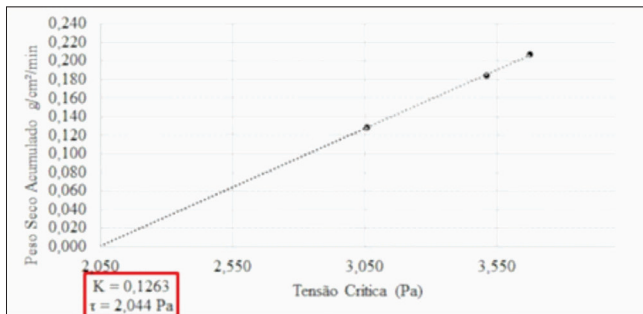


Figura 11. Tensão Crítica x Perda de Solo Para Amostra Natural.

Fonte: Os autores (2020)

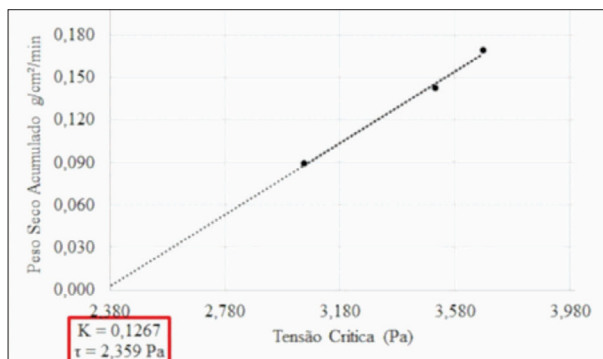


Figura 12. Tensão Crítica x Perda de Solo Para Amostra Inundada.

Fonte: Os autores (2020)

Tabela 5. Valores da Taxa de Erodibilidade (K) e da Tensão Crítica.

Amostra	K (g/cm ² /min/Pa)	Tensão crítica (Pa)
Seca	0,1263	2,044
Inundada	0,1267	2,359

Fonte: Os autores (2020)

4.3 Ensaios de sucção pelo método do papel filtro

O ensaio de sucção permitiu estimar a pressão necessária para o ar deixa de ficar na forma oclusa para uma forma mais contínua, iniciando o processo de dessaturação. Para o solo em estudo esse valor correspondeu à 5 kPa (Figura 13). O comportamento da curva é típico de um solo areno-siltoso, em concordância com sua classificação SUCS de areia siltosa (SM).

De acordo com os resultados obtidos, verificou-se que quando o solo apresentou teor de umidade de 0,85% a sucção foi de 944 kPa; e quando o solo apresentou teor de umidade de 8,7% a sucção de 13 kPa. Na Figura 13 observa-se que entre a sucção de 100 kPa e 10 kPa ocorrem as maiores variações do teor de umidade com a variação de sucção, onde espera-se maiores alterações da características do solo, tais como o coeficiente de permeabilidade e resistência ao cisalhamento; logo, quando a sucção atinge esta faixa de valor, o volume de água escoado diminui, resultando em uma maior infiltração e menor escoamento superficial, reduzindo a perda de massa por processos erosivos.

Quanto maior a sucção maior a dificuldade de infiltração de água, facilitando o escoamento superficial. Os resultados obtidos sugerem concluir que a maior parte da água escoada quando o solo está no período seco, resultando em maior erosão devido ao maior escoamento superficial das águas pluviais. Vale ressaltar que a relação sucção-umidade está diretamente relacionada à distribuição granulométrica, ao índice de vazios, à percentagem de finos e à mineralogia do solo em estudo, de acordo com Menezes (2010).

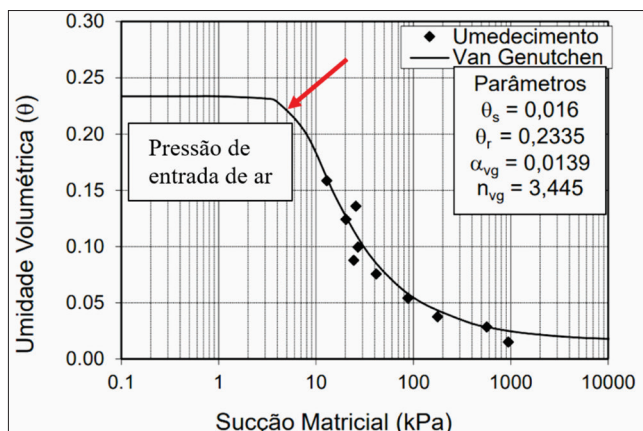


Figura 13. Curva Característica do Solo do Parque Timbaúbas.

Fonte: Os autores (2020)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste estudo permitem concluir que o solo do Parque Natural Municipal das Timbaúbas tem elevado potencial de erosão. Os ensaios de Inderbitzen possibilitaram estimar a perda de massa devido ao escoamento superficial, salientando que a quantidade de massa erodida foi bem significativa.

Na estação seca da região o solo se apresenta em torno de 5% de umidade, ou seja, com elevada sucção; neste período ocorre um maior escoamento superficial devido à redução da permeabilidade, deixando o solo mais suscetível às perdas de massa de solo por erosão. O solo estudado neste trabalho tem elevado potencial aos processos erosivos principalmente no início da estação chuvosa, o que gera a necessidade de adotar medidas para evitar o surgimento de novos processos erosivos e medidas de recuperação para as áreas degradadas, ainda durante a estação seca da região.

Os dados deste estudo trazem um alerta para os gestores de que é necessário adotar ações estruturais e não-estruturais, envolvendo obras de sistemas de drenagem, proteção superficial do solo, práticas de conservação e campanhas educativas; sendo ainda mais importantes por se tratar de um Parque Natural protegido por lei municipal.

REFERÊNCIAS

ARAUJO, Rodrigo da Cruz de. ESTUDO DA ERODIBILIDADE DE SOLOS DA FORMAÇÃO

BARREIRAS - RJ. 2000. 169 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

ARAUJO, G. H. DE. S.; ALMEIDA, J. R. GUERRA, A. J. T. Gestão Ambiental de Áreas Degradadas. 6ª edição. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010.

ARAUJO, R. C.; CAMPOS, T. M. P.. 2013. Uso dos Ensaios de Penetração de Cone, Desagregação, Sucção e Resistência à Tração para Avaliar a Erodibilidade. GEOTECNIA, 67 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2016. NBR 6457. Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2016. NBR 6459. Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1984. NBR 6508. Grãos de solo que passam pela peneira 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2016. NBR 7180. Solo- Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2016. NBR 7181. Solo- Análise granulométrica. Rio de Janeiro.

BASTOS, C. A. B. 1999. Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Geotecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul / UFRGS.

BERTONI, J. & LOMBARD NETO, F.L. 2005. Conservação do solo. 5 ed. São Paulo: Ed. Ícone. 355 p.

BERTONI, J., LOMBARDI NETO, F. 1985. Conservação do solo, 1nd ed., Livroceres, Piracicaba, SP, Brasil, 372 p.

BOARDMAN, J. P. In: A. J. T. GUERRA; SILVA, Antônio Soares e R.G.M. BOTELHO (orgs.). 2009.

- Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos, Temas e Aplicações, 4nd ed., Editora Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J. (Org.); SALES, M. M. (Org.); SOUZA, N. M. (Org.); MELO, M. T. S. (Org.). 2006. Processos erosivos no centro-oeste brasileiro. Brasília: Universidade de Brasília. FINATEC. 464 p.
- CHANDLER, R. J., CRILLY, M. S., MONTGOMERY-SMITH, G. 1992. A low cost method of assessing clay dissection for low-rise buildings. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Vol. 92 n. 2, 82-89 p.
- COUTO, Bruno de Oliveira Costa. Análise de erodibilidade em taludes com horizontes resistentes e suscetíveis aos processos erosivos. 2015. 124f.
- DEMARCHI, J. C.r; PIROLI, E. L.; ZIMBACK, C. R. L. Estimativa de perda de solos por erosão na bacia hidrográfica do Ribeirão das Perobas (SP) nos anos 1962 e 2011. Raega – O Espaço Geográfico em Análise, v. 46, n. 1, p. 110-131, 2019.
- FÁCIO, J. A. 1991. Proposição de uma metodologia de estudo da erodibilidade dos solos do Distrito Federal. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília.
- FENDRICH, R. et al. 1991. Drenagem e controle da erosão urbana, IBRASA, Curitiba, PR, Brasil.
- FONSECA, A. M. M. C. C.; FERREIRA, C. S. M. 1981. Metodologia para determinação de um índice de erodibilidade de solos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: COPPE / UFRJ, CNPq, ABMS, 646-664 p.
- FREDLUND, D.G. AND XING, A. 1994. Equations for the soil-water characteristic curve. Can. Geotechn. J. 31, 521-532 p.
- GARCÍA-RUIZ, J.M. The effects of land uses on soil erosion in Spain: a review. Catena, v. 81, p. 1-11, 2010.
- GOMES, F. S. 2001. Estudo da Erodibilidade e Parâmetros Geotécnicos de um solo em Processo Erosivo. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco.
- GOMES, G. L .M. Diagnóstico de áreas degradadas por voçorocas no município de Alterosa-MG. Dissertação (Mestrado) 2006. 68p. Ribeirão Preto.
- GUERRA, A. J. T., JORGE, M. C. O. 2012. Geomorfologia do cotidiano – a degradação dos solos. Revista Geonorte, Edição Especial, Vol. 4 n. 4, 116-135 p.
- JORGE, M.C.O. & GUERRA, A.J.T. (2013). Erosão dos solos e movimentos de massa – recuperação de áreas degradadas com técnicas de bioengenharia e prevenção de acidentes. Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas. 1a ed. São Paulo: Oficina de Textos, v. 1, pp. 7-30.
- INFANTI JUNIOR, N. & FORNASARI FILHO, N. 1998. Geologia de Engenharia. Capítulo 9: Processos de Dinâmica Superficial. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. São Paulo.
- JACINTHO, E. C. et al. Solos Tropicais e o Processo Erosivo. In: CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M. M.; SOUZA, N. M.; MELO. M. T. S. (Org.). 2006. Processos erosivos no centro-oeste brasileiro. Brasília: Universidade de Brasília: FINATEC, 93-156 p.
- LAFAYETTE, K. P. V. 2006. Estudo geológico-geotécnico do processo erosivo em escostas no Parque Metropolitano Armando de Holanda Cavalcanti. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, 60-229 p.
- LEE, H. C.; WRAY, W. K. 1995. Techniques to evaluate soil suction – A vital unsaturated soil water variable. Unsaturated Soils, v. 2, 615-622 p.
- LLOPIS TRILHO, G. 1999. Control de la Erosión y Obras de Desague. Manual de Estabilización y Revegetación de Taludes. Madri, Entorno Grafico S. L.
- MACEDO, C. C. A. 2019. Diagnóstico da erodibilidade e da qualidade hidrica em uma unidade de conservação municipal. Dissertação de Mestrado,

Programa de Pós- Graduação em Desenvolvimento Regional Sustentável – Proder, Universidade Federal do Cariri, 94 p.

MACEDO, C. C. A., CLARINDO, G. S., BANDEIRA, A. P. N., LIMA, M. G. S. & SOUZA NETO, J. B. 2019. Análise da Potencialidade Erosiva de Um Solo de Uma Unidade de Conservação Municipal. In: IX Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, São Carlos, Brasil.

MAGALHÃES, R. A. Erosão: Definições, Tipos e Formas de Controle. VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão. Goiânia- GO, 03 a 06 de maio de 2001.

MANNERING, J. V.; MEYER, L. D. The effects of various rates of surface mulch on infiltration and erosion. Soil Science Society of American Proceedings, Madison, v.27, n.1, p.84-86, 1963.

MARINHO, F. A. M. et al. Erosão. In: CAMAPUM DE CARVALHO et al. (Orgs.). 2015. Solos não saturado no contexto geotécnico. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica.

MEIRA, F. F. A. (2008). Estudo do processo erosivo em encostas ocupadas. Tese de Doutorado, UFPE. GTG. Engenharia Civil, Recife-PE.

MENDONÇA, J. K. S. e GUERRA, A. J. T. 2004. Erosão dos Solos e a Questão Ambiental. In: Reflexões sobre a Geografia Física no Brasil. GUERRA, A. J. T. e VITTE, Carlos Antônio (orgs.). Ed. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 225-251 p.

MENEZES, M. B. M.; PEJON, O. J.. 2010. Análise da Influência do Teor de Umidade na Absorção D'água e Sucção dos Solos em Estudos de Erodibilidade. Geociências (São Paulo), Vol. 29, n. 2, 211-228 p.

MIDDLETON, H. E. 1930. Properties of soils which influence soil erosion. U.S. Department Agricultural Technical Bulletin, n. 178, 16 p.

MOTA, S. Planejamento Urbano e Preservação Ambiental. 1991. Edições UFC, Fortaleza, Brasil.

PELLEGRINI, André. Sistemas de cultivo da cultura do fumo com ênfase às práticas de manejo e conservação do solo. 2006. 91p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – UFSM, Santa Maria, 2006.

REGO, J. J. V. 1978. Erosão Superficial em Taludes de Corte em Solo Residual de Gnaisse. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

SOUZA NETO, J. B.. 2004. Comportamento de um solo colapsível avaliado a partir de ensaios de laboratório e campo, e previsão de recalques devidos à inundação (colapso). Rio de Janeiro, Brasil.

VAN GENUCHTEN, M. T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 44, 892-898 p.

CORRELAÇÕES ENTRE RISCO, SUSCETIBILIDADE E VULNERABILIDADE A ESCORREGAMENTOS NO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

*CORRELATIONS BETWEEN RISK, SUSCEPTIBILITY AND VULNERABILITY TO LANDSLIDES
IN THE MUNICIPALITY OF SÃO PAULO*

LUCAS HENRIQUE SANDRE

Geólogo – lucashsandre@hotmail.com

ALFREDO BORGES DE CAMPOS

*Geólogo, Professor Doutor – Universidade Estadual de Campinas
– Campinas, SP – Brasil – acampos@ige.unicamp.br*

EDUARDO SOARES DE MACEDO

*Geólogo, Professor Doutor – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do
Estado de São Paulo – São Paulo, SP – Brasil – esmacedo@ipt.br*

RESUMO ABSTRACT

A dificuldade de acesso à moradia nos centros urbanos brasileiros direciona a população mais pobre para a periferia das cidades. Consequentemente, terrenos em encostas íngremes ou em margens de rios acabam sendo ocupados e de maneira precária. A Prefeitura Municipal de São Paulo, por meio do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), realizou, entre 2009 e 2010, um mapeamento de riscos associados a escorregamentos em áreas de encostas e solapamentos de margens de córregos, com o intuito de gerenciar o risco de movimentos de massa na cidade. O presente trabalho utilizou dados deste mapeamento e fez o cruzamento em ambiente SIG com dados referentes a mapeamentos de suscetibilidade, vulnerabilidade social e vulnerabilidade física do município de São Paulo. A análise após este procedimento permitiu identificar uma correlação positiva entre o grau de risco determinado no mapeamento para os setores e a suscetibilidade, vulnerabilidade social e vulnerabilidade física das áreas.

Palavras-chave: Área de Risco; Risco Geológico; Suscetibilidade; Vulnerabilidade; São Paulo

The difficulty of access to housing in Brazilian urban centers drives the poorest population to the periphery of cities. Consequently, land located on steep slopes or riverbanks ends up being precariously occupied. The Municipal Government of São Paulo, through the Institute of Technological Research of the State of São Paulo (IPT), carried out, between 2009 and 2010, a mapping of risks associated with landslides in areas of slopes and riverbanks, in order to manage the risk of mass movements in the city. The present work used data from this mapping and made the crossing of these data in GIS environment with data referring to mappings of susceptibility, social vulnerability and physical vulnerability of the city of São Paulo. The analysis after this procedure allowed to identify a positive correlation between the degree of risk determined in the mapping for the sectors and the susceptibility, social vulnerability and physical vulnerability of the areas.

Keywords: Risk Area; Geological Risk; Susceptibility; Vulnerability; São Paulo

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a dificuldade de acesso à moradia nos centros urbanos faz com que a população mais pobre se direcione para a periferia das cidades. Neste cenário, áreas de encostas ou margens de rios são ocupadas de forma precária. A precariedade da ocupação, representada por taludes de corte íngremes, aterros instáveis, ausência de redes de abastecimento de água e coleta de esgoto, por exemplo, faz com que surjam áreas de risco que, à medida que ocorram períodos de chuvas mais intensas, se tornem palco de graves acidentes. Nesse contexto, os escorregamentos são os acidentes naturais que mais matam no país (Macedo & Mirandola 2018).

Na publicação feita pela UNDRR (2009), acerca da terminologia utilizada em redução de desastres, o risco é definido como a combinação da probabilidade de um evento e suas consequências negativas. Em outras palavras, de acordo com Macedo & Mirandola (2018), o risco geológico (R) pode ser interpretado como a relação entre a probabilidade (P) de ocorrência do acidente associado a um processo geológico, podendo ser induzido, ou não, pelo Homem, e as consequências (C) sociais e/ou econômicas potenciais associadas à ocorrência do acidente. De forma simplificada, o risco pode ser expresso pela relação $R \sim P \times C$.

A fim de gerenciar o risco de movimentos de massa no município de São Paulo, a Prefeitura Municipal de São Paulo, por meio do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), realizou, entre 2009 e 2010, um mapeamento de riscos associados a escorregamentos em áreas de encostas e solapamentos de margens de córregos (IPT, 2010). Neste mapeamento foram identificados 1179 setores de risco, localizados em 26 subprefeituras do município. Nestes setores foram determinados o grau de risco (R1 – baixo, R2 – médio, R3 – alto, ou R4 – muito alto) e o processo geológico ao qual estavam sujeitos (escorregamento e/ou solapamento de margem).

Aprofundar o conhecimento acerca das causas e consequências dos escorregamentos pode subsidiar ações que proporcionem a mitigação do risco de perdas, de modo que, se não erradicado, pelo menos o convívio com o mesmo se torne possível.

De acordo com Santos (2015), para a ocorrência de um desastre, é preciso, primeiramente, um ambiente suscetível à manifestação de um fenômeno natural com possibilidades de deflagrar uma situação de crise. Em segundo lugar, é preciso haver um contexto vulnerável, onde a sociedade não apresente capacidade adequada de resposta a essa situação.

Nesse cenário, um maior entendimento de como cada grau de risco está caracterizado quanto à suscetibilidade e vulnerabilidade se mostra relevante, pois este entendimento pode servir como ferramenta de suporte na determinação do grau de risco de um setor, proporcionando bases ainda mais sólidas para a tomada de decisões quanto ao problema.

Macedo & Bressani (2013) definem suscetibilidade a escorregamentos como uma avaliação quantitativa ou qualitativa do tipo, do volume ou da área, e da distribuição espacial dos escorregamentos que existem ou possam potencialmente ocorrer em uma área. Segundo Bitar (2014), suscetibilidade refere-se à predisposição ou propensão dos terrenos estarem sujeitos ao desenvolvimento de um fenômeno ou processo do meio físico. Em relação à vulnerabilidade, de acordo com Ministério das Cidades & IPT (2007), ela pode ser entendida como o grau de perda para um dado elemento, grupo ou comunidade dentro de uma determinada área sujeita a um fenômeno ou processo. Macedo & Bressani (2013) descrevem a vulnerabilidade como o grau de perda de um dado elemento ou grupo de elementos em uma área afetada pelos perigos do escorregamento, sendo expresso através de uma escala de 0 (sem perda) a 1 (perda total). A publicação da UNDRR (2016), que atualiza algumas terminologias no tema de redução de desastres, define vulnerabilidade como as condições determinadas por fatores ou processos físicos, sociais, econômicos e ambientais que aumentam a suscetibilidade de um indivíduo, comunidade, ativos ou sistemas aos impactos de riscos.

Este estudo apresenta uma caracterização dos setores de risco de escorregamentos mapeados no município de São Paulo quanto à suscetibilidade e vulnerabilidade, tanto social quanto física, utilizando para isso dados do mapeamento de áreas de risco realizado pelo IPT (IPT, 2010), dados do mapeamento de suscetibilidade também

realizado pelo IPT (IPT, 2015) e dados do Índice Paulista de Vulnerabilidade Social realizado pela Fundação Seade (Seade, 2013a). O objetivo foi determinar se há uma correlação entre cada um desses atributos da área e o grau de risco atribuído no mapeamento de áreas de risco.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico serão detalhados os materiais utilizados na elaboração do trabalho, sendo eles a carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa de São Paulo (IPT, 2015), o Índice Paulista de Vulnerabilidade Social 2010 (Seade, 2013a) e o mapeamento de áreas de risco de São Paulo (IPT, 2010); e os métodos adotados para tratar e processar todos esses dados, explicitando as etapas empregadas no geoprocessamento.

2.1 Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa de São Paulo

A carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa de São Paulo utilizada para este trabalho foi elaborada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2015), e está representada pela figura 1. Para o município, a classe de suscetibilidade alta a processos de escorregamento, queda de rocha e rastejo foi definida como áreas de relevo de morrotes baixos, morrotes altos e serras, forma de encostas retilíneas e côncavas, com anfiteatros de cabeceiras de drenagem abruptos, amplitudes de 80 a 340 m e declividades maiores que 25°. A litologia é composta por migmatitos, gnaisses graníticos e gnaisses miloníticos, com densidade de lineamentos/estruturas alta. Os solos apresentam-se pouco evoluídos e rasos. Tais áreas representam 100,1 km², correspondendo a 6,6% da área total do município.

A classe de suscetibilidade média a processos de escorregamento, queda de rocha e rastejo foi

definida como áreas de relevo de morros baixos, morrotes e morrotes altos, forma de encostas convexas a retilíneas e côncavas, com anfiteatros de cabeceira de drenagem, amplitudes de 20 a 180 m e declividades de 10 a 30°. A litologia é composta por migmatitos, gnaisses graníticos, gnaisses miloníticos, micaxisto e/ou meta-arenito e xistos miloníticos, com densidade de lineamentos/estruturas média. Os solos apresentam-se evoluídos e moderadamente profundos. Tais áreas representam 231,2 km², correspondendo a 15,1% da área total do município.

A classe de suscetibilidade baixa a processos de escorregamento, queda de rocha e rastejo foi definida como áreas de relevo de planícies e terraços fluviais, morrotes e colinas, forma de encostas convexas suavizadas e topos amplos, amplitudes maiores que 80 m e declividades menores que 15°. A litologia é composta por aluviões fluviais, argilas, areias e cascalhos, com densidade de lineamentos/estruturas baixa. Os solos são aluviais, ou evoluídos e profundos nas colinas e morrotes. Tais áreas representam 1196,2 km², correspondendo a 78,3% da área total do município.

As zonas apontadas na carta indicam áreas de predominância quanto ao processo analisado, sem determinar a trajetória e o raio de alcance dos materiais mobilizáveis nem a interação entre os processos. A classificação relativa (alta, média, baixa) aponta áreas onde a propensão ao processo é maior ou menor em comparação às outras. Dentro das zonas pode haver áreas com classes distintas, mas sua identificação não é possível devido à escala da carta (1:25000), e a transição entre as classes tende a se apresentar de modo mais gradual no campo. Em tempo, a suscetibilidade baixa não significa que os processos não poderão ocorrer em seu domínio, pois a dinâmica pode ser alterada devido às atividades humanas (Bitar, 2014).

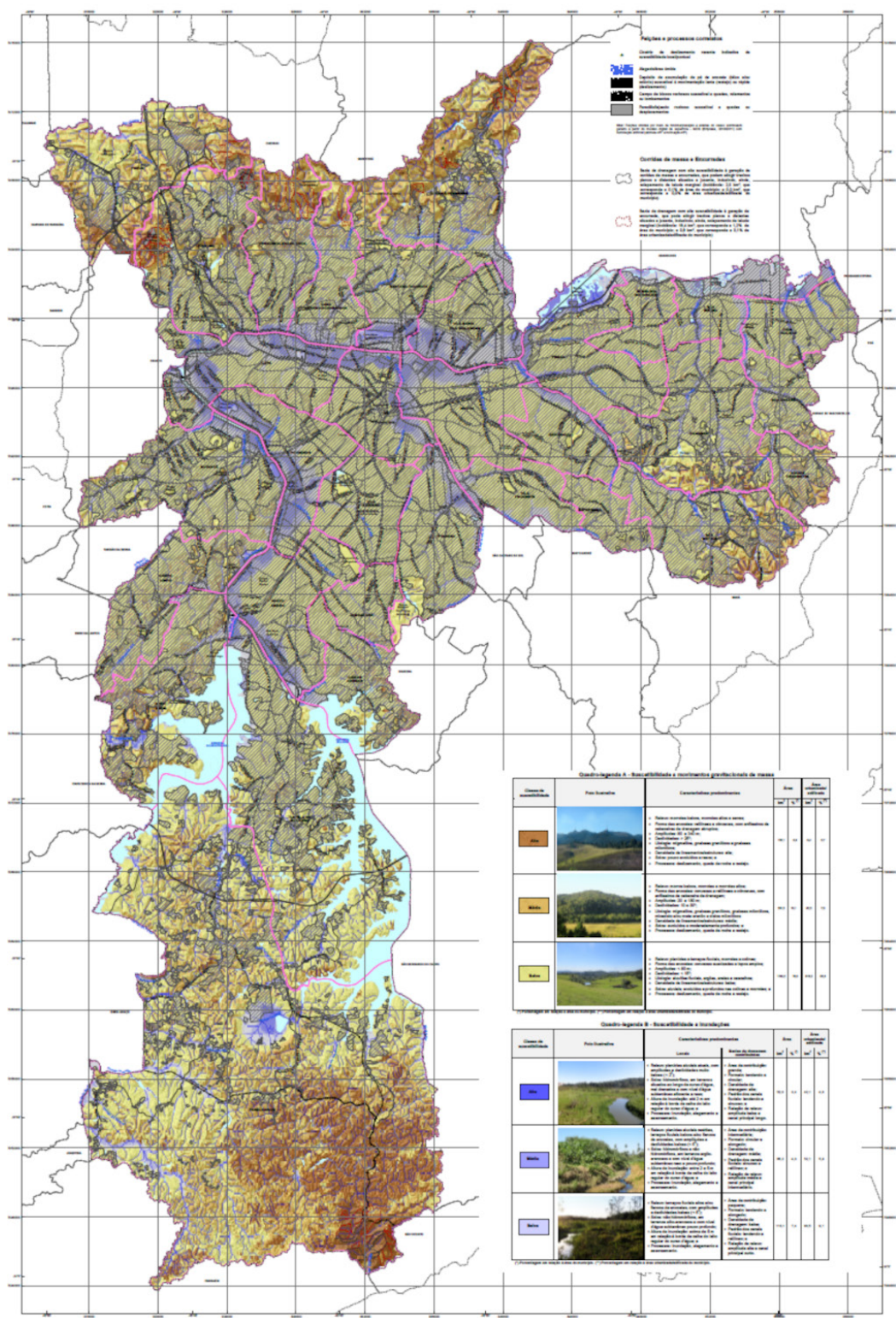


Figura 1. Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações do município de São Paulo. Fonte: Retirado de IPT (2015).

2.2 Índice Paulista de Vulnerabilidade Social 2010

O Índice Paulista de Vulnerabilidade Social 2010, ou IPVS 2010, elaborado pela Fundação Seade (Seade, 2013a) fornece a localização das áreas que abrigam os segmentos populacionais

mais vulneráveis dentro de cada município paulista. Entre os 66096 setores censitários do Censo Demográfico 2010 para o Estado de São Paulo, o IPVS 2010 classificou 59773 em um dos sete grupos de vulnerabilidade social, como mostrado na figura 2.

Grupos	Dimensões		IPVS 2010	Situação e tipo de setores por grupo
	Socioeconômica	Demográfica		
1	Muito alta	Famílias jovens, adultas e idosas	Baixíssima vulnerabilidade	Urbanos e rurais não especiais e subnormais
2	Média	Famílias adultas e idosas	Vulnerabilidade muito baixa	Urbanos e rurais não especiais e subnormais
3	Média	Famílias jovens	Vulnerabilidade baixa	Urbanos e rurais não especiais e subnormais
4	Baixa	Famílias adultas e idosas	Vulnerabilidade média	Urbanos não especiais e subnormais
5	Baixa	Famílias jovens em setores urbanos	Vulnerabilidade alta	Urbanos não especiais
6	Baixa	Famílias jovens residentes em aglomerados subnormais	Vulnerabilidade muito alta	Urbanos subnormais
7	Baixa	Famílias idosas, adultas e jovens em setores rurais	Vulnerabilidade alta	Rurais

Figura 2. Sete grupos de vulnerabilidade social classificados pelo IPVS 2010, de acordo com as condições socioeconômicas e demográficas da população do estado.

Fonte: Retirado de Seade (2013a).

Todos os 59.773 setores possuem pelo menos 50 domicílios particulares permanentes (Seade, 2013b). Dentre esses setores, 56.773 estão localizados em áreas urbanas e 3.224 em áreas rurais, abrangendo um total de 40.545.968 habitantes.

Na cidade de São Paulo, os setores censitários rurais do município foram considerados urbanos para classificação nos grupos. Em 2010, 70% da população residia em áreas de baixíssima, muito baixa ou de baixa vulnerabilidade social, equivalendo a aproximadamente 7,8 milhões de pessoas. Desse conjunto, aproximadamente 1,5 milhão de

pessoas residia em áreas de baixíssima vulnerabilidade (Grupo 1), 4,4 milhões residiam em áreas de vulnerabilidade muito baixa (Grupo 2), e 1,9 milhão residiam em áreas de vulnerabilidade baixa (Grupo 3). Já 16,4% da população paulistana residia em áreas de vulnerabilidade alta ou muito alta, equivalendo a 1,8 milhão de pessoas. Desse conjunto, aproximadamente 992 mil pessoas residiam em áreas de vulnerabilidade alta (Grupo 5), e 836 mil residiam em áreas de vulnerabilidade muito alta (Grupo 6). Ainda havia aproximadamente 1,5 milhão de pessoas residindo em áreas

de vulnerabilidade média (Grupo 4). As figuras 3 e 4 mostram, respectivamente, a parcela da popu-

lação em cada um dos grupos de vulnerabilidade social do IPVS 2010 e suas distribuições espaciais.

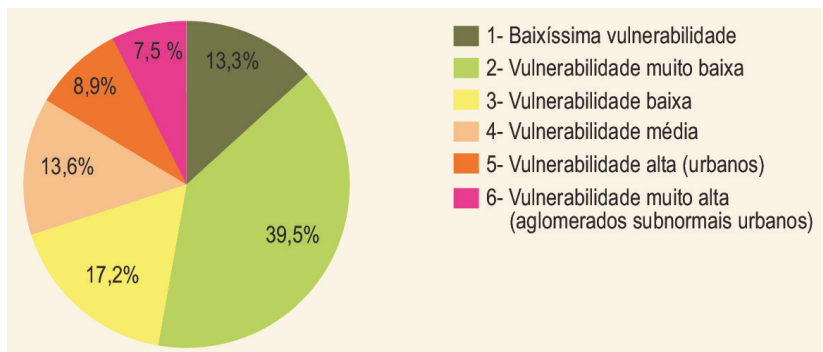


Figura 3. Distribuição da população no município de São Paulo, segundo grupos do IPVS 2010. Cerca de 16,4% da população paulistana estava em condição de alta ou muito alta vulnerabilidade social.

Fonte: Retirado de SEADE (2013a).

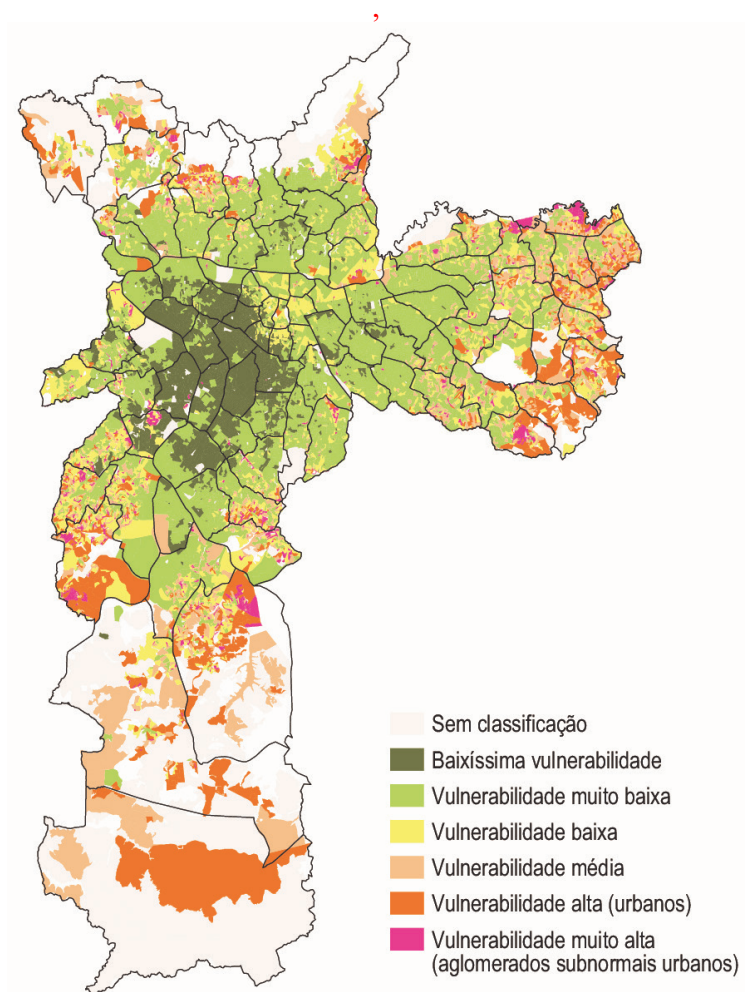


Figura 4. Distribuição espacial dos grupos de vulnerabilidade social classificados pelo IPVS 2010 no município de São Paulo. Nota-se uma menor vulnerabilidade social no centro e uma maior vulnerabilidade social na periferia da cidade.

Fonte: Retirado de SEADE (2013a).

2.3 Mapeamento de áreas de risco de São Paulo

Entre 2009 e 2010, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo elaborou, na cidade de São Paulo, um mapeamento de riscos associados a escorregamentos em áreas de encostas e solapamentos de margens de córregos (IPT, 2010). O trabalho envolveu a reavaliação das áreas mapeadas em anos anteriores, bem como a avaliação de novas áreas de risco geológico na cidade. O mapeamento teve seu foco voltado para áreas onde a vulnerabilidade da população era mais alta, visto que nesses locais qualquer tipo de evento, mesmo de pequena magnitude, poderia causar danos significativos para a comunidade.

A metodologia de trabalho empregada foi a do Ministério das Cidades & IPT (2007), que utilizou alguns atributos para identificar o grau de risco dos diferentes setores. A probabilidade da ocorrência dos fenômenos foi inferida através da identificação e análise das feições e características do terreno, indicando o grau de suscetibilidade da área, seja natural e/ou induzida pela maneira de uso e ocupação do solo. A vulnerabilidade dos assentamentos foi determinada a partir da qualidade construtiva das moradias, para isso foi analisado o tipo de material utilizado (madeira, alvenaria ou misto), assim como a capacidade das habitações de sofrer danos em casos de escorregamentos. Por fim, a consequência do fenômeno foi medida, através do número de habitações que seriam atingidas caso ocorresse um escorregamento.

Por meio desta metodologia, foram mapeadas 407 áreas em todo município, compreendendo cerca de 13,5 km², o que corresponde a 0,9% da área total da cidade. O trabalho incluiu áreas situadas em 26 subprefeituras e dentre as 407 áreas mapeadas, 176 estavam localizadas na zona sul, 107 na zona norte, 100 na zona leste e 24 na zona oeste.

Dentro das 407 áreas, 1179 setores de risco foram identificados, sendo 735 (62%) relativos a áreas de risco de escorregamentos e 444 (38%) a solapamentos em margem de córrego. Foram classificados 152 (13%) setores em baixo risco, 425 (36%) setores em risco médio, 443 (38%) setores em alto risco e 159 (13%) setores em risco muito alto. O mapeamento também identificou, pon-

tualmente, 1132 moradias que se encontravam em situação de risco iminente. A figura 5 exemplifica uma das áreas mapeadas com seus respectivos setores.



Figura 5. Exemplo de área e setores de risco identificados no mapeamento do IPT. A linha vermelha representa o limite da área, enquanto as linhas amarelas representam o limite de cada um dos setores.

Fonte: Retirado de IPT (2010).

2.4 Geoprocessamento

Inicialmente foi realizada a análise dos dados do levantamento dos setores de risco de escorregamento e solapamento de margem do município de São Paulo. Os dados dos setores de risco foram obtidos em arquivos shapefile, que continham na tabela de atributos várias informações, como o grau de risco e o processo geológico atuante, por exemplo.

A primeira etapa consistiu em refinar os dados, retirando da análise os setores em que dominavam os processos de solapamento de margem, já que não foram o foco desta pesquisa. Após este refinamento, realizou-se o cruzamento com os arquivos shapefile da carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa de São Paulo, do IPVS 2010 e com as informações de vulnerabilidade física. Estas últimas foram obtidas através das informações adquiridas no próprio mapeamento das áreas de risco realizado pelo IPT, em que o tipo de construção predominante no setor de risco era classificado de três formas possíveis: alvenaria, madeira ou misto, ou seja, quando havia tanto moradias de alvenaria quanto de madeira, tal setor apresentava tipo predominantemente

misto de construção. No presente estudo, para cada um destes três tipos possíveis de construção foi atribuído um grau equivalente de vulnerabilidade física, a saber: madeira – vulnerabilidade física alta, mista – vulnerabilidade física média, e alvenaria – vulnerabilidade física baixa.

O cruzamento dos dados foi realizado por meio da ferramenta “Intersect” do software ArcGIS 10.6. A ferramenta calcula a interseção geométrica das camadas inseridas como input. As feições, ou parte delas, que são comuns a todas (ou seja, que se cruzam) são gravadas como uma nova camada e obtidas como output, como exemplificado na figura 6. As informações contidas nas tabelas de atributos de cada uma das camadas são transportadas para a camada resultante do procedimento.

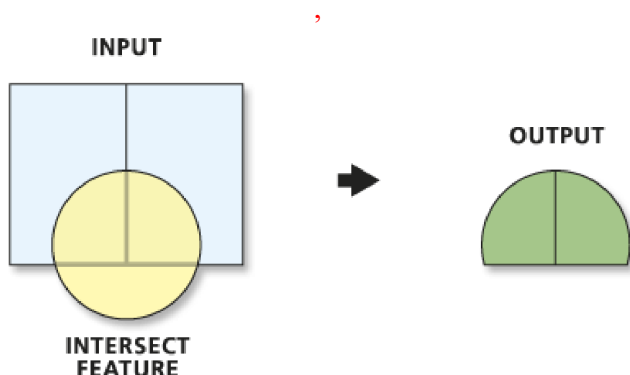


Figura 6. Exemplo de intersecção entre shapefiles. O resultado da intersecção entre as camadas azul e amarela (input) é a camada verde (output), feição presente nas duas camadas do input.

Fonte: Retirado de ArcGIS 10.6 Help.

O resultado do cruzamento de todos esses dados foi uma série de polígonos, cada qual contendo suas informações quanto ao grau de risco, vulnerabilidade física, vulnerabilidade social e suscetibilidade naquela porção de terreno, como mostrado na figura 7. Dentro do ambiente SIG, ainda foi possível calcular a área, em metros quadrados, de cada um dos polígonos.

Após o cálculo da área dos polígonos, todos os dados foram transportados para o software Microsoft Excel. Calculou-se então, quanto, por exemplo, representava percentualmente uma área de suscetibilidade alta em um terreno de grau de risco médio, ou uma área de vulnerabilidade social muito baixa em um terreno de grau de risco muito alto, e assim por diante. Para a situação do primeiro exemplo, somavam-se todas as áreas correspondentes à suscetibilidade alta dentro dos terrenos de grau de risco médio, e depois se calculava quanto esse valor representava, em porcentagem, em todo o terreno definido como de grau de risco médio, também somado previamente.

Através dessa metodologia, foi possível caracterizar cada grau de risco quanto à suscetibilidade, vulnerabilidade social e vulnerabilidade física no município de São Paulo. Metodologia similar foi utilizada por Martins & Macedo (2018), a qual também utilizou de geoprocessamento para caracterização das áreas de risco do município de São Paulo, cruzando os dados do levantamento realizado pelo IPT com dados de litotipos, feições estruturais e declividade do terreno.

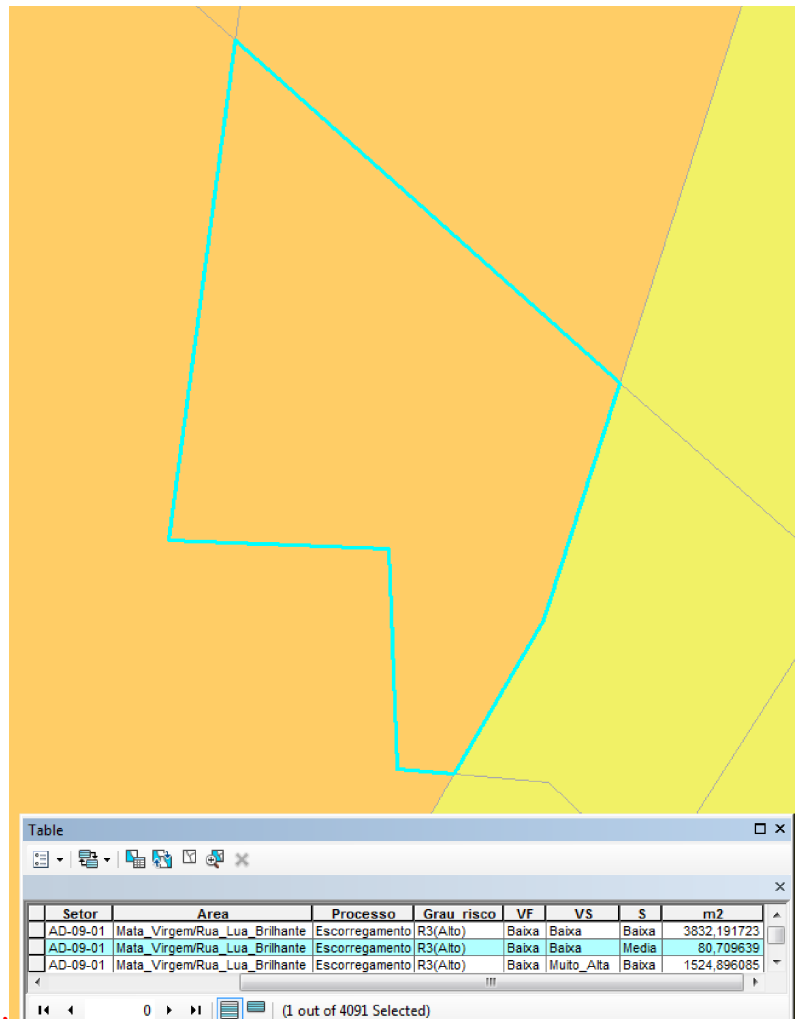


Figura 7. Exemplo de um polígono gerado através da ferramenta “Intersect”. A cor laranja representa o grau de risco alto e a amarela o médio, enquanto na tabela de atributos (Table), VF, VS, S e m2 correspondem, respectivamente, à vulnerabilidade física, vulnerabilidade social, suscetibilidade e área do polígono em metros quadrados.

Fonte: Acervo do autor.

3 RESULTADOS

Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos após a aplicação da metodologia utilizada.

3.1 Caracterização dos setores com grau de risco baixo (R1)

Os setores classificados com grau de risco baixo para escorregamentos somam 1,04 km², correspondendo a 9,86% do total de áreas mapeadas para este processo.

Nestes terrenos, a suscetibilidade a escorregamentos se mostrou majoritariamente baixa,

compondo 65,23% da área total destes setores, ou 0,68 km². A suscetibilidade média compõe 28,28% destes terrenos, ou 0,29 km², enquanto a suscetibilidade alta aparece em 6,49% destas áreas, ou 0,07 km², como mostrado na figura 8.

A vulnerabilidade social mostrou-se predominantemente muito alta, característica atribuída a 37% deste território. Na sequência, a vulnerabilidade média é vista em 22,39%, a alta em 18,96%, a baixa em 14,05%, e a muito baixa em 4,84% destas áreas. Em 2,75% de todo o terreno classificado como R1 não foi possível realizar uma caracterização devido à falta de dados quanto à vulnerabilidade social. Os valores das quatro categorias mais presentes encontram-se expostos na figura 9.

Quanto à vulnerabilidade física, 92,67% dos setores R1 apresentavam edificações em alvenaria, conferindo uma baixa vulnerabilidade física a esses lugares. Em 4,28% dos setores o tipo predominante de construção era misto, resultando numa vulnerabilidade física média, enquanto 0,21% dos setores apresentavam vulnerabilidade física alta, por serem constituídos majoritariamente de edificações em madeira. Em 2,85% de todo o território classificado como de grau de risco baixo não foi possível realizar uma caracterização devido à falta de dados quanto à vulnerabilidade física. A figura 10 representa todos esses valores.

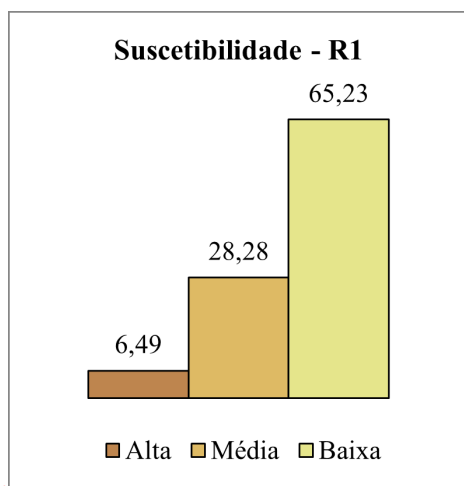


Figura 8. Representação em porcentagem das categorias de suscetibilidade encontradas nos setores de grau de risco baixo, que somam 1,04 km². Predomínio de suscetibilidade baixa.

Fonte: Acervo do autor.

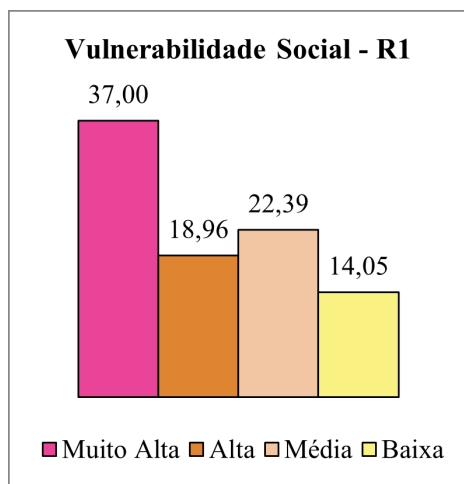


Figura 9. Representação em porcentagem das categorias mais presentes de vulnerabilidade social encontradas nos setores de grau de risco baixo, que somam 1,04 km². Predomínio de vulnerabilidade social muito alta.

Fonte: Acervo do autor.

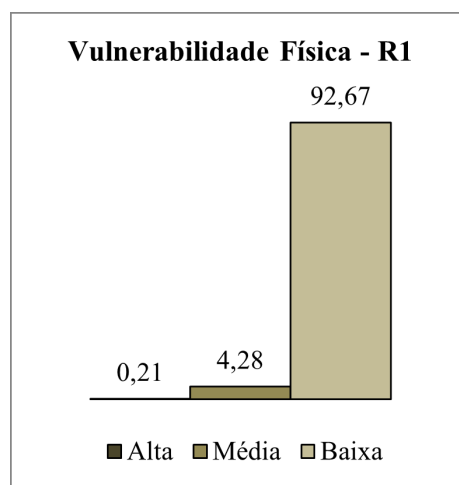


Figura 10. Representação em porcentagem das categorias de vulnerabilidade física encontradas nos setores de grau de risco baixo, que somam 1,04 km². Predomínio de vulnerabilidade física baixa.

Fonte: Acervo do autor.

3.2 Caracterização dos setores com grau de risco médio (R2)

Os setores classificados com grau de risco médio para escorregamentos somam, aproximadamente, 6,92 km², correspondendo a 65,83% do total de áreas mapeadas para este processo.

Nestes terrenos, a suscetibilidade a escorregamentos se mostrou majoritariamente média, compondo 46,55% da área total destes setores, ou 3,22 km². A suscetibilidade baixa compõe 39,73% destes terrenos, ou 2,75 km², enquanto a suscetibilidade alta aparece em 13,71% destas áreas, ou em 0,95 km², como mostrado na figura 11.

A vulnerabilidade social mostrou-se predominantemente muito alta, característica atribuída a 36,34% deste território. Na sequência, a vulnerabilidade alta é vista em 21,37%, a baixa em 18,74%, a média em 17,33%, a muito baixa em 2,32%, e a baixíssima em 0,28% destas áreas. Em 3,62% de todo o terreno classificado como R2 não foi possível realizar uma caracterização devido à falta de dados quanto à vulnerabilidade social. Os valores das quatro categorias mais presentes encontram-se expostos na figura 12.

Quanto à vulnerabilidade física, 89,54% dos setores R2 apresentavam edificações em alvenaria, conferindo uma baixa vulnerabilidade física a esses lugares. Em 8,12% dos setores o tipo predominante de construção era misto, resultando

numa vulnerabilidade física média, enquanto 0,60% dos setores apresentavam vulnerabilidade física alta, por serem constituídos majoritariamente de edificações em madeira. Em 1,74% de todo o território classificado como de grau de risco médio não foi possível realizar uma caracterização devido à falta de dados quanto à vulnerabilidade física. A figura 13 representa todos esses valores.

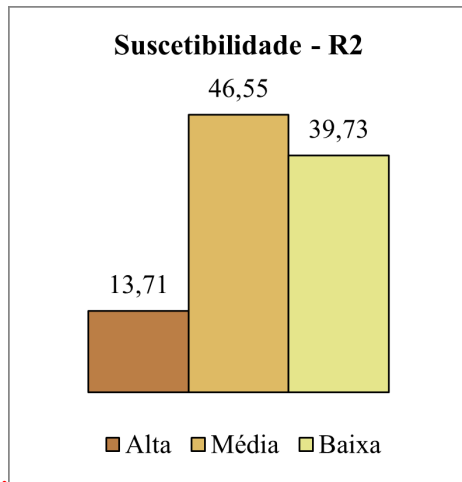


Figura 11. Representação em porcentagem das categorias de suscetibilidade encontradas nos setores de grau de risco médio, que somam 6,92 km². Predomínio de suscetibilidade média.

Fonte: Acervo do autor.

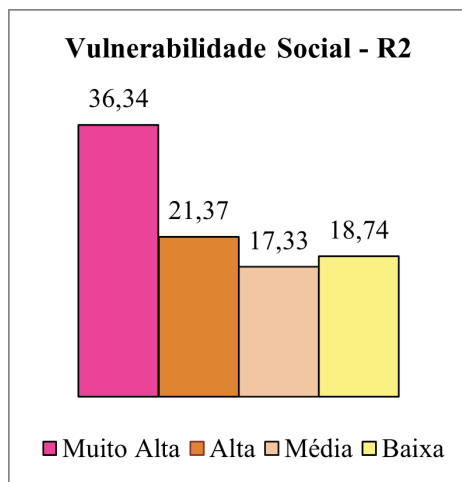


Figura 12. Representação em porcentagem das categorias mais presentes de vulnerabilidade social encontradas nos setores de grau de risco médio, que somam 6,92 km². Predomínio de vulnerabilidade social muito alta.

Fonte: Acervo do autor.

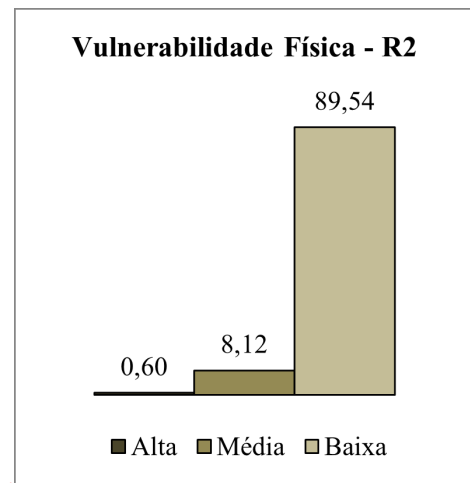


Figura 13. Representação em porcentagem das categorias de vulnerabilidade física encontradas nos setores de grau de risco médio, que somam 6,92 km². Predomínio de vulnerabilidade física baixa.

Fonte: Acervo do autor.

3.3 Caracterização dos setores com grau de risco alto (R3)

Os setores classificados com grau de risco alto para escorregamentos somam, aproximadamente, 1,80 km², correspondendo a 17,17% do total de áreas mapeadas para este processo.

Nestes terrenos, a suscetibilidade a escorregamentos se mostrou majoritariamente média, compondo 48% da área total destes setores, ou 0,87 km². A suscetibilidade alta compõe 26,93% destes terrenos, ou 0,49 km², enquanto a suscetibilidade baixa aparece em 25,07% destas áreas, ou em 0,45 km², como mostrado na figura 14.

A vulnerabilidade social mostrou-se predominantemente muito alta, característica atribuída a 36,31% deste território. Na sequência, a vulnerabilidade alta é vista em 29,17%, a média em 14,51%, a baixa em 14,47%, a muito baixa em 2,46%, e a baixíssima em 0,13% destas áreas. Em 2,94% de todo o terreno classificado como R3 não foi possível realizar uma caracterização devido à falta de dados quanto à vulnerabilidade social. Os valores das quatro categorias mais presentes encontram-se expostos na figura 15.

Quanto à vulnerabilidade física, 82,79% dos setores R3 apresentavam edificações em alvenaria, conferindo uma baixa vulnerabilidade física a esses lugares. Em 14,87% dos setores o tipo predominante de construção era misto, resultando numa vulnerabilidade física média, enquanto 1,54% dos setores apresentavam vulnerabilidade física alta, por serem constituídos majoritariamente de edificações em madeira. Em 0,80% de todo o território classificado como de grau de risco alto não foi possível realizar uma caracterização devido à falta de dados quanto à vulnerabilidade física. A figura 16 representa todos esses valores.

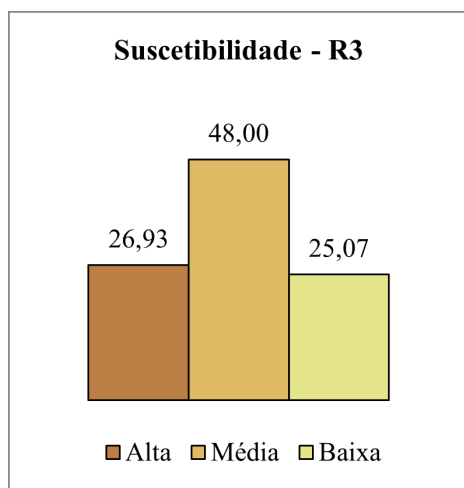


Figura 14. Representação em porcentagem das categorias de suscetibilidade encontradas nos setores de grau de risco alto, que somam 1,80 km². Predomínio de suscetibilidade média.

Fonte: Acervo do autor.

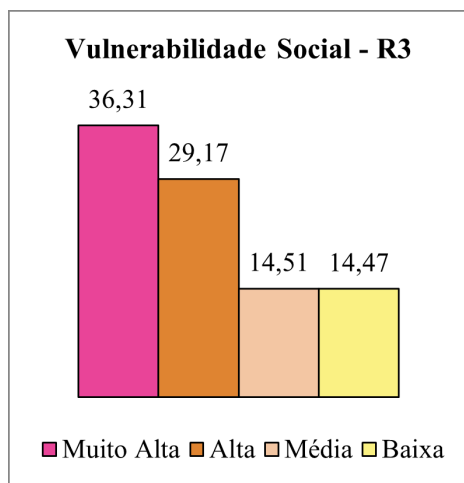


Figura 15. Representação em porcentagem das categorias mais presentes de vulnerabilidade social encontradas nos setores de grau de risco alto, que somam 1,80 km². Predomínio de vulnerabilidade social muito alta.

Fonte: Acervo do autor.

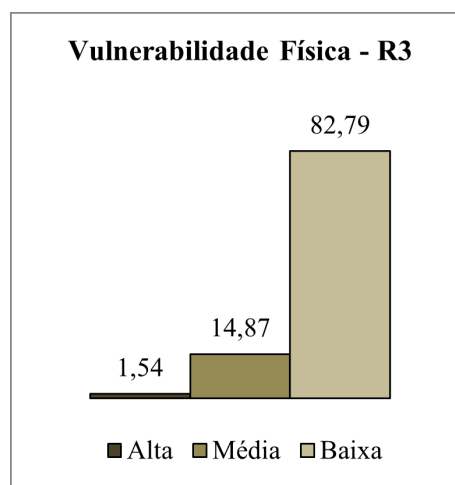


Figura 16. Representação em porcentagem das categorias de vulnerabilidade física encontradas nos setores de grau de risco alto, que somam 1,80 km². Predomínio de vulnerabilidade física baixa.

Fonte: Acervo do autor.

3.4 Caracterização dos setores com grau de risco muito alto (R4)

Os setores classificados com grau de risco muito alto para escorregamentos somam, aproximadamente, 0,75 km², correspondendo a 7,14% do total de áreas mapeadas para este processo.

Nestes terrenos, a suscetibilidade a escorregamentos se mostrou majoritariamente alta, compondo 54,86% da área total destes setores, ou 0,41 km². A suscetibilidade média compõe 27,78% destes terrenos, ou 0,21 km², enquanto a suscetibilidade baixa aparece em 17,36% destas áreas, ou em 0,13 km², como mostrado na figura 17.

A vulnerabilidade social mostrou-se predominantemente alta, característica atribuída a 46,80% deste território. Na sequência, a vulnerabilidade muito alta é vista em 36,56%, a baixa em 8,17%, a média em 6,55%, e a muito baixa em 0,79% destas áreas. Em 1,14% de todo o terreno classificado como R4 não foi possível realizar uma caracterização devido à falta de dados quanto à vulnerabilidade social. Os valores das quatro categorias mais presentes encontram-se expostos na figura 18.

Quanto à vulnerabilidade física, 55,33% dos setores R4 apresentavam tipo predominante de construção mista, conferindo uma vulnerabilidade física média a esses lugares. Em 38,73% dos setores o tipo predominante de construção era alvenaria, resultando numa vulnerabilidade física baixa, enquanto 5,94% dos setores apresentavam vulnerabilidade física alta, por serem constituídos majoritariamente de edificações em madeira. A figura 19 representa todos esses valores.

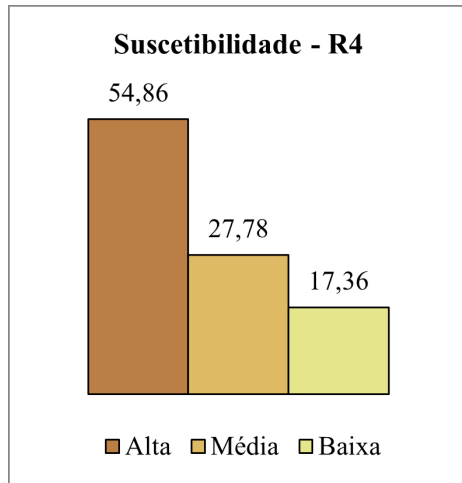


Figura 17. Representação em porcentagem das categorias de suscetibilidade encontradas nos setores de grau de risco muito alto, que somam 0,75 km². Predomínio de suscetibilidade alta.

Fonte: Acervo do autor.

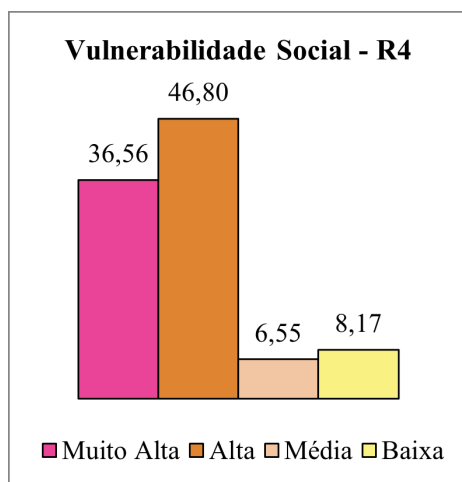


Figura 18. Representação em porcentagem das categorias mais presentes de vulnerabilidade social encontradas nos setores de grau de risco muito alto, que somam 0,75 km². Predomínio de vulnerabilidade social alta.

Fonte: Acervo do autor.

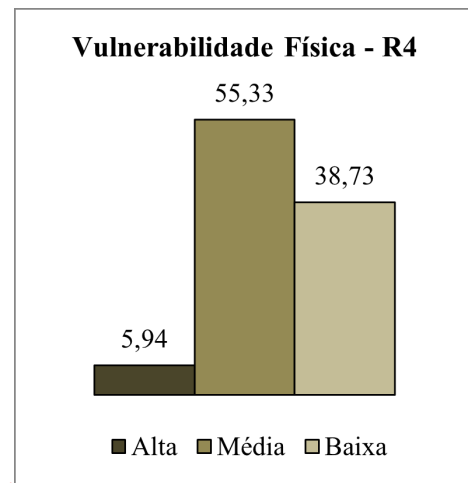


Figura 19. Representação em porcentagem das categorias de vulnerabilidade física encontradas nos setores de grau de risco muito alto, que somam 0,75 km². Predomínio de vulnerabilidade física média.

Fonte: Acervo do autor.

4 DISCUSSÃO

De maneira geral, os graus de risco atribuídos aos setores apresentam correlação positiva com a suscetibilidade, vulnerabilidade social e vulnerabilidade física. Em outras palavras, quanto maior o grau de risco, piores as condições encontradas de suscetibilidade, vulnerabilidade social e vulnerabilidade física em relação a acidentes.

A começar pela suscetibilidade, nos setores R1, vê-se uma predominância da classe baixa, com uma distribuição em 65,23% desses terrenos. Em setores R2, ocorre uma queda percentual para 39,73% de áreas com baixa suscetibilidade, predominando áreas de média suscetibilidade, com 46,55%. Nos setores R3, a suscetibilidade média continua a predominar, mas com aumento em porcentagem, aparecendo agora em 48% das áreas. Já nos setores R4, a predominância fica com a suscetibilidade alta, que se mostra em 54,86% dos terrenos, enquanto a suscetibilidade média distribui-se em 27,78% do território. A tabela 1 ajuda a visualizar a ordem em que as classes de suscetibilidade aparecem nos setores.

Tabela 1. Ordem em que aparecem as classes de suscetibilidade em cada grau de risco. Nota-se que quanto maior o grau de risco, mais frequente se torna a classe de suscetibilidade alta.

Suscetibilidade			
R1	R2	R3	R4
Baixa (65,23%)	Média (46,55%)	Média (48,00%)	Alta (54,86%)
Média (28,28%)	Baixa (39,73%)	Alta (26,93%)	Média (27,78%)
Alta (6,49%)	Alta (13,71%)	Baixa (25,07%)	Baixa (17,36%)

Fonte: Acervo do autor.

A vulnerabilidade social, à primeira vista, parece apresentar uma correlação negativa com o grau de risco. Nos setores R1, R2 e R3, têm-se a predominância da classe muito alta, enquanto nos setores R4 a vulnerabilidade social alta é a que mais aparece. Entretanto, à medida que se detalha a análise dos dados, observa-se o contrário. Se as porcentagens das classes de vulnerabilidade alta e muito alta forem somadas, sendo ambas as classes mais críticas quanto à ocorrência de acidentes, será observada a mesma correlação positiva com o grau de risco: nos setores R1, as classes alta e

muito alta somam 55,96%; nos setores R2 somam 57,71%; nos setores R3 somam 65,48%; e nos setores R4 somam 83,36%. A tabela 2 ajuda a visualizar a ordem em que as classes de vulnerabilidade social aparecem nos setores. A questão de todos os setores se situarem predominantemente em terrenos de vulnerabilidade social muito alta pode decorrer do fato do mapeamento das áreas de risco realizado pelo IPT ter sido focado nas áreas que apresentavam maior vulnerabilidade, que foram consideradas como as que poderiam sofrer maiores danos com a ocorrência de um evento.

Tabela 2. Ordem em que aparecem as classes de vulnerabilidade social em cada grau de risco. Nota-se que a soma da frequência das classes de maior vulnerabilidade social (alta e muito alta) cresce com o aumento do grau de risco.

Vulnerabilidade Social			
R1	R2	R3	R4
Muito Alta (37,00%)	Muito Alta (36,34%)	Muito Alta (36,31%)	Alta (46,80%)
Média (22,39%)	Alta (21,37%)	Alta (29,17%)	Muito Alta (36,56%)
Alta (18,96%)	Baixa (18,74%)	Média (14,51%)	Baixa (8,17%)
Baixa (14,05%)	Média (17,33%)	Baixa (14,47%)	Média (6,55%)
Muito Baixa (4,84%)	Muito Baixa (2,32%)	Muito Baixa (2,46%)	Muito Baixa (0,79%)
Baixíssima (0,00%)	Baixíssima (0,28%)	Baixíssima (0,13%)	Baixíssima (0,00%)

Fonte: Acervo do autor.

Quanto à vulnerabilidade física, nota-se uma predominância da classe baixa nos setores R1, R2 e R3, porém com uma diminuição desse tipo de construção à medida que se aumenta o grau de risco, até finalmente a vulnerabilidade média se tornar a predominante nos setores R4. Em termos percentuais, nos setores R1 a vulnerabilidade física baixa aparece em 92,67% dos terrenos,

89,54% nos setores R2, e 82,79% nos setores R3. A vulnerabilidade média, então, se torna a predominante nos setores R4, aparecendo em 55,33% contra 38,73% das áreas com vulnerabilidade física baixa. A tabela 3 ajuda a visualizar a ordem em que as classes de vulnerabilidade física aparecem nos setores.

Tabela 3. Ordem em que aparecem as classes de vulnerabilidade física em cada grau de risco. Nota-se uma diminuição da frequência da classe de vulnerabilidade física baixa e um aumento nas classes de vulnerabilidade física média e alta com o aumento do grau de risco.

Vulnerabilidade Física			
R1	R2	R3	R4
Baixa (92,67%)	Baixa (89,54%)	Baixa (82,79%)	Média (55,33%)
Média (4,28%)	Média (8,12%)	Média (14,87%)	Baixa (38,73%)
Alta (0,21%)	Alta (0,60%)	Alta (1,54%)	Alta (5,94%)

Fonte: Acervo do autor.

Alguns casos extremos chamam a atenção e merecem uma análise separada. Como exemplo, têm-se áreas de alta suscetibilidade em setores R1, que representam 6,49% dentro desses setores, ou a vulnerabilidade física baixa em setores R4, que representam 38,73% dentro desses setores. Em ambos os casos, a análise de todos os fatores em conjunto mostra-se justificada, visto que se analisados por si só, tais setores poderiam ter sido classificados com outro grau de risco. Um setor de grau de risco baixo com alta suscetibilidade a processos de movimentos de massa é plausível provavelmente devido ao tipo de intervenção e construção realizada na área. Com métodos construtivos e de intervenção adequados, a ocupação de áreas suscetíveis pode ser realizada de maneira mais segura, mitigando os riscos associados. Ao mesmo tempo, um setor de grau de risco muito alto com baixa vulnerabilidade física mostra que somente o tipo de construção não será suficiente para classificar uma área com grau de risco mais baixo. Soma-se a essas possíveis justificativas a diferença de escala entre os mapeamentos, que pode conferir diferenças entre o mostrado nos mapas e o encontrado em campo.

5 CONCLUSÕES

A análise da suscetibilidade e da vulnerabilidade física e social nos setores de risco de escorregamento do município de São Paulo permitiu reconhecer uma correlação positiva entre eles. À medida que graus de risco mais altos são investigados, condições mais desfavoráveis de suscetibilidade e vulnerabilidade são observadas.

O reconhecimento desse padrão é importante, pois tende a fortalecer a ideia de uma análise que leve em consideração tanto aspectos físicos (geológicos e construtivos) quanto sociais para a determinação do grau de risco. Além disso, a metodologia aplicada mostra-se como uma alternativa para visualização conjunta da distribuição das áreas mais suscetíveis e vulneráveis de um município.

O presente estudo limitou-se a caracterizar de maneira geral os setores de cada grau de risco. Sugere-se que, em caso de novos estudos sobre o tema, cada setor seja avaliado de maneira separada, de modo a fornecer um panorama mais detalhado sobre tal correlação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo pelo fornecimento dos dados utilizados para este estudo.

REFERÊNCIAS

Bitar O.Y. 2014. Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações: 1:25.000 (livro eletrônico): nota técnica explicativa. São Paulo: IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo; Brasília, DF: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2014.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT. 2010. Análise e mapeamento de riscos associados a escorregamentos em áreas de encostas e a solapamentos de margens de córre-

gos em favelas do município de São Paulo. Relatório Técnico nº 119708-205. São Paulo: IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Centro de Tecnologias Ambientais e Energéticas, 2010.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT. 2015. Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações: município de São Paulo – SP. Rio de Janeiro, 2015. 1 mapa, color. Escala 1:75.000.

Macedo E.S. & Bressani L.A. 2013. Diretrizes para o zoneamento da suscetibilidade, perigo e risco de deslizamento para planejamento do uso do solo. São Paulo: ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, ABMS – Associação Brasileira de Mecânica de Solos e Engenharia Geotécnica, 2013.

Macedo E.S. & Mirandola F.A. 2018. Gestão de Riscos Geológicos. In: Oliveira A.M.dos.S., Monticeli J.J. Geologia de Engenharia e Ambiental. São Paulo: ABGE, 2018. p.280-300.

Martins P. P. D. & Macedo E. S. 2018. Influência dos fatores geológicos na definição de setores de risco alto e muito alto de deslizamento do município de São Paulo. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 16, 2018, São Paulo. Anais... São Paulo: ABGE, 2018. p. 1-5.

Ministério das Cidades & Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT. 2007.

Mapeamento de riscos em encostas e margem de rios. Organizadores: Celso Santos Carvalho, Eduardo Soares de Macedo e Agostinho Tadashi Ogura. Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas. 176p.

Santos J.O. 2015. Relações entre fragilidade ambiental e vulnerabilidade social na susceptibilidade aos riscos. Mercator, Fortaleza, v. 14, n. 2, p. 75-90, mai./ago. 2015.

Seade. 2013a. Índice Paulista de Vulnerabilidade Social 2010 – Principais resultados. Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados. Coordenação geral: Maria Paula Ferreira. 20p.

Seade. 2013b. Índice Paulista de Vulnerabilidade Social 2010 – Metodologia. Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados. Coordenação geral: Maria Paula Ferreira. 18p.

UNDRR. 2009. UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction. Published by the United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR) Geneva, Switzerland, May 2009.

UNDRR. 2016. Report of the open-ended intergovernmental expert working group on indicators and terminology relating to disaster risk reduction. December, 2016. 41p.

ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE CLOGGING E TRABALHABILIDADE DE MATERIAIS COESIVOS PARA ESCAVAÇÕES COM TUNELADORA EPB

CLOGGING POTENTIAL AND WORKABILITY ASSESSMENT OF COHESIVE MATERIALS FOR EXCAVATIONS WITH EPB TUNNELING MACHINE

DANIELA GARROUX GONÇALVES DE OLIVEIRA

TunGeo Serviços e Consultoria Ltda, São Paulo, S.P., Brasil, Email: do@tungeo.com.br

GUSTAVO AGUIAR

BabEng GmbH, Lübeck, S.H., Alemanha, Email: ga@babeng.com

RESUMO ABSTRACT

As propriedades do material a ser escavado e condicionado têm grande influência no processo de escavação de túneis com tuneladoras EPBM (Earth Pressure Balance Machine). Com o intuito de modificar suas condições originais, adiciona-se água, espuma, polímeros e/ou finos nos solos e rochas triturados no processo de escavação. Antes mesmo da escavação se iniciar, a trabalhabilidade, fluxo e potencial de ocorrência de clogging devem ser avaliados, não só otimizando o processo, mas também diminuindo consideravelmente riscos e custos da obra. Essas características afetarão a manutenção da pressão de frente, no transporte do material condicionado ao longo do parafuso sem fim e das correias transportadoras, e, finalmente, em seu depósito ou até mesmo reutilização após retirado do túnel. Este artigo resume a importância do condicionamento de materiais escavados em tuneladoras EPB e descreve uma metodologia de laboratório utilizada para avaliação destas propriedades. Enfoca também na problemática de ocorrência de clogging, quando o material argiloso adere nas partes frontais da tuneladora. Finalmente, relatam-se algumas considerações feitas na aplicação desta metodologia em solos naturais já escavados por TBMs e a importância de ser realizado estes estudos já em fases iniciais de projeto, além é claro, durante o projeto executivo, para validação contínua de resultados preliminares.

Palavras-chave: Escavação mecanizada, EPB, condicionamento de solos, clogging, trabalhabilidade, ATUR

The properties of the material to be excavated and conditioned have a major influence on the tunneling process with EPBM (Earth Pressure Balance Machine). In order to modify its original conditions, soil and rocks crushed and grinded in the excavation process are added water, foam, polymers and/or fines. Even before the excavation begins, the workability, flow and clogging potential can be estimated, not only optimizing the process but also considerably reducing risks and costs of the tunnel work. These characteristics will affect the maintenance of the face pressure, in the conveying of the conditioned material along the screw conveyor and the conveyor belt, and finally in its deposit or even reuse after its removal from the tunnel. This article summarizes the importance of the conditioning of excavated materials in EPB tunneling machines, describing a laboratory methodology used to evaluate these properties. It also focuses on the problem of clogging when the clay material sticks to the front parts of the tunneling machine. Finally, it reports some considerations made in the application of this methodology in natural soils already excavated by TBMs and the importance of carrying out these studies already in early stages of design, and of course, during executive project, for continuous validation of the preliminary results.

Keywords: Mechanized excavation, EPB, soil conditioning, clogging, workability, ATUR

1 INTRODUÇÃO

A tendência mundial em direção à automação industrial estimula o mesmo desenvolvimento na escavação de túneis, com meta principal a interligação de comunidades urbanas de maneira mais sustentável. Mundialmente, se torna cada vez mais frequente a utilização de tuneladoras para a construção de túneis, principalmente em ambientes urbanos, já que a prática pode diminuir riscos de recalques na superfície, assim como a possibilidade de obter consideráveis taxas de avanço. E cada vez mais estas máquinas superam desafios, escavando trechos mais profundos, com maior cobertura, maior diâmetro, ou extremamente rasos, geologicamente mais complexos, com maiores pressões hidrostáticas e maior flexibilidade na escavação. Entretanto, há desafios a serem vencidos, principalmente porque há que se compreender melhor a interação destas máquinas com o subsolo, composto de materiais extremamente heterogêneos e de propriedades diversificadas.

No caso específico da tuneladora EPB, o material escavado pela cabeça de corte é temporariamente armazenado na câmara frontal de escavação. Tanto na cabeça de corte, assim como dentro da câmara, o material é misturado com aditivos, como, por exemplo, água, espuma, polímeros e/ou grãos finos (bentonita). O principal objetivo desse processo de mistura, denominado condicionamento de solo, é alterar as características desse material para que funcione melhor como um anteparo para a estabilidade da frente do túnel. Ou seja, é o próprio material escavado que mantém a frente de escavação estável. É através de um parafuso sem fim, localizado na parte inferior da câmara de escavação, que este material é controladamente retirado, passando de uma maior pressão (usualmente entre 1 e 6 bares) para a pressão atmosférica ao final deste parafuso. Este material condicionado ainda terá que ser transportado por correias, que geralmente são inclinadas, e posteriormente, depositado, havendo ainda a possibilidade de sua reutilização. Portanto, as propriedades desse material influenciam todo este processo (Maidl et al. 2012, Thewes, Budach & Bezuijen 2012, Oliveira et al. 2018ab, 2019ab, Wehrmeyer & Oliveira 2020).

Adicionalmente, no caso de materiais coesivos, com presença de argilo-minerais de média a alta plasticidade, existe a possibilidade de colagem de materiais argilosos escavados nas ferramentas da cabeça de corte, câmara de escavação e até mesmo parafuso sem fim. Este fenômeno é denominado clogging. Já é conhecida também a sua influência no aumento do torque da máquina, no desgaste secundário das ferramentas de corte e até mesmo nos danos causados em anéis de selagem, chegando a afetar os motores da cabeça de corte da tuneladora (Thewes & Burger 2004, Spagnoli et al. 2010, 2011ab, Classen 2016, Oliveira et al. 2019a). A ocorrência de clogging afeta diretamente a taxa de avanço e custos, pois intervenções devem ser realizadas com maior frequência para limpar a frente da máquina e ferramentas de corte. Custos diários de uma tuneladora parada chegam a valores bastante significativos, portanto, há grande preocupação de se evitar ou controlar este fenômeno, o que pode ser na maioria das vezes feito por meio do uso de surfactantes e/ou polímeros combinados com a operação da máquina.

Portanto, a caracterização do material a ser escavado, seja solos e/ou rochas (ou sua mistura, no caso de solos mistos), juntamente com a modificação deste por condicionantes, deve ser preferencialmente realizada antes e durante a escavação. Na maior parte dos casos, esta caracterização é praticamente ausente, sendo apenas feito ajustes durante a escavação, além de verificar as condições desse material na esteira. Se utiliza a técnica de tentativa e erro, até ajustar os parâmetros da máquina, afetando as propriedades do material escavado condicionado, denominado de muck. Entretanto, há riscos consideráveis em ficar testando soluções diretamente na escavação, além do custo que se requer ao adquirir quantidade suficientes de aditivos para serem testados in situ, quando comparado aos testes de laboratório. Ao se proceder com testes preliminares de laboratório, não só os custos diminuem, mas também se minimizam riscos implícitos ao se testar diretamente na tuneladora durante a escavação. Por outro lado, deixar estes testes nas mãos dos fornecedores dos produtos, seria o mesmo que perguntar à uma indústria farmacêutica que medicamento deve tomar, em vez de ir a um médico especialista. Ou seja, há necessidade de um parecer isento

de interesses na venda de produtos específicos, ainda mais que não há um produto ideal para todos os solos e rochas, já que qualquer variação nas propriedades do material terá influência no efeito de cada aditivo utilizado.

Visando auxiliar nesses desafios de condicionamento em tuneladoras EPB, uma rotina de testes de laboratório de caracterização da trabalhabilidade, do fluxo e do potencial de ocorrência de clogging foi estabelecida ao final de uma tese de doutorado, em uma cooperação entre as universidades Queens (Canadá) e Ruhr Bochum (Alemanha) (Oliveira 2018, Oliveira et al. 2018ab, Oliveira et al. 2019ab). Este artigo tem como objetivo principal divulgar esta metodologia, acrescentando considerações de testes realizados já com solos escavados ou a serem escavados em obras de túneis, assim como correlações sobre a escavação em EPB, com foco no seu processo de condicionamento e operação. Limitações desta metodologia são também apontadas, já com algumas soluções propostas.

2 CLOGGING, TRABALHABILIDADE E FLUXO NAS ESCAVAÇÕES COM EPB

2.1 TBM-EPB – Princípio de funcionamento

A tuneladora do tipo EPB (e suas variantes) é o tipo de TBM mais frequentemente escolhida para projetos de túneis escavados em solos (Herrenknecht et al. 2011, Galli 2016). O campo ideal das máquinas EPB cresceu desde sua montagem original no Japão (Hanamura 1995, Maidl et al. 2012, Herrenknecht 2019), que é uma consequência direta do sucesso do condicionamento do solo (Maidl 1995, Langmaack 2000, EFNARC 2005,

Thewes, Budach & Bezuijen 2012). Uma máquina EPB (ou EPBM) consiste em um escudo fechado usado para a escavação de solos (inclusos solos mistos, com solo e rocha) onde o suporte da face e da pressão das águas subterrâneas é obtido por meio do material escavado pela cabeça de corte, que serve como um meio de suporte propriamente dito.

Conforme ilustrado da Figura 1, uma cabeça de corte equipada com ferramentas tais como cortadores de disco e raspadores, escava o material, que cai dentro de uma câmara de escavação. A câmara de escavação é pressurizada e separada do resto da máquina por um anteparo de pressão (bulkhead). Hastes metálicas instaladas na parte de trás da cabeça de corte e na parede de pressão fazem a função de agitadores para auxiliar na mistura do solo escavado. Sensores colocados na parede de pressão controlam a pressão dentro da câmara. Um parafuso sem fim dentro de uma câmara é responsável pela remoção do solo escavado, onde a pressão de suporte pode ser controlada variando a velocidade de rotação do parafuso sem fim. Macacos hidráulicos empurram a máquina para frente e ajudam a controlar a pressão à frente da máquina, empurrando a cabeça de corte para frente contra o solo. Segmentos de concreto pré-moldados são erguidos, funcionando como o revestimento final do túnel. Uma argamassa (grout) é injetada no fim do escudo para preencher os vazios que ficam ao redor desses segmentos. Por último, um selante de graxa é injetado entre escovas na extremidade interna da couraça da máquina, funcionando como um selo contra água subterrânea, evitando a infiltração destes elementos dentro do escudo.

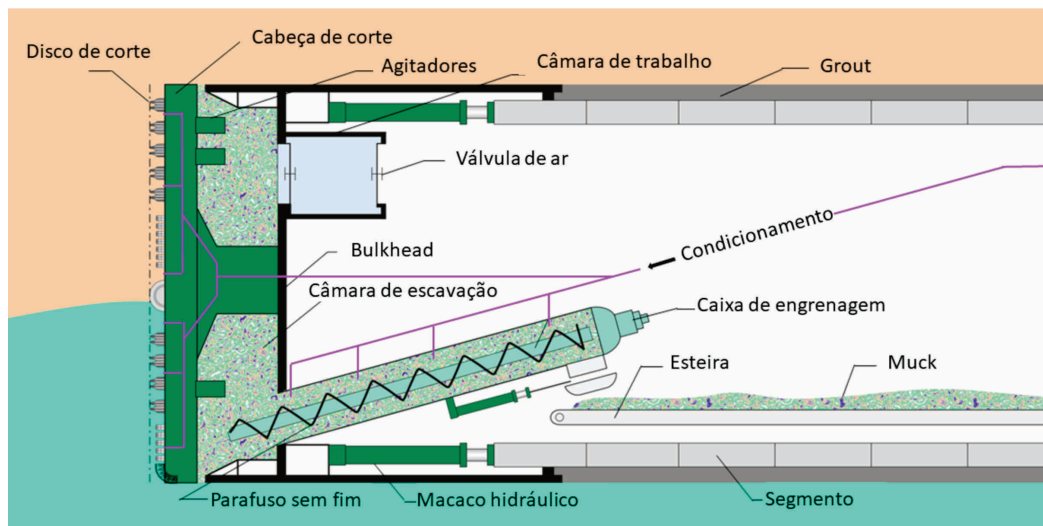


Figura 1. Máquina tuneladora EPB e seus principais elementos.
 Fonte: BabEng – arquivo interno.

2.2 Influência do condicionamento

Para que esta máquina escave sem produzir perdas de solo, a correta pressão de suporte para conter as pressões do solo e hidrostática deve ser mantida e o material escavado deve possuir certas propriedades que permitam a manutenção desta pressão. Como os solos naturais na maioria dos casos não apresentam essa característica, esta é uma das razões de proceder com o condicionamento deste material, adicionando água, espuma, polímeros ou partículas finas. E não é só com o objetivo de manter a pressão de frente que este material deve ser modificado, mas também para que seja devidamente transportado pelo parafuso sem fim, pelas esteiras (ou tubos de bombeamento¹) e depois depositado.

O fluxo do material influenciará o transporte ao longo da esteira, aonde um material muito líquido, por exemplo, poderia se mover contra a direção de transporte, especialmente em inclinações íngremes da esteira. Um material muito rígido, por outro lado, sairia do parafuso em forma de blocos rígidos, que poderiam dificultar o processo e até bloquear as vias de transporte. Ambas as situações têm que ser consideradas antes mesmo da escavação, pois ambas podem causar o atraso na

operação do túnel, devido às exigências de limpeza (Wehrmeyer & Oliveira 2020).

Finalmente, é essencial considerar as propriedades deste material escavado e condicionado com relação ao seu depósito, tanto temporário como bota-fora, ou até mesmo reuso. Devido às novas leis ambientais e a preocupação com um processo sustentável, cada vez mais aumentam os cuidados nesse sentido, já que este material quando condicionado estará misturado com produtos químicos. Por exemplo, um dos melhores produtos químicos para evitar o clogging tem como sua base derivados de petróleo. Este produto já está proibido na maioria dos países, devido à legislação ambiental local, limitando ou até mesmo impedindo o seu uso. Também, se muita água é utilizada para diminuir o mesmo problema de clogging, será necessário áreas temporárias de secagem do material fora do túnel, o que implica em um custo significativo.

Em resumo, as principais vantagens buscadas com o condicionamento do solo escavado são as seguintes: aumento da trabalhabilidade e compressibilidade do muck; inibição de clogging, homogeneização e redução da permeabilidade e temperatura do muck; redução nos desgastes das ferramentas de corte e no torque na cabeça de corte, melhorando a performance da escavação; atingir a consistência desejada do muck para transporte e depósito/descarte.

¹ Método alternativo de retirada de material em tuneladoras EPB, denominado muck pumping.



Figura 2. Consistências inadequadas do muck: esquerda muito líquido, direita muito rígido.

Fonte: BabEng - arquivo interno.

2.3 Experiência prática – condicionamento e identificação de clogging

Conforme mencionado, existem diversos aditivos para condicionar o material, como espumas, polímeros e bentonitas. A escolha do tipo de aditivo a ser utilizado depende do tipo desse solo escavado e das propriedades físico-químicas dos aditivos. Bentonita é utilizada para aumentar a plasticidade do material escavado e reduzir sua permeabilidade. Polímeros são utilizados para modificar a viscosidade do muck na câmara de escavação e aumentar a estabilidade da espuma em escavações em solo de alta permeabilidade, além de também reduzir o clogging de argilas. As espumas são compostas por uma combinação de um tensoativo (surfactante) misturado na água com ar, de maneira que o volume da mistura se expanda formando bolhas. Três parâmetros são fundamentais para o controle da efetividade do condicionamento com espumas:

- razão de expansão da espuma (FER – foam expansion ratio): relação entre o volume de espuma e o volume de líquido injetado. Pode variar entre 2 e 20 em função do tipo de solo escavado. Em argila utiliza-se FER mais baixo (espuma mais líquida), enquanto em areia o FER é mais alto (espuma mais aerada);
- razão de injeção de espuma (FIR – foam injection ratio): relaciona o volume de espuma injetada com o volume de solo condicionado.

Normalmente utilizam-se valores entre 50 e 150 – em solos granulares utiliza-se FIR mais baixo;

- concentração do tensoativo na mistura com a água (CF – concentration factor). Usualmente é especificado pelo fornecedor. Entretanto, pode ser adaptado de acordo com o FER utilizado. Em geral, quanto menor o FER, menor a concentração necessária do tensoativo.

A operação de uma tuneladora se aproxima de um processo industrial, com elevado grau de automação e diversas atividades ocorrendo concomitantemente durante a escavação. Diferentemente de túneis convencionais, onde a visualização e o mapeamento da frente da escavação são essenciais, em escavações mecanizadas é essencial um conhecimento sobre a operação da máquina e o controle em tempo real dos principais parâmetros operacionais. As máquinas modernas dispõem de centenas a milhares de sensores de controle operacionais que fornecem informações em tempo real. Além disso, a alta velocidade de escavação, que pode chegar a até 30 m por dia, não permite que se dependa exclusivamente da análise de parâmetros externos, como leituras de instrumentação superficial, para adequar os parâmetros de escavação, é preciso ter dados em tempo real do desempenho da máquina para a tomada de decisões visando garantir a segurança da escavação e um bom desempenho de avanço.

Com relação à identificação de ocorrência de clogging durante a escavação, há duas atividades essenciais: a avaliação da consistência do muck na esteira, para se observar se a consistência está de acordo com a prevista e se o condicionamento está adequado; e a análise em conjunto de parâmetros operacionais, que permite se observar tendências que podem levar ao clogging ou identificar a ocor-

rência de clogging na cabeça de corte. Em geral, é possível identificar a ocorrência de clogging quando a escavação ocorre em solos argilosos e é observado aumento no torque, na força de contato e na temperatura na câmara de escavação juntamente com uma redução na penetração, conforme exemplificado no diagrama da Figura 3.

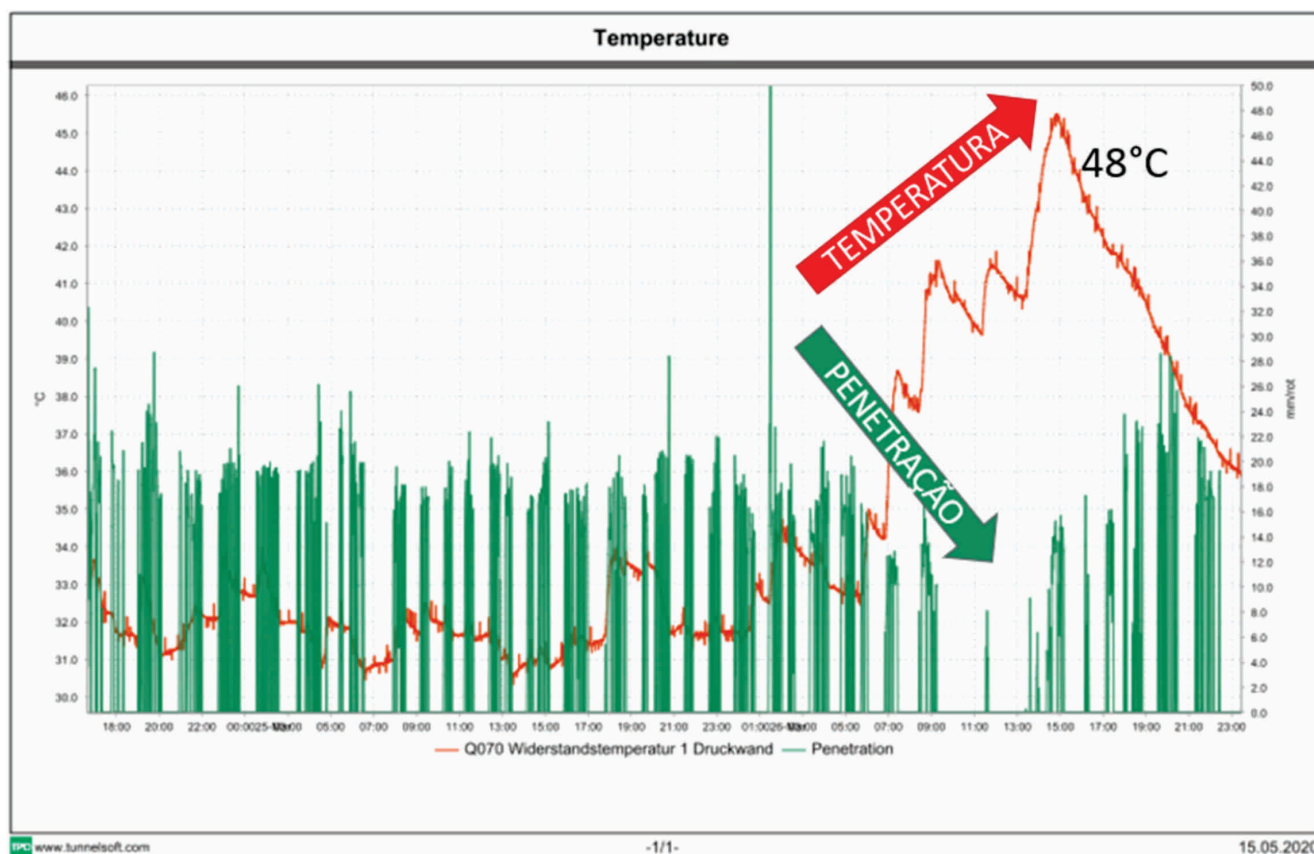


Figura 3. Exemplo da identificação de clogging nos parâmetros operacionais da TBM em túnel em argila rija – aumento da temperatura na câmara de escavação acompanhado da redução na penetração, tendo como abcissa, o tempo da escavação.

Fonte: TPC-BabEng – arquivo interno.

No caso de um túnel escavado utilizando uma EPB, o condicionamento do solo desempenha um papel crítico em todo o processo de escavação. Uma extensa campanha de testes de condicionamento do solo antes da escavação de um túnel pode reduzir riscos, custos e melhorar o desempenho geral da escavação EPB. Entretanto, na maioria dos projetos, a avaliação do condicionamento do solo é conduzida durante a construção em uma base de tentativa e erro e muitas vezes é feita para mitigar os problemas durante a escavação de forma retroativa. Muitas vezes, esta

avaliação é até mesmo realizada apenas pelos fornecedores de produtos químicos, o que poderia ser considerado como uma avaliação tendenciosa.

O ganho de uma fase preliminar de testes de condicionamento do solo foi exemplificado por Ye et al. (2016), em um caso estudado para dois túneis individuais implementados para a Linha 1 do Metrô Nanchang, na China. Os autores fizeram uma comparação entre um novo esquema de condicionamento, baseado em uma avaliação preliminar à escavação, com outra abordagem de tentativa e erro. O procedimento de tentativa e erro

resultou em atrasos no projeto e dificuldades na obtenção da trabalhabilidade correta do material escavado dentro da câmara de escavação. Os problemas com as abordagens de condicionamento do solo experimental e de erro tornam-se ainda mais evidentes quando se está sendo escavado um subsolo desafiador, como em terrenos de solo misto.

2.4 Testes de laboratório para condicionamento e estimativa de clogging

Há alguns testes realizados em laboratório para caracterizar materiais a serem escavados por EPBs, antecipando seu possível comportamento frente à escavação. A maioria destes testes se originaram de testes de concreto, como o slump e a mesa de fluxo. Não há, todavia, uma metodologia padronizada tampouco suficientes validações de campo para a comprovação destes testes. Oliveira et al. (2018a, 2019b) apontam, por exemplo, a inviabilidade de se realizar testes tipo slump em fases de projeto básico, onde apenas há disponibilidade de amostras de sondagem, insuficientes

para os usuais 10 quilos requeridos para cada teste. Além da necessidade de uma grande quantidade de material para cada teste, o teste slump demanda muito esforço físico do que a alternativa de se utilizar a mesa de fluxo, que necessita apenas centenas de gramas para cada teste. Portanto, há muito espaço para melhorias, inovações e validações para testes de materiais condicionados para escavações em EPB, em termos de análise de estimativa de sua trabalhabilidade e fluxo.

Com relação à estimativa de ocorrência de clogging, há muitos métodos propostos, mas ainda assim poucos validados em escavações de túneis. Em parte, isso se deve à confidencialidade das obras, especialmente quando implica em custos e atrasos imprevistos, o que muitas vezes é a consequência de severa ocorrência de clogging. Pode-se dividir estes métodos em estimativas com base empírica, como o diagrama de Hollmann & Thewes (2012, 2013), como ilustrado na Figura 4, e com testes de laboratório, muitas vezes com a intenção de se medir a adesão do solo em superfícies metálicas, como por exemplo, os testes de Thewes (1999), Feinendegen et al. (2010, 2011), e de Zumsteg & Puzrin (2012).

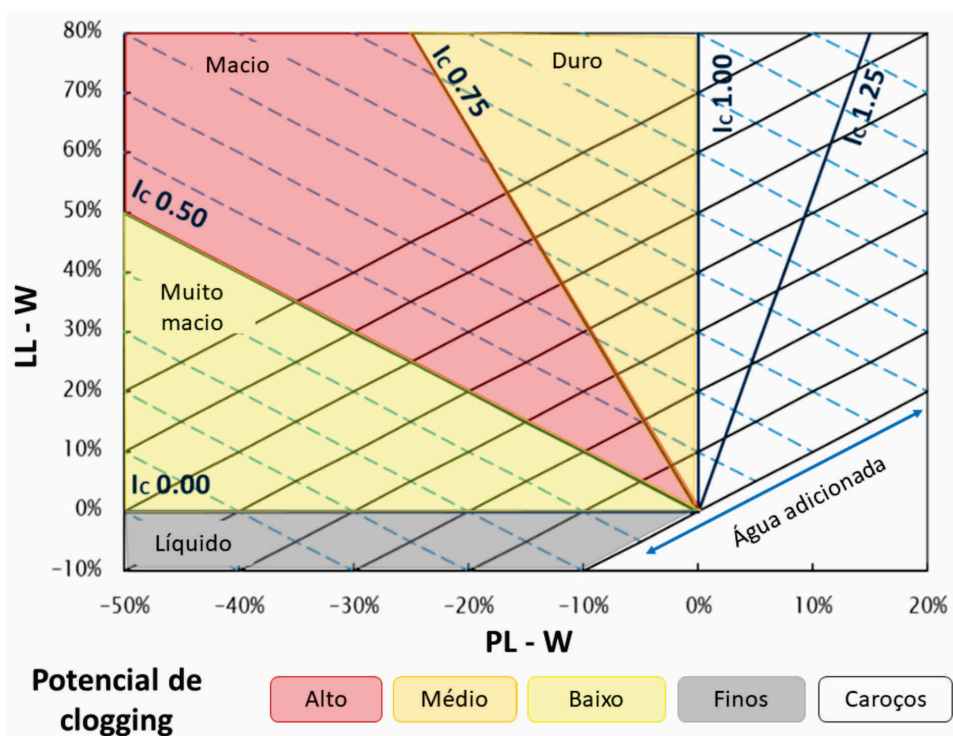


Figura 4. Diagrama universal de clogging considerando os limites líquidos e plásticos do solo, bem como seu conteúdo de água, classificando o potencial de clogging. A inclusão de água deve ser considerada, movendo a posição do solo para baixo.

Fonte: modificado de Hollmann e Thewes, 2012.

Oliveira et al. (2018a) perceberam que o método de avaliação de clogging proposto por Zumsteg e Puzrin (2012) não fornecia resultados realistas, especialmente nos casos de solos mistos com diferentes frações de argila e relevante contribuição de areia. Várias vezes o solo preso na pá, depois de misturado com uma batedeira, não estava totalmente preso a ele, e qualquer queda da ferramenta de mistura seria suficiente para soltar o solo. Outras vezes, porém, mesmo depois de várias quedas da pá, não se observava nenhuma perda de solo. Uma nova metodologia com um novo dispositivo chamado ATUR², que permite uma queda livre do batedor, sempre da mesma altura, ao longo do mesmo eixo, foi então proposta. A seguir, a metodologia que inclui a estimativa de clogging, assim como fluxo e trabalhabilidade de solos a serem escavados por EPB é descrita.

3 METODOLOGIA DE LABORATÓRIO

Uma extensa campanha de testes, parte de uma pesquisa de doutorado, resultou no desenvolvimento desta metodologia que inclui alguns testes. O objetivo da pesquisa foi investigar o potencial de ocorrência de clogging e o comportamento de fluxo e trabalhabilidade de solos coesivos, correlacionando os resultados com escavações com máquina EPB. Oliveira (2018) e Oliveira et al. (2018ab, 2019ab) detalham esta metodologia que inclui testes com uma batedeira da marca Hobart³, o dispositivo de teste de clogging ATUR, uma mesa de fluxo tipo Hagerman⁴ e as observações visuais-táteis sobre a mistura do solo com ou sem aditivos. A Figura 5 apresenta estes aparatos e respectivos estágios da metodologia.

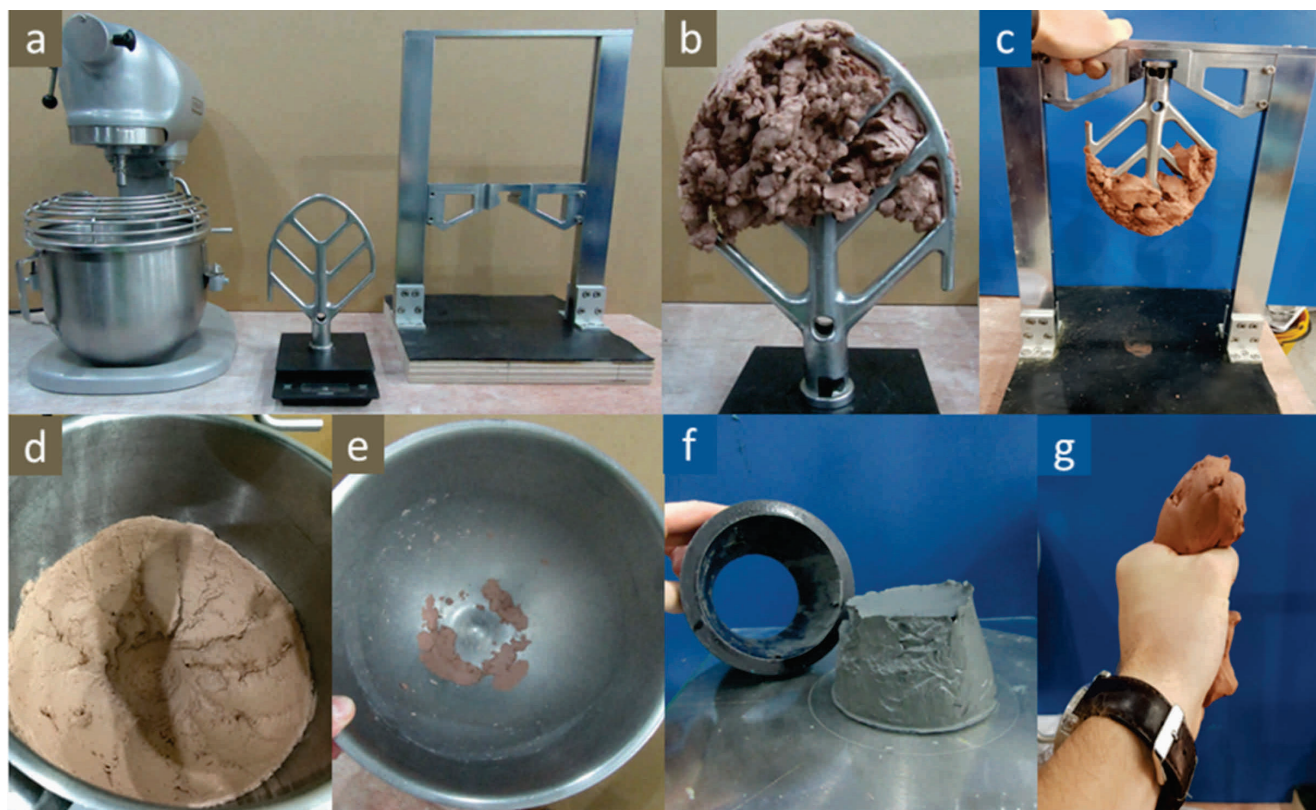


Figura 5. Metodologia de teste: a- batedeira, pá e ATUR, b- pá com o solo, c- ATUR, d & e- diferentes condições de material grudado na tigela, f- teste de mesa de fluxo, e g- aperto do solo, como uma complementação de sua caracterização.

2 Adhäsive Tone Untersuchung RUB/Queens (Teste de argila adesiva RUB/Queens)

3 Esta batedeira foi escolhida porque é a mesma utilizada para testes de concreto, assim como na pesquisa que antecedeu essa, de Zumsteg & Puzrin 2012.

4 ASTM C230/C230M (2014) e ASTM C1437 (2015).

Esta metodologia combina uma sequência de testes, começando com a preparação das amostras, verificação do índice da consistência desejado e teste com a metodologia de bateadeira Hobart, seguida pela queda sequencial da pá da bateadeira no aparato ATUR, com posterior limpeza e lavagem da pá e da tigela, o teste da mesa de fluxo e, finalmente, a avaliação qualitativa das amostras, apertando-as (Oliveira et al. 2019a, Oliveira 2018). O teste para estimativa de clogging foi modificado do método de Zumsteg & Puzrin (2012), aonde a mesma bateadeira é utilizada, porém sem o estágio de queda da pá. Ao incluir a etapa de queda da pá no dispositivo ATUR, é possível perceber que nem toda a massa de solo que estava grudada na pá, segue aderida após a queda desta. A lógica é bastante simples, quanto menos massa de solo se desprende da ferramenta após diversas quedas, maior o potencial de clogging. A seguir, cada item é detalhado.

3.1 Preparação das amostras

É essencial ter conhecimento da umidade natural da amostra, pois se refere ao estado natural do solo a ser escavado, que algumas vezes pode até estar dentro do que se é considerado ideal para a operação da máquina EPB, não necessitando muitos aditivos. Portanto, como primeiro passo, deve-se obter a umidade natural, seguindo as normas técnicas existentes como ASTM D2210 (2010). Caso a amostra perca sua umidade natural, estas condições naturais deverão ser recriadas, acrescentando água, misturando e aguardando pelo menos 24 horas para a cura⁵ das amostras. O teor de umidade deve então ser verificado, passando então para a obtenção dos limites de Atterberg, conforme as normas da ASTM D4318 (2017). Oliveira et al. (2018a) entretanto sugere a modificação desta rotina para melhor atender alguns casos de solos mistos, como os solos de alteração, cujas partículas de areia e argila já estão misturadas, não havendo sentido retirar os grãos maiores que 0,425 mm.



Figura 6. Preparação das amostras, à esquerda ralando rochas brandas argilosas e à esquerda, armazenando amostras em fase de obtenção da consistência. Esta é a etapa mais demorada da metodologia.

⁵ Processo necessário para que a umidade seja espalhada na amostra homogeneamente.

O próximo passo será definir as consistências a serem testadas, buscando pontos espaçados entre consistências 0 e 1, considerando uma concentração maior de pontos entre 0.4 e 0.75, zona de maior ocorrência de clogging (Thewes 1999, Sass & Burbaum 2009, Feinendegen et al. 2010, Zumsteg & Puzrin 2012). A Equação (1) para cálculo do índice de consistência (I_c) deve ser utilizada, sendo LL (limite de liquidez), LP (limite de plasticidade) e W (umidade natural).

$$I_c = (LL - W) / (LL - LP) \quad (1)$$

No caso de rochas macias, as amostras precisam ser preparadas. Uma alternativa é ralar as amostras com um ralador de cozinha, como ilustrado na Figura 6. É essencial considerar que rochas brandas, como argilito ou siltito, se comportarão como solo ao serem escavadas com EPB, sendo uma das maiores ocorrências de clogging intenso.

Maiores quantidades de solo serão necessárias para testes com espuma e/ou polímeros, dependendo de quantos testes são programados (por exemplo, número de polímeros, espumas, ou mesmo concentração, FER ou FIR). Também é essencial mencionar que cada teste terá que ser repetido pelo menos três vezes, para fornecer resultados confiáveis. O mesmo solo pode ser facilmente reutilizado para um segundo ou terceiro procedimento de teste, com pouca perda de solo durante o processo. Entretanto, este não é o caso dos testes com aditivos, sempre requerendo uma nova amostra.

3.2 Estimativa de clogging

O ponto de partida desta etapa é quando o I_c alvo é atingido para aquela amostra. A partir desse ponto, a amostra a ser testada deve ser inserida na vasilha da bateadeira Hobart, acrescentando-a como caroços sempre que possível, o que se aproxima da realidade de escavação, já que as ferramentas de corte da TBM escavam o solo coesivo em caroços.

A quantidade a ser testada dependerá muito da resistência do material, pois uma amostra muito rígida, por exemplo, caulinita pura com I_c acima de 1.0, pode quebrar a bateadeira a partir de 900 gramas de material. Na maior parte dos casos, a quantidade gira em torno de 600 a 900 gramas (a variação dentro deste intervalo não interfere os resultados). A vasilha com a amostra deve ser pesada, desconsiderando a tara da vasilha, ou seja, obtendo a massa total do solo (parâmetro G_{TOT} ; como apresentado no item 3.4). A amostra deve ser misturada com a bateadeira por 3 minutos, na velocidade número 1, e após parar a máquina, a pá com o solo grudado deve ser retirada, fazendo a primeira pesagem do solo grudado nesta ferramenta (pese a pá antes para retirar a tara), obtendo o parâmetro G_{MT0} . O método até esta etapa é o descrito por Zumsteg & Puzrin (2012).

A próxima etapa é deixar a pá cair no aparato ATUR. Para tal, colocando a pá de cabeça para baixo no dispositivo, levantando-a até a altura máxima possível e soltando-a logo em seguida. A pá deve ser cuidadosamente removida e pesada, fornecendo o parâmetro G_{MT1} . O processo deve ser repetido, pesando novamente e obtendo G_{MT2} e, mais uma vez, G_{MT3} . Logo em seguida, a pá deve ser solta quatro vezes, obtendo G_{MT7} . A cada etapa, a superfície do aparato deve ser limpa e seca, evitando que se grude mais material por causa do solo grudado na superfície da base do ATUR.

A etapa seguinte é a limpeza da vasilha e pá, descrito em 3.3. Após cada teste, deve-se recolher uma amostra para cálculo da umidade, verificando, posteriormente, qual a consistência em que o teste foi efetuado. É importante salientar que todas estas etapas, incluso a limpeza descrita no item 3.4, foram calibradas com o diagrama do Hollmann & Thewes (2012, 2013), conforme detalhado em Oliveira (2018) e Oliveira et al. (2019a). A Figura 7 ilustra estas etapas com o ATUR descritas acima, já com um exemplo de diagrama obtido, mostrando diferenças entre dois solos distintos, um com mais caulinita, que mesmo depois de todas as quedas não há desprendimento de solo, e outro que praticamente todo o material se perde com as quedas.

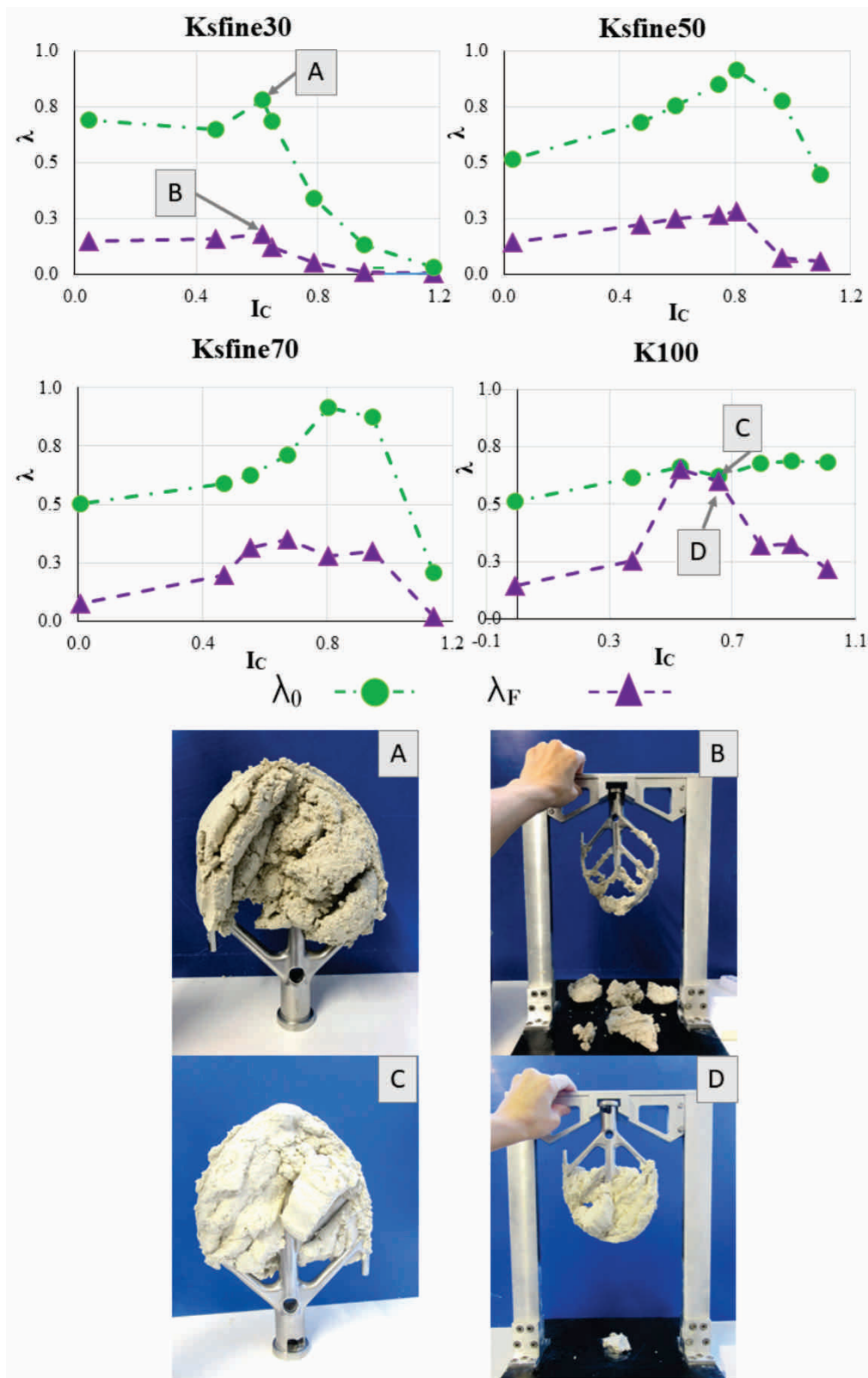


Figura 7. As imagens, assim como pontos no gráfico, A e C mostram duas amostras grudadas na pá antes de utilizar o aparato ATUR, e B e C é o resultado obtido após as sete quedas, sendo λ_0 a variável de clogging sem as quedas da pá e λ_F a variável de clogging modificada, após sete quedas e o ajuste com a limpeza da pá e vasilha. Ou seja, para o solo com 100% de caulinita, mesmo com todas as quedas não há desprendimento de solo, com exceção de uma pequena porção, enquanto para 30% de caulinita praticamente toda a massa se desprende. A nomenclatura indica a percentagem de argila caulinita para cada amostra, sendo Ksfine30, 30% de caulinita, Ksfine50, 50%, Ksfine70, 70% e K100, 100%.

Fonte: Oliveira et al. 2019a.

3.3 Fator CB – Limpeza da vasilha e pá

Após uma grande quantidade de testes, utilizando diferentes amostras de solo, foi possível observar que o processo de limpeza dependia das propriedades do solo. Espécimes com propriedades similares podem não ser tão fáceis de se diferenciar do que solos com propriedades muito diferentes (ou seja, baixa versus alta plasticidade). Certamente, ainda é uma lacuna a ser pesquisada no futuro. Entretanto, extremos como a facilidade de remover e limpar a bacia após um teste feito com uma amostra contendo apenas 30% de fração de argila pouco plástica (caulinita, por exemplo), contra a dificuldade de limpeza do batedor e da tigela após uma amostra de 100% de fração argilosa muito plástica (bentonita, por exemplo), foram claramente evidentes. Além de registrar as dificuldades para remover e limpar a terra descrevendo-a em detalhes, fotos e até mesmo vídeos devem ser gravados, facilitando a comparação posterior entre as amostras (item 3.7).

As Figuras 8 e 9 ilustram alguns exemplos úteis de como é possível diferenciar entre as várias condições de aderência ao remover o solo e limpar as ferramentas. A Figura 10 apresenta a descrição de diferentes condições, onde os solos que são facilmente limpos recebem um fator superior, o que implica uma diminuição do valor final do potencial de clogging (λ_f), conforme apresentado nos cálculos do item 3.4. É importante saber que este foi o ponto mais criticado durante a pesquisa pelos revisores e durante testes com solos naturais realizado em Singapura, percebeu-se que deveriam ser utilizadas frações em vez de apenas números inteiros (por exemplo, por comparação entre diferentes amostras, um peso diferente pode ser atribuído). Este aspecto da metodologia será revisado ao se validar o teste com testes de solos naturais escavados em obras, refinando este parâmetro.



Figura 8. Aumento dos níveis de dificuldade para limpar a tigela após um teste. A facilidade de remover o solo com uma colher também é considerada.



Figura 9. Níveis crescentes de dificuldade para limpar a pá.

Categoria principal	Sub-categoria	Descrição	Valor (CBFactor)
St (duro)	III	Todo material do teste é facilmente removido com as mãos, restando apenas película seca nos dedos.	3
	II	Porção considerável de material pode ser removida com as mãos, restando apenas pequenas porções a serem removidas com água. Quantidade pequena de material preso no fundo da vasilha.	2
	I	Porção significativa do solo fica grudado na pá e vasilhas, algumas vezes até cozido no fundo, precisando de esponja e água quente para remoção.	1
So (macio)	III	Parte do material gruda mas é facilmente removível com água fria, não precisa de sabão. Gruda pouco nas mãos, mas facilmente retirado até esfregando as mãos.	3
	II	Boa parte do material gruda, sendo necessário sabão e água morna para remoção, porém a limpeza não é demorada.	2
	I	Material gruda muito nas mãos, vasilha e pá, muito difícil de remover sem água quente e sabão, deixando esponja suja após limpeza. Precisa deixar de molho algumas horas.	1
Vs (muito macio)	III	Não se remove solo com as mãos porque é muito mole, mas facilmente removível com água fria.	3
	II	Não se remove solo com as mãos porque é muito mole, mas removível com água morna.	2
	I	Solo gruda bastante, deixando tudo sujo. Processo de limpeza é bastante demorado, requerendo água morna e sabão.	1

Figura 10. Fator de limpeza da vasilha e pá (CB_{Factor}), com descrição das categorias e subcategorias no topo, incluindo os respectivos valores a serem adicionados na Equação 4, descrita no item 3.4. Estes valores podem ser fracionados dependendo das condições de limpeza. As setas indicam aumento da consistência ou plasticidade, aumentado em direção às cores mais quentes.

3.4 Cálculos de estimativa de potencial de clogging

Este item apresenta todas as equações necessárias para o cálculo do potencial de clogging. As primeiras equações referem-se aos parâmetros

de clogging λ_0 a λ_r , sendo a Equação (2) utilizada para o cálculo da massa do material antes dessa ser colocada no aparato ATUR, e a Equação (3) utilizada para todas as etapas de queda do material, substituindo o x pelo número de quedas, ou seja, a primeira sendo G_{MT1} e a última, G_{MT7} .

$$\lambda_0 = G_{\text{MTO}} / G_{\text{TOT}} \quad (2)$$

Onde G_{MTO} é a massa total de solo presa inicialmente na pá e G_{TOT} a massa total de solo (método original de Zumsteg & Puzrin 2012).

$$\lambda_1 = G_{\text{MTx}} / G_{\text{TOT}} \quad (3)$$

Onde G_{MTx} é a massa total do solo preso na pá após x quedas com ATUR (sendo $x = 1, 2, 3$ ou 7 , dependendo do número de quedas) e G_{TOT} a massa total do solo.

O parâmetro final de clogging é λ_F , que foi ajustado após vários testes com amostras de caulinita pura, combinado com o diagrama universal do potencial de entupimento de Hollman e Thewes (2012), como explicado em detalhes por Oliveira (2018) e Oliveira et al. (2019a). Este diagrama é o único que foi baseado em uma extensa campanha de testes levando em conta ocorrência de clogging em obras de túneis.

O parâmetro λ_F é definido pela Equação 4, onde λ_x é a média de todos os valores λ obtidos, como indicado na Equação 5. O CB_{Factor} é calculado de acordo com as categorias/subcategorias da Figura 10. Finalmente, a Tabela 1 apresenta as principais categorias potenciais de entupimento. Estas categorias também foram definidas com o procedimento de calibração e precisam de ajustes, dependendo de validações futuras com o cruzamento de dados de laboratório e obras. No caso de amostras classificadas como duras (St na Figura 10, $I_c > 0,75$), um baixo valor de clogging implicará na formação de caroços, assim como indicado no diagrama de Hollmann & Thewes (2012, Figura 4).

$$\lambda_F = (\lambda_x) / CB_{\text{Factor}} \quad (4)$$

$$\lambda_x = (\lambda_0 + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_7) / 5 \quad (5)$$

Tabela 1. Categorias potenciais de clogging definidas pelo parâmetro λ_F .

λ_F	Potencial de Ocorrência de Clogging
$\leq 0,27$	Baixo
$0,27 - 0,48$	Médio
$\geq 0,48$	Alto

É essencial mencionar a flexibilidade do CB_{Factor} , fornecendo a possibilidade de incluir frações para melhor representar duas subcategorias diferentes. Isto poderia ser usado como um tipo de fator de segurança, ou por exemplo, para aumentar os efeitos de clogging de uma superfície jateada de areia (similar a cabeça de corte de tuneladoras), que neste caso, sugere-se subtrair 0,5 do fator CBF final, aumentando o potencial de clogging. Entretanto, isso só pode ser validado com vários testes realizados diretamente na escavação de túneis, como uma reavaliação das estimativas realizadas em laboratório. Em resumo, uma amostra de solo que não tenha nenhuma perda de solo, mesmo após várias quedas (por exemplo, λ_7), logicamente deve ter uma tendência maior de ocorrência de clogging do que outra que a maior parte do solo que se solte da pá logo após a primeira queda (λ_1). Dificuldades para remover um solo da pá ou da vasilha durante os testes também são indicadores de desafios similares de limpeza da TBM durante intervenções no túnel.

3.5 Análise de fluxo e trabalhabilidade

EFNARC (2005) propôs o uso da mesa de fluxo para caracterização de solos arenosos condicionados com espuma. Oliveira et al. (2018b, 2019ab) modificaram o método incluindo medições de fluxo para solos coesivos. Os autores concluíram que solos com o mesmo índice de consistência têm valores de fluxo variáveis. Ajustando o método para se ajustar a solos coesivos, o número de quedas da mesa aumentou de 15 para 40. Propuseram também substituir o teste slump pela mesa de fluxo, apontando diversas vantagens, como a obtenção de uma resposta mais dinâmica do que o slump, a menor quantidade de solo requerido para este teste, possibilitando ser realizado em testemunhos de sondagens e menor demanda física em realizá-lo. A Figura 11 apresenta resultados dos testes com solos misturados com argilas caulinita (Ksfine; roxo no gráfico) ou bentonita (Bsfine; vermelho no gráfico), com diferentes proporções de areia, mas sempre mesma consistência ($I_c = 0$).

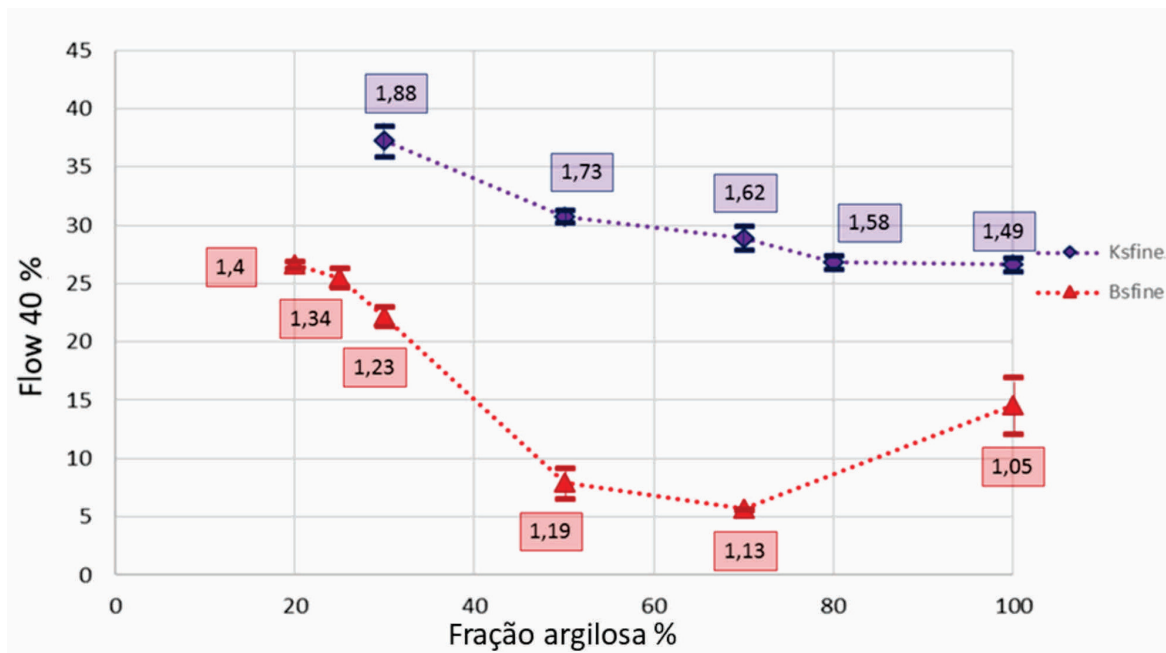


Figura 11. Flow₄₀ (%) para caulinita e bentonita misturados em porcentagens distintas com areia fina, para $I_c = 0$. O número em cada quadrado representa a densidade aparente de cada solo em g/cm^3 .

Fonte: Oliveira et al. 2018b.

Este teste deve ser realizado depois da análise de clogging, com a mesma amostra, condicionada ou não, mas somente para amostras com I_c menor que 0,8 (não viável para amostras mais duras). Para tal, um cone é untado com óleo (película fina, como untar forma de bolo); o solo é moldado dentro do cone, pressionando-o em camadas e contra as paredes do molde para garantir o preenchimento completo. O cone deve ser levantado cuidadosamente e lentamente, e o diâmetro da base do solo medido (m_0). A mesa é golpeada

40 vezes e uma média de três medidas de diâmetro deve ser tomada, obtendo-se m_{40} . Também são tiradas fotos do cone, de modo que sempre que o solo ficasse preso na superfície poderia indicar algumas tendências de potencial de clogging. A Figura 12 mostra a montagem e a rotina do teste e para cálculo do fluxo (Flow₄₀) onde se utiliza a Equação (6).

$$\text{Flow}_{40}(\%) = ((m_{40} - m_0) / m_0) \times 100 \quad (6)$$

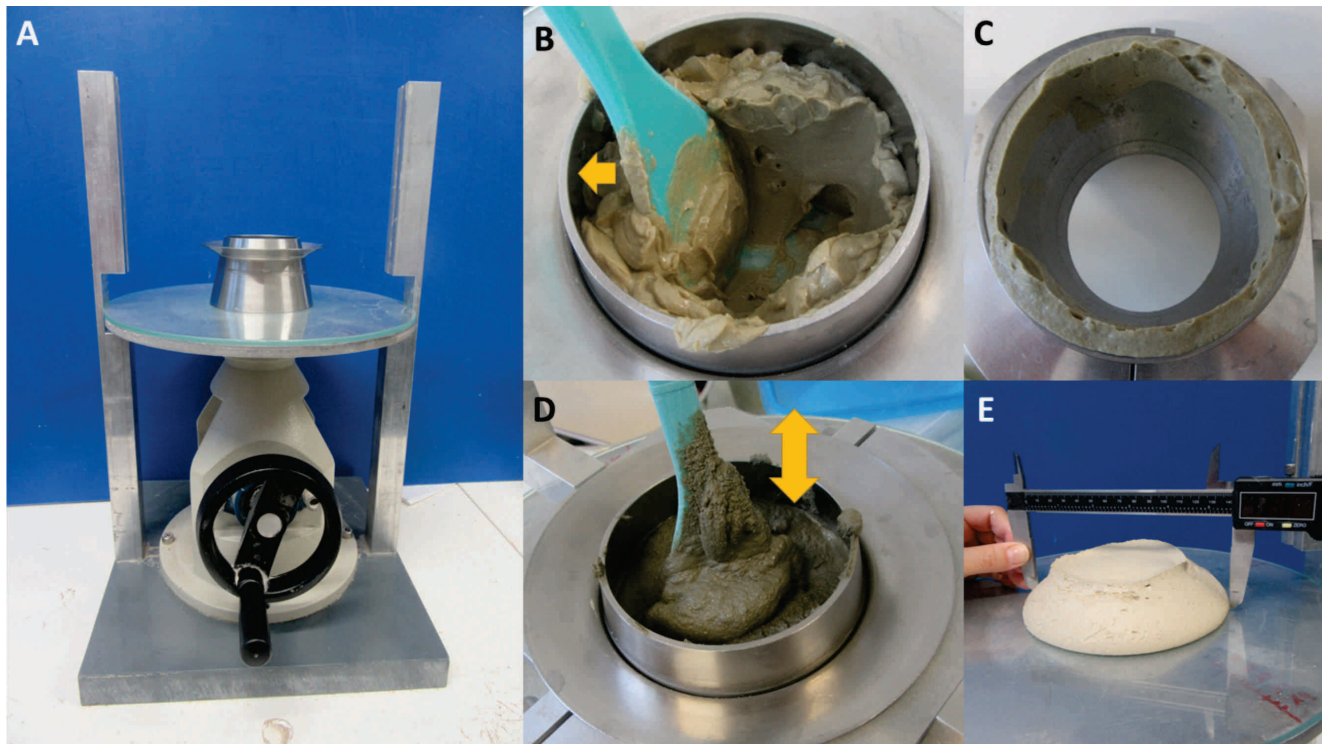


Figura 12. Mesa de fluxo: (a) mesa de fluxo, incluindo uma superfície de vidro; (b) solo sendo inicialmente pressionado contra os cantos do cone; (c) para se evitar que a amostra fique presa no cone, uma película de óleo deve ser anteriormente espalhada no cone; (d) movimentos de subida e descida devem ser feitos, assegurando o completo assentamento da amostra dentro do molde; (e) após o teste, o diâmetro de espalhamento deve ser medido.

3.6 Testes com espuma e polímeros

Certamente esta é a fase que necessita mais desenvolvimento e busca de alternativas, já que é bastante desafiante, desde a parte de se produzir a espuma e obter os parâmetros desejados, até misturá-la em uma amostra coesiva no tempo suficiente antes que a espuma se separe. Ainda mais para testes com amostras coesivas, aonde a espuma utilizada deve ter FER bastante baixo (FER de 5 a 10), caso sejam testados parâmetros mais realistas da operação da máquina. Uma espuma de FER 5 é consideravelmente líquida, já que há pouco ar inserido, se separando rapidamente.

Ressalta-se que o mesmo problema é enfrentado também por outros laboratórios de pesquisa, sem ainda encontrar uma solução ideal. De qualquer forma, o essencial é a comparação entre diferentes produtos e seu efeito na diminuição relativa do clogging, o que se torna possível de se realizar utilizando surfactantes e polímeros em fase líquida para solos coesivos. No caso de solos

pouco coesivos, ou até mesmo arenosos, o mesmo desafio com a mistura com a espuma é inexistente.

Adicionalmente, uma das outras limitações da realização de testes com amostras condicionadas é devido a seu desempenho em pressão atmosférica e em um espaço aberto. Isto ignora um aspecto importante para o condicionamento do solo, que para alguns parâmetros de espuma, o ar fechado poderia se separar do muck (solo condicionado) e seria contido no topo da câmara de escavação, o que poderia representar um desafio para certos cenários de suporte da frente (ou seja, camadas soltas de solo no topo). Em testes de laboratório, esta característica se perde e o que pareceria um condicionamento bem-sucedido no laboratório poderia resultar em uma operação ineficaz do túnel. Isso vale para todas as diferenças entre os testes realizados em pressão atmosférica, enquanto os túneis estão sendo escavados com pressões mais elevadas, especialmente em termos de comportamento da espuma, como já foi apontado por Mooney et al. (2016).

Para a realização dos testes, é importante definir quais I_c serão testados. O I_c do solo deve ser inferior ao I_c desejado, e isto é um desafio para se definir, considerando o FER e o FIR de cada teste e ainda assim estar dentro de parâmetros realistas de operação. É essencial ter em mente que para cada teste, o solo não pode ser reutilizado, portanto, quanto mais testes, maior a quantidade de solo necessária. Portanto, o primeiro passo é planejar os testes necessários. E, uma vez planejados os parâmetros a serem comparados e definido um programa de testes, utiliza-se a mesma sequência descrita nos itens anteriores (3.1 a 3.5), porém adi-

cionando a espuma (ou líquido com surfactante e/ou polímero) na amostra de solo, pesando a massa total, e procedendo com os testes normalmente. A Figura 13 mostra alguns exemplos de amostras condicionadas testadas, assim como alguns resultados. Como mencionado, foi possível tirar principalmente conclusões qualitativas e a informação mais útil foi perceber que um determinado produto que deveria funcionar como um polímero antiaderente para argilas, estava na verdade levando a mais clogging do que apenas o uso de água, ou seja, seria um custo não só desnecessário, mas prejudicial ao andamento da obra.

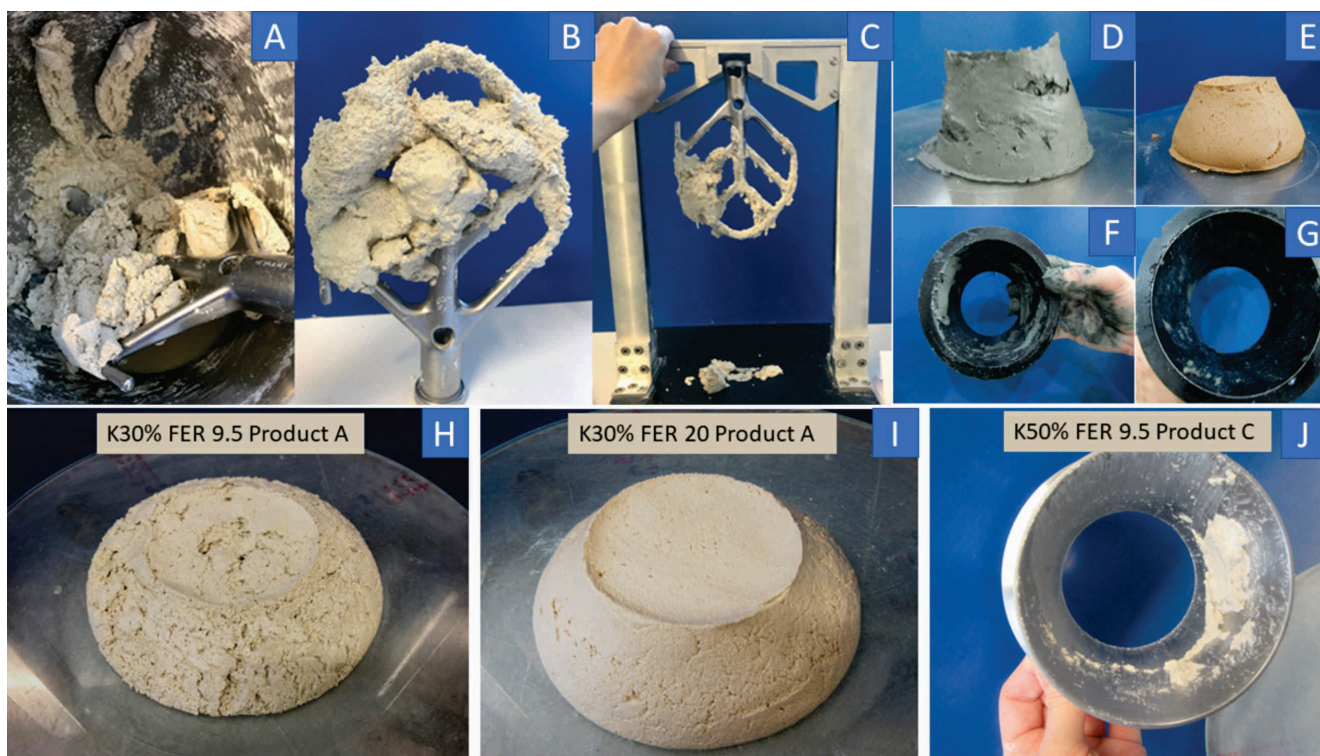


Figura 13. Distintos testes com polímeros e espumas: A, B e C mostram efeito de polímero antiaderente para argilas (Oliveira et al. 2019a); D, E, F e G mostram efeito de condicionantes ou a ausência destes em amostras de solos naturais de Singapura, com ênfase em F, sem nenhum condicionante utilizado para a argila marinha e G, com polímero que funcionou eficientemente para diminuir o clogging. Finalmente H, I e J mostram efeito de distintas espumas e parâmetros. No caso de J, um polímero, também antiaderente, parece aumentou a ocorrência de clogging.

Fonte: Oliveira et al. 2018b.

3.7 Apertando a amostra, fazendo fotos e vídeos

Para compreender o comportamento de clogging, assim como o fluxo e trabalhabilidade de amostras condicionadas, é crucial incluir uma caracterização de-

talhada do solo condicionado com vídeos e imagens. Apertar o solo imita um procedimento de trabalho regular de “sentir o muck” e é uma ferramenta visual-tátil para descrever suas propriedades. Além disso, uma descrição do processo de limpeza das ferramentas para cada amostra enriquece as informações coletadas. Ela

fornece informações sobre os desafios que podem ocorrer durante as intervenções da TBM. Na caracterização geológico-geotécnica, a descrição é um dos aspectos mais importantes. Qualquer aspecto adicional que seja observado no teste poderá apoiar a compreensão da mistura do solo, facilitando assim a estimativa de seu comportamento frente à escavação com a tuneladora.

Com relação especificamente ao “aperto” da amostra, um muck bem condicionado, especialmente um material coeso, fluirá através de sua mão como se você estivesse espremendo uma pasta de dentes para fora do tubo. A forma desta pasta de dente – muck não deve cair facilmente para

o lado (muito macia, pode não manter o efeito tampão do solo na EPB), ou requerer muita energia para ser espremida (muito dura, pode levar a altos valores de torque para a máquina, ou falta de fluxo). A Figura 14 ilustra algumas imagens de solos testados sendo espremidos. Certamente, ele se apresenta como um método subjetivo, mas também facilita a comparação posterior com as condições no canteiro de obras. Também torna o executor do teste familiarizado com os solos, facilitando outras estimativas e comparações entre os solos a serem escavados com uma máquina.



Figura 14. Vários exemplos do material testado sendo espremido após cada teste.

4 APLICAÇÃO PRÁTICA DOS RESULTADOS DE LABORATÓRIO

Quando a pesquisa estava restrita ao laboratório, não estava, todavia, clara se sua aplicação poderia ser estendida realmente a prática, ou seja, às obras de túneis escavados com tuneladoras. Entretanto, desde a finalização da tese de doutorado

algumas campanhas de testes de solos naturais a serem escavados, ou já escavados por tuneladoras foram realizadas, com resultados promissores. Testes foram realizados também dentro da tuneladora, muitos destes sendo pesquisas de caráter confidencial, não podendo, contudo, serem divulgados.

Em Singapura, por exemplo, foram testados todos os solos coesivos da região, todos eles já escavados por TBMs. Notou-se que o solo argiloso denominado de Old Alluvium apresentou um clogging bastante pronunciado quando os testes de laboratório foram realizados. E justamente é este solo que apresentou maior ocorrência de clogging durante escavações em distintos projetos. Este mesmo solo precisou de 40 quedas com o aparato ATUR até que uma pequena massa de

solo se desprendesse, enquanto outros solos como a argila amarela, ou a argila residual do granito Bukih Timah, se desprenderam logo depois da primeira ou terceira queda da pá da bateadeira. Também foram testados alguns polímeros, sendo que um deles apresentou resultados bastante significantes ao desprender todo o material coesivo tanto da pá como do molde da mesa de fluxo. As Figuras 15 e 16 resumem os resultados dos testes realizados em Singapura.

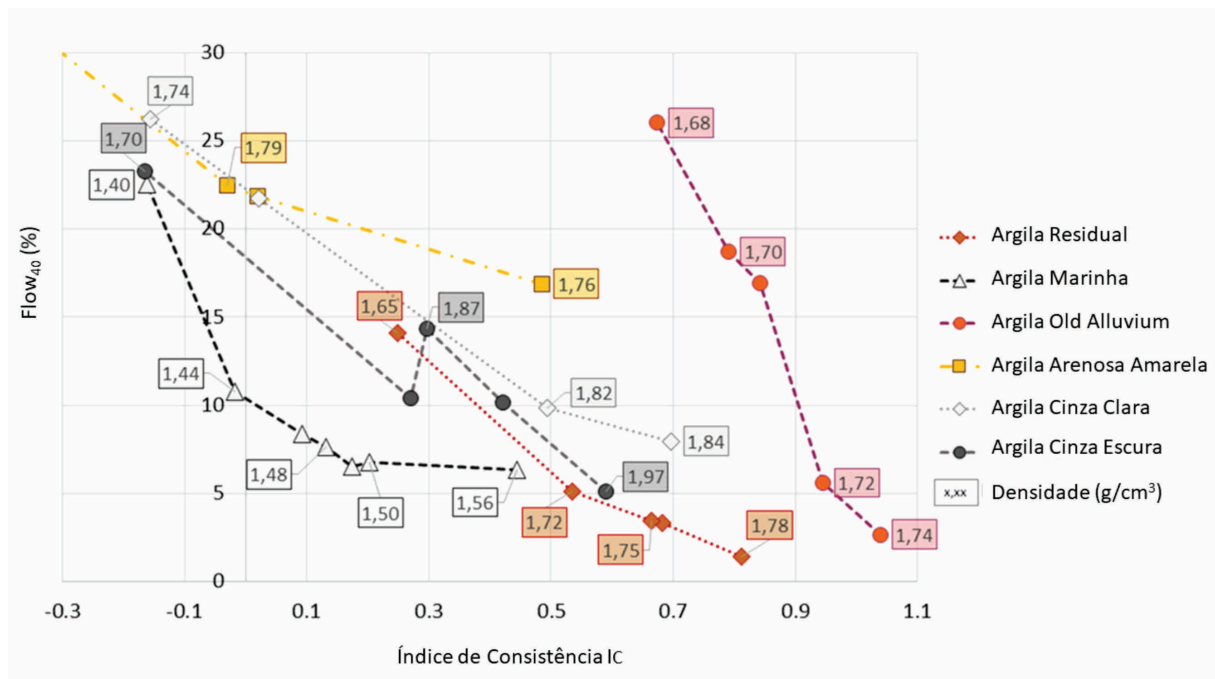


Figura 15. Potencial de clogging versus índice de consistência para os solos testados em Singapura. Os valores nos quadrados mostram as densidades dos solos.

Conforme mencionado, os ensaios permitem também comparar a efetividade de produtos de diferentes fornecedores ao serem aplicados em amostras de solo com potencial de clogging. O gráfico da Figura 17 apresenta um estudo para um projeto em fase de planejamento, onde a efetividade de diferentes produtos quanto à redução de

clogging em amostras obtidas em sondagens do projeto foi testada. Como base para comparação, é utilizada a curva com o condicionamento com água. Plotando-se o potencial de clogging (I_f) medido em diferentes umidades da amostra, ou seja, diferentes acréscimos de espuma, é possível observar a diferença de performance dos produtos.

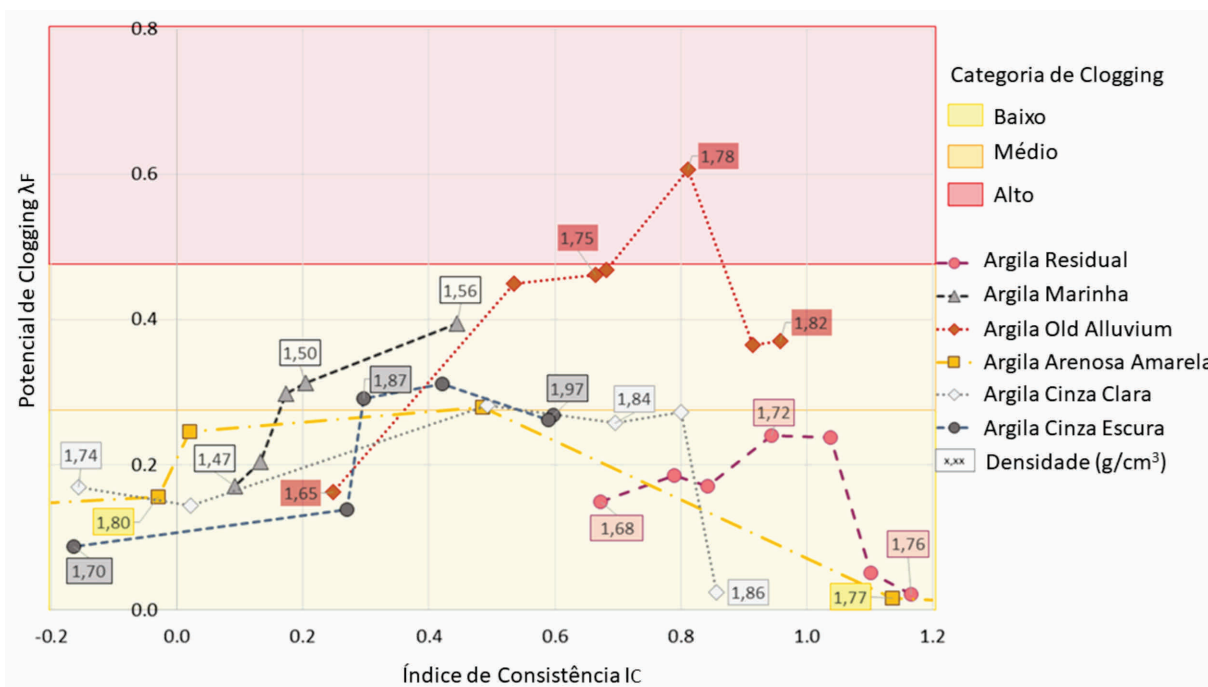


Figura 16. Valores de fluxo após 40 quedas da mesa, comparando diâmetro de espalhamento em relação ao diâmetro inicial.

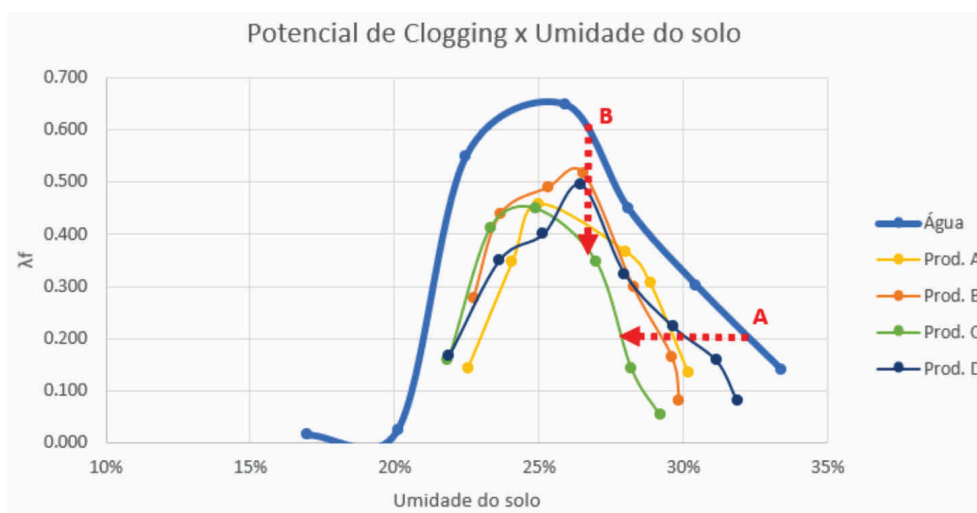


Figura 17. Comparação de diferentes produtos quanto à redução do potencial de clogging.

Diversas conclusões de grande importância para a fase de execução do túnel podem ser obtidas a partir do resultado do ensaio. A reta horizontal "A" mostra que a utilização de espumas permite reduzir a quantidade de líquido que é necessário se acrescentar ao solo (condicionamento) mantendo-se o mesmo potencial de clogging. Neste caso, a utilização de espumas permite reduzir de 8 a 18% no volume de líquido a ser acrescentado. Isso significa redução na quantidade de

água a ser usada e redução no volume de material a ser descartado. A reta vertical B mostra a diferença na efetividade dos produtos. Para a mesma umidade da amostra, ou seja, mesma quantidade de espuma acrescentada, verifica-se uma diferença expressiva no potencial de clogging medido. Com relação ao ensaio com água, o uso de espumas reduz o coeficiente de potencial de clogging de 15 a 40%.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Há diversos projetos de escavação de túneis utilizando tuneladoras EPB a se iniciar tanto no Brasil como na América Latina, havendo uma tendência e aceitação cada vez maior no mercado latino-americano para este método construtivo. É essencial que a comunidade técnico-científica promova os necessários ajustes para a caracterização geológico-geotécnica de projetos de infraestrutura utilizando este método. Muitas das investigações e ensaios geológico-geotécnicos que são necessários para projetos com escavação de túneis em NATM nem sempre serão relevantes para as escavações mecanizadas, assim como há diversos procedimentos de caracterização geológico-geotécnica essenciais para escavações com TBMs que não estão sendo, todavia, realizados. Uma caracterização do material a ser escavado, seja este solo ou rocha, assim como o efeito do condicionamento nestes solos, deve ser realizada até mesmo na fase de projeto.

Esta abordagem, de se caracterizar o condicionamento de materiais escavados e condicionados, até mesmo em fases iniciais, como no projeto básico, já está sendo posto em prática em projetos em fase de planejamento na Europa, pois há o entendimento que este procedimento implicará na contenção de custos na obra, otimização do projeto e diminuição de riscos. Quanto mais contarmos apenas com procedimento de tentativa e erro durante a fase de construção, mais chances estaremos dando para que acidentes ocorram, já que erros no condicionamento de solo em tuneladoras EPB podem ser responsáveis para que perdas de solo significativas ocorram, levando à recalques e até mesmo colapso. Sem contar que há custos elevados em se parar a máquina constantemente, justamente porque não foi feita a escolha do correto aditivo a tempo, ou seja, antes da escavação.

Um outro aspecto essencial de ser mencionado é com relação a reutilização do material de escavação, sendo que há muitas pesquisas e desenvolvimentos nessa direção, principalmente devido a tendência mundial de incentivar cada vez mais processos sustentáveis. É necessário que a escolha do produto químico ideal para uma obra não afete as propriedades do material escavado, principalmente não infringindo a legislação am-

biental. Ao se produzir largas quantidades de rejeito, dependendo da classe, haverá um acréscimo significativo no custo da obra. Por um outro lado, se este mesmo material pode ser selecionado e reutilizado, haverá um decréscimo também significativo, ou seja, a caracterização dos materiais condicionados deve levar a possibilidade de reutilização, ou não destes materiais.

Finalmente, se a intenção é automatizar todo o processo, é justamente essa interação material escavado – aditivo químico – máquina que deve ser compreendido e simulado numericamente, para se alcançar a automação do condicionamento em máquinas EPB, com simultânea caracterização e seleção *in situ* deste material, para que possa ser feita a separação entre materiais de *bota-fora* ou reutilização. Assim a máquina tuneladora se tornaria uma verdadeira fábrica de túneis, incluindo os preceitos da Indústria 4.0.

REFERÊNCIAS

- ASTM C230/C230M. 2014. Standard specification for flow table for use in tests of hydraulic cement. ASTM International, West Conshohocken, PA www.astm.org. doi: 10.1520/C0230_C0230M-14
- ASTM C1437. 2015. Standard test method for flow of hydraulic cement mortar. ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org. do: 10.1520/C1437-15
- ASTM D2216. 2010. Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass. ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org. doi: 10.1520/D2216-10
- ASTM D4318. 2017. Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org. doi: 10.1520/D4318-17
- Classen, J. 2016. Challenges and Solutions Related to the Interaction of Soil Conditioning and Main Drive on Large Diameter EPB TBM's. Proc. Of the ITA-AITES WTC 2016, São Francisco.
- EFNARC. 2005. Specification and guidelines for the use of specialist products for mechanised tun-

nelling (TBM) in soft ground and hard rock. EF-NARC, UK.

Feinendegen, M., Ziegler M., Weh, M., Spagnoli, G. & Stanjek, H. 2010. A new laboratory test to evaluate the problem of clogging in mechanical tunnel driving with EPB-shields. Rock mechanics in civil and environmental engineering. London: Taylor Francis Group.

Feinendegen, M., Ziegler, M., Weh, M. & Spagnoli, G. 2011. Clogging during EPB-tunnelling: occurrence, classification and new manipulation methods. ITA-WTC2011, Helsinki, ITA-AITES.

Galli, M. 2016. Rheological characterisation of Earth-Pressure-Balance (EPB) support medium composed of non-cohesive soils and foam. Doctoral Thesis. Faculty of Civil and Environmental Engineering of the Ruhr-Universität Bochum.

Hanamura, T., 1995. State of the art of the Japanese TBM technology – New Developments. Proc. of the Intern. Lec. Series TBM Tunnelling Trends. Hagenberg, Austria, December 1995, p. 199 – 212.

Herrenknecht, M., Thewes, M. & Budach, C. 2011. The development of earth pressure shields: from the beginning to the present (Entwicklung der Erddruckschilde: Von den Anfängen bis zur Gegenwart). Geomechanics and Tunnelling 4 (1), p. 11-35.

Herrenknecht, M. 2019. Innovations in Mechanized Tunnelling since 1970. Muir Wood Lecture 2019 ITA-AITES WTC 2019, Nápoles.

Hollmann, F. & Thewes, M. 2012. Evaluation of the tendency of clogging and separation of fines on shield drives. Geomechanics and Tunnelling 5, p. 574-580.

Hollmann, F. & Thewes, M. 2013. Assessment method for clay clogging and disintegration of fines in mechanised tunnelling. Tunnelling and Underground Space Technology 37: 96-106. doi: 10.1016/j.tust.2013.03.010

Langmaack, L. 2000. Advanced technology of soil conditioning in EPB shield tunnelling. Presented at the North American Tunneling, p. 525-542.

Maidl, U. 1995. Erweiterung des Einsatzbereiches von Erddruckschilden durch Konditionierung mit Schaum. Dissertation (1995). Technisch-Wissenschaftliche-Mitteilungen des Instituts für konstruktiven Ingenieurbau.

Maidl, B., Herrenknecht, M., Maidl, U. & Wehrmeyer, G. 2012. Mechanised shield tunneling. Ernst & Sohn Verlag, Berlin.

Mooney, M.A., Wu, Y., Mori, L., Bearce, R. & Cha, M. 2016. Earth Pressure Balance TBM soil conditioning: it's about the pressure. Proceedings of the ITA-WTC 2016, San Francisco, p. 22-28.

Oliveira, D.G.G. de, Thewes, M., Diederichs, M.S. & Langmaack, L. 2018a. Consistency index and its correlation with EPB excavation of mixed clay-sand soils. Geotechnical and Geological Engineering Journal, Springer Int. Publ., p. 1-19. doi: 10.1007/s10706-018-0612-x

Oliveira, D.G.G. de, Thewes, M., Diederichs, M.S. & Langmaack, L. 2018b. EPB tunnelling through clay-sand mixed soils – proposed methodology for clogging evaluation. Geomechanics & Tunnelling Journal 11 (4), p. 375-387, doi: 10.1002/geot.201800009

Oliveira, D.G.G. de, Thewes, M. & Diederichs, M.S. 2019a. Clogging and flow assessment of cohesive soils for EPB tunnelling: laboratory methodology and soil characterisation. Tunnelling and Underground Space Technology 94, doi: 10.1016/j.tust.2019.103110

Oliveira, D.G.G. de, Thewes, M. & Diederichs, M.S. 2019b. EPB machine excavation of mixed soils – laboratory characterization. Geomechanics & Tunnelling Journal 12 (4), doi: 10.1002/geot.201900014

Oliveira, D. G. G. 2018. EPB excavation and conditioning of cohesive mixed soils: clogging and flow evaluation. Doctoral thesis, Queen's University, Kingston, 282p. <http://hdl.handle.net/1974/24867>

Peila, D., Picchio, A., Martinelli & D. Dal Negro, E. 2016. Laboratory tests on soil conditioning of

- clayey soil. *Acta Geotechnica* 11, p. 1061-1074. doi: 10.1007/s11440-015-0406-8
- Sass, I & Burbaum, U. 2009. A method for assessing adhesion of clays to tunneling machines. *Bull Eng Geol Environ* 68, p. 27-34.
- Spagnoli G., Fernandez-Steegeer T.M., Azzam R., Feinendegen M., Neher H.P. & Stanjek, H. 2010. Investigation of adherence behaviour and related effects on different scales in mechanical tunnel driving. *Proceedings of Underground Construction Prague 2010, Transport and City Tunnels*, p. 692-699.
- Spagnoli, G., Feinendegen, M., Stanjek, H. & Azzam. R. 2011a. Soil conditioning for clays in EPBMs – part one. *Tunnels & Tunnelling International* 43, p. 56-58.
- Spagnoli, G., Feinendegen, M., Stanjek, H. & Azzam. R. 2011b. Soil conditioning for clays in EPBMs – part two. *Tunnels & Tunnelling International* 43, p. 59-61.
- Thewes, M. 1999. Adhäsion von Tonböden beim Tunnelvortrieb mit Flüssigkeitsschilden. Doctoral Thesis. Bericht aus Bodenmechanik und Grundbau, Bergische Universität Wuppertal, Fachbereich Bauingenieurwesen.
- Thewes, M., Budach, C. & Bezuijen, A. 2012. Foam conditioning in EPB tunnelling. *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground - Viggiani*, p. 127-135.
- Thewes, M. & Burger, W. 2004. Clogging risks for TBM drives in clay. *Tunnels and Tunnelling International* 36, p. 28-31.
- Ye, X., Wang, S., Yang, J., Sheng, D. & Xiao, C. 2016. Soil conditioning for EPB shield tunneling in argillaceous siltstone with high content of clay minerals: case study. *International Journal of Geomechanics*. doi: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000791
- Wehrmeyer, G. & Oliveira, D.G.G. de. Schnecken- und Bandförderung beim maschinellen Tunnelvortrieb. 2020. *Tunnelbau* 2020 (1).
- Zumsteg, R. & Puzrin, A. M. 2012. Stickiness and adhesion of conditioned clay pastes. *Tunnelling Underground Space Technol* 31, p. 86-96. doi: 10.1680/geot.SIP13.P.005

GEOTECHNICAL MAPPING AND ITS APPLICATION IN CITY PLANNING AND ASSOCIATED LEGISLATION

MAPEAMENTO GEOTÉCNICO E SUA APLICAÇÃO NO PLANEJAMENTO DA CIDADE E NAS LEGISLAÇÕES ASSOCIADAS

BRUNO RODRIGUES DE OLIVEIRA

Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Distrito Federal, Brasil, brunorodriguesoli@gmail.com

YAMILA KHRISNA OLIVEIRA DO NASCIMENTO CUNHA

Secretaria de Estado de Desenvolvimento Urbano e Habitação, Distrito Federal, Brasil, millakhrisna@gmail.com

ABSTRACT RESUMO

The urbanization process should not aim to proper areas for urban expansion, but also the request of the environment for demands such as aggregates for civil construction and the availability of surface and underground water for human and animal supply. It is already well known that the urbanization process must consider geological, urbanistic, hydrological, climatological aspects, among others, but some current legislation disregard the importance of these themes. This research presents a history of the application of the urban geology to geotechnical cartography and a discussion of the legislation of Federal District that is related with the cartographic products of geotechnical cartography.

Keywords: Urban Planning, Geotechnical Cartography, Applied geology.

O processo de urbanização não deve almejar somente as áreas adequadas para a expansão urbana, mas também a solicitação do meio ambiente de demandas como agregados para construção civil e disponibilidade de águas superficiais e subterrâneas para o abastecimento humano e animal. Já é bastante conhecido que o processo de urbanização deve considerar aspectos geológicos, urbanísticos, hidrológicos, climatológicos, entre outras, mas algumas legislações vigentes desconsideram a importância dessas temáticas. Essa pesquisa apresenta um histórico da aplicação da geologia no meio urbano até a cartografia geotécnica e uma discussão acerca das legislações do Distrito Federal que tem relação com os produtos cartográficos da cartografia geotécnica.

Palavras-chave: Planejamento urbano, Cartografia geotécnica, Geologia aplicada.

1 INTRODUCTION

“The number of possibilities for the application of geological knowledge in planning is very extensive and it is not worth to have pages just listing all of them.” (Legget, 1973). However, geology is not the only science required in the planning process and, even with its increasing application and the notoriety of geosciences in harmonizing the changes caused by man and the environment, the applicability of the discipline in urban planning is still little known, mainly from the public.

Surface land is an expression of subsurface geology, so those involved in the planning process must understand the geological aspects (BELL, 2009). These statements make a lot of sense when it is noticed that cities are settled on deposits of residual or transported unconsolidated materials arising from the process of alteration of a given geological unit. In view of the above, several authors (LEGGET 1973; JEFFERIS 1986; SANTOS 2008; BELL 2009; CULSHAW & PRICE, 2010; SANTOS, 2017) emphasize the need for knowledge of the geology of the area to be planned, which must be appreciated and incorporated into the process urban planning. However, the work of geologists in this process is unusual and there are several factors that lead to this situation.

It can be mentioned the lack of knowledge of the applicability of geology in urban planning by the professionals involved in city planning, or the inefficiency of geologists to demonstrate the relevance of its use as the main causes of the small role of geologists in this area (CULSHAW & PRICE, 2010). This is aggravated by the fact that reports written by geologists have a technical focus on geology and are understood mainly by specialists in geology (CHAND, 1999).

The geologist who is dedicated to solving urban problems, working in the urban planning process, must necessarily have a broad technical and urban vision of the city, knowledge that is not included in the professional training of geologists (OLIVEIRA & MONTICELLI, 2018). It is also important for the professional to be aware of the requests that different types of projects have on the land, which will allow him to guide the investigation campaign and the communication of results (SANTOS, 2008).

Add to the reasons the lack of vision by part of some professionals of the need for a multidisciplinary approach, both in the team working in the planning process, and in the aspects to be evaluated. Sometimes, the concentration of concerns and responsibilities, called “environmental” by planners, commonly leads to the general idea that all the rest of public organizations are uncompromising to consider these aspects on the grounds that this theme is not theirs.

Santos (2017) and Oliveira & Monticelli (2018) report the importance of architecture and urbanism to adopt the principles of sustainability, since essential aspects related to serious and costly problems of geological-geotechnical nature are often related to the mismatches between architectural concepts and natural characteristics of the physical environment.

Considering the above, this paper aims to discuss the importance of geotechnical maps in urban planning and to identify the relationship, or the lack thereof, in legislation related to urban planning such as Master Plan for Territorial Planning (PDOT), Law of Land Use and Occupation (LUOS), Soil Installment Law and Ecological Economical oning (EEZ). The choice of the Federal District (DF) as the object of study for evaluating legislation is due to the current PDOT / DF review process.

2 URBAN GEOLOGY

Urban geology is a specialty claimed by some geologists, whose area of expertise encompasses both regional geology and applied geology, which emphasizes the use of geological principles and knowledge to solve construction and environmental problems in urban areas or surroundings (KARROW & WHITE, 1998).

According to Rodriguez (1998), urban geology deals with the geological, geomorphological, geotechnical and hydrogeological knowledge necessary to subsidize man’s interventions in the urbanization process, producing the least possible impact.

Bathrellos (2007) corroborates the definition presented by Karrow & White (1998) when

defining urban geology as the application of geological knowledge for the planning and management of metropolitan areas. The author adds that the discipline involves subdisciplines that contribute to the definition of areas for waste disposal, delimitation of mineral deposits and identification of risk conditions, and points out that the geotechnical aspects are the competence of engineering geology.

Culshaw & Price (2010) define urban geology as the study of the interaction between human and natural processes with the geological environment in urbanized areas, and the resulting impacts, and the provision of geoinformation that allows sustainable development, regeneration and conservation of cities. The authors do not define the types of knowledge involved or the purposes, but that the discipline must seek harmony between the urbanization process and the environment.

Based on the authors, urban geology is understood as the application of geological and related principles and knowledge to obtain geoinformation about the surface and subsurface conditions of the land, aiming to define land use and occupation guidelines. Such guidelines must be capable of reconciling the requests and demands of the urbanization process and the capacity to support the environment in order to avoid geotechnical and environmental problems, resulting in a sustainable and compact occupation process.

It is important to differentiate urban geology from geology performed in urban areas. Many geologists prefer to do geological mapping in less developed areas due to the little disturbance of the environment and the greater challenges related to working in urban areas, since the outcrops would only be available during excavations and would need a constant mobilization of researchers (SHOWSTACK, 2014). Research such as the definition of geological routes and the study of the geological elements present in buildings and monuments would also fall into the category of geology carried out in urban areas.

Bathrellos (2007) reports that, since the term Environmental Geology (GA) appeared, the terms Urban Geology (GU) and Engineering Geology (GE), which are areas derived from

terminology, have been less used. GE is the science dedicated to the investigation, study and solution of engineering and environmental problems arising from the interaction between the works and activities of man and the geological physical environment, as well as the prognosis and the development of preventive or risk repair measures (SANTOS, 2008). GE, formerly called applied geology, received the name of Engineering and Environmental Geology (GEA), which operates in environmental management, in the implementation of infrastructure works, in urban and regional planning and in other specific technical areas (OLIVEIRA & MONTICELLI, 2018), being the term currently used. A history of GEA is presented by the aforementioned authors, in which the consideration of environmental aspects associated with geological geotechnical aspects has become essential since 1986.

2.1 History of urban geology to geotechnical cartography

The application of geological knowledge in planning and construction dates from Babylonian times (LEGGET, 1973), however, one of the first works involving geologists in the urban environment was in 1843 in Great Britain, whose objective was to inquire about the state of cities and populous districts regarding public health (ANON, 1900 apud CULSHAW & PRICE, 2010).

Culshaw & Price, (2010) report that initiatives related to urban geology did not continue after the First World War due to the emergence of Soil Mechanics, despite Dearman (1991) exposing urban geological maps prepared in Germany. The elaboration of works in this area resumed after the Second World War, probably due to the emergence of the belief in urban planning (CULSHAW & PRICE, 2010).

Urban geology began to develop in the 1950s, particularly in California, in relation to land use and occupation planning, whose experiences led Robert Legget to publish the book "Cities and Geology" in 1973, considered the main reference in this theme. In this decade, the applicability of geology in the urban planning process was recognized, making it essential to present

information that contemplated aspects relevant to civil engineers, architects, geographers and other professionals working in urban planning.

Mulder (1993) presents an article reviewing the state of the art on urban geology in Europe and shows that studies have been developed since 1920 and that, in the 90s, there was a great deal of attention focused on the knowledge of geological conditions in the urban areas. The author notes that the increase in the use of hydrogeological and geotechnical models in the late 1970s made it possible to predict and quantify the effects of urban interference on the geosphere.

Davies (2015) presents a compilation of case studies in the largest urbanized African areas (Cairo, Lagos and Kinshasa) that discuss the assessment of the dynamics of geoenvironmental phenomena and the description and analysis of geological data in order to demonstrate the application of urban geology in the construction and Africa's development. Since the 1980s, the Association of Engineering and Environmental Geologists encouraged the publication of papers to document the development of urban geology, which varied in content and data quality.

Davies (2015) reinforces the application of geotechnical databases in civil construction to solve problems of a geological nature and, considering that engineering problems are related to local geology, the solutions adopted in a given area can be applied later in places with similar geological conditions.

In Brazil, according to Rodriguez (1998), the term Urban Geology was used for the first time at the 38th Brazilian Congress of Geology, naming one of the symposia of that event, which took place in 1994. However, applications of geological knowledge to urban problems have been found in the records of Brazilian Geology Congresses since the 1960s. The author also presents a history in the technical-scientific environment of the use of geology in city planning in the 80s and 90s that demonstrates an increase in the number of works related to urban Geology, presented at geological congresses of the Brazilian Society of Geology, between 1967 and 1996.

In later years, attention was turned to geotechnical cartography applied to urban planning, which ended up becoming one of the

main instruments used for this purpose, even though in the 70s and 80s, in several works, there was a concern turned to geotechnical maps with this objective (PELLOGIA, 1997).

Pellogia (1997) indicates that at least 60% of the works at the 1st Brazilian Symposium on Geotechnical Cartography, in 1993, dealt with the theme of urban planning. Tominaga et al. (2004) and Paula & Cerri (2008) state that most of the maps produced aim to guide urban and regional planning and the Federal District does not escape this rule. In the following topics, a better detail about this instrument and its importance will be elaborated.

The geotechnical cartography applied to urban planning became so big that the Brazilian Geological Service (SGB) or also known as the Mineral Resources Research Company - (CPRM), adopted geotechnical maps as one of the main instruments used to assist in spatial planning. Unfortunately, this fact only occurred due to the occurrence of natural disasters in Brazil, especially in the 2010s, which led to awareness of the importance of using geotechnical maps in urban planning, whose obligation was established in Law No. 12,608 of April 10, 2012 (BRASIL, 2012).

3 GEOTECHNICAL CARTOGRAPHY

The geotechnical chart is an essential basic tool for the prevention and correction of situations related to natural and technological disasters (COUTINHO, 2013). It also has the important role of making communication between geologists and planners allowing aspects of the environment to be considered during planning.

According to Prandini et al. (1995), geotechnical maps are products of the application of geological knowledge in solving problems related to land use and cover, in addition to serving as a basis for the development of preventive or corrective measures in order to reduce environmental problems and risks to enterprises.

The geotechnical chart synthesizes the knowledge about the physical environment and its active processes (geo) in a given area, in order to assist the development of measures for the

adequate occupation of the soil (technique). This chart therefore constitutes a product resulting from the need to characterize the land, committed to an intervention or solution for the use and occupation of the soil. Therefore, the land units are delimited, whose zoning establishes the division of the soil into homogeneous areas or domains (COUTINHO, 2013).

Geotechnical maps provide information on the components of the physical environment and the local that are significant to the purpose of the chart and that help the relationship between man and the environment without causing negative impacts to both parties. It is important that the cartographic products are clear and objective and serve as a guide for later stages of investigations (OLIVEIRA, 2018) in addition to being capable of understanding by other professionals.

For geotechnical maps, whose purpose is urban planning, its elaboration is commonly carried out at the scales 1: 100,000 to 1: 10,000, for places where the expansion activity occurs in a disorderly, inadequate manner or in places with several available research data. However, the use of scales between 1: 2,500 and 1: 1,000 is the most recommended (DEARMAN, 1991).

In municipal regional maps, intended for land use planning and management and which rarely use quantified geological-geotechnical parameters, a scale of representation of 1: 25,000 is recommended. In the detailed maps, aimed at fitness and urbanization, on scales 1: 10,000 or greater, the quantification of parameters is expected. Both are, with different scope, one of the fundamentals for the elaboration of the methodological strategy that meets the National Program for Risk Reduction and Disaster Response (COUTINHO, 2013).

Following Coutinho's (2013) proposal, the Brazilian Geological Service adopted three scales for the elaboration of maps applied to urban planning based on the progressive detailing methodology. The maps are drawn up at scales 1: 25,000 for assessing susceptibility to gravitational mass movements and floods, 1: 10,000 for defining aptitude for urbanization and 1: 2,000 or greater for risk assessment, each with a purpose different.

In addition to the scale and purpose of geotechnical maps, methodology is also a

very important factor to be considered. Some methodologies have been proposed to serve specific purposes while others have general procedures and can be adapted, depending on the purpose. It is worth mentioning that, regardless of the methodology adopted, some aspects such as geology, soils, surface and underground waters, anthropic actions, geomorphology and geodynamic phenomena are fundamental for the elaboration of a geotechnical chart.

4 LEGISLATION ASSOCIATED WITH GEOTECHNICAL CARTOGRAPHY IN THE FEDERAL DISTRICT

Urban planning, especially when developed in accordance with the regulation of land use, is essential for cities in order to control urban expansion (FELTRIN & RAIJA JUNIOR, 2013). Article 4 of Law No. 10,257 of July 10, 2001 (BRASIL, 2001), known as the City Statute, defines a series of instruments that must be taken into account when the objective is to achieve adequate urban planning. Among the existing urban policy instruments, some affections to the Federal District and some Federal Laws that are directly related to urban planning will be presented and the applicability and its relationship with geotechnical maps will be discussed.

4.1 Law n° 12,608 of april 10, 2012

Law No. 12,608 / 2012 (BRAZIL, 2012a) institutes the National Policy for Civil Protection and Defense (PNPDEC) which aims to integrate into the policies of territorial ordering, urban development, health, environment, climate change, resource management water, geology, infrastructure, education, science and technology and other sectoral policies, with a view to promoting sustainable development (BRASIL, 2012).

In addition to other measures, the Law determines preventive instruments, among them, the mapping of areas at risk to mass gravitational movements and flooding and the elaboration of geotechnical maps for urbanization, both large-scale cartographic products, which must

presented in the next review of the Master Plan.

Article 22 of Law No. 12,608 / 2012 (BRASIL, 2012), amends Law No. 12,340 / 2010 (BRASIL, 2010), establishing that municipalities must prepare the geotechnical charter for urbanization, defining urban guidelines aimed at the security of new land installments.

Among one of the articles that have been changed, Art. 42 can be cited, which defines that the Master Plan must contain at least the delimitation of the urban areas where compulsory subdivision, building or use can be applied, considering the existence of infrastructure and demand for use, in the form of Art. 5, provisions required by Arts. 25, 28, 29, 32 and 35, of a monitoring and control system (BRASIL, 2001).

In addition to the content provided by the art. 42, due to Law No. 12,608 of April 10, 2012 (BRASIL, 2012), the Master Plan dos Municípios included in the national register of municipalities with areas susceptible to the occurrence of high impact landslides, sudden floods or related geological or hydrological processes should to contain:

[...]

II - mapping containing the areas susceptible to the occurrence of high impact landslides, sudden floods or related geological or hydrological processes;

III - planning preventive intervention actions and relocating the population to areas at risk of disaster;

IV - urban drainage measures necessary to prevent and mitigate the impacts of disasters;

[...]

§ 1 The identification and mapping of risk areas will take into account the geotechnical maps.

[...]

In order to fulfill the demand defined in item II, the Geotechnical Charter for Susceptibility to Geodynamic Phenomena is necessary, a cartographic product that allows the identification of suitable areas with restrictions on occupation in the face of natural disasters.

As for items III and IV, in order to properly plan structural interventions, the planner needs a Risk Chart that aims to reduce or eliminate risk situations in the short term, in addition to subsidizing risk planning and management

instruments and assisting in the adoption of engineering solutions, structural or non-structural interventions.

The national register of municipalities with areas susceptible to the occurrence of high impact landslides, sudden floods or related geological or hydrological processes has not yet been established. However, areas of risk to geodynamic phenomena similar to the aforementioned ones were identified in academic research (BATISTA, 2014) and by the Civil Defense in 2015 and 2016, underscoring the need to prepare cartographic products.

4.2 Soil installment law

Law No. 6766 of December 19, 1979 (BRAZIL, 1979) provides that the Land Installment for urban purposes can only be done through subdivision or dismemberment, subject to the provisions of this Law and those of the relevant state and municipal laws. Allotment is the subdivision of land in lots for the building, with the opening of new traffic routes, public places or extension, modification or expansion of existing roads.

The cases of prohibition on the subdivision of urban land are presented in Art. 3, which defines that only the subdivision of land for urban purposes in urban areas, urban expansion or specific urbanization, as defined by the Master Plan or approved by municipal Law, will be allowed. The same article lists the prohibitions on land parceling in the form of items:

I - in wetlands and subject to floods, before taking steps to ensure the drainage of water;

II - on land that has been filled with material harmful to public health, without being previously sanitized;

III - on land with a slope equal to or greater than 30% (thirty percent), unless specific requirements of the competent authorities are met;

IV - in lands where geological conditions do not advise the building; and

V - in areas of ecological preservation or in those where pollution prevents bearable sanitary conditions, until their correction.

Items I and IV are directly related to the Chart of Susceptibility to Gravitational Movements of Mass and Floods, which classifies the lands

in different degrees regarding the propensity to physical processes that can generate disasters, and to the Geotechnical Chart of Aptitude to Urbanization, which contains the result of an assessment of the hazards associated with physical processes and recommendations for urban land use according to the limitations and potential of each delimited geotechnical unit, in addition to the Hazard and Risk Maps that are the result of risk analysis, pointing out sectors and buildings in situations of higher or lower risk (BITAR et al. 2015).

Regarding item III, a simple routine in a GIS is able to identify areas with slopes higher than the limit defined in the law, however the section “unless specific requirements of the competent authorities are met” generates two questions: What are these requirements? And what are the instruments that define them? In the Master Plan de São Paulo (PDOT-SP), the requirements are defined by the geotechnical maps, which in turn are provided for in the National Plan for Risk Management and Response to Natural Disasters (BRASIL, 2012).

The Urbanization Aptitude Charter further states that the approval of the Allotment and Dismemberment project, in the municipalities included in the national register of municipalities with areas susceptible to the occurrence of high impact landslides, sudden floods or related geological or hydrological processes, will be linked to the fulfillment of the requirements contained in the chart (Paragraph 2 of Article 12).

Ecological Economical Zoning (ZEE)

Ecological Economical Zoning of Federal District - ZEE-DF is a strategic instrument for territorial planning and management, whose guidelines and criteria begin to guide district public policies aimed at sustainable socioeconomic development and improving the quality of life of the population (BRASIL, 2019a).

ZEE-DF, Law No. 6269, of January 29, 2019 (BRASIL, 2019a), established a zoning of risks, both ecological and socioeconomic, which must be considered for the definition of zoning of uses, within the scope of planning and territorial management. Among the objectives of the Law provided for in Article 5, items V and VI stand out, transcribed below:

V - incorporate the assessment of ecological risks in formal planning instruments and public and private management to guarantee the integrity of ecosystems;

VI - to guide public and private agents regarding the observance of the environmental support capacity, in the elaboration and execution of public policies;

[...]

IX - preserve and protect the waters in the territory of the Distrito Federal, promoting management and management actions aimed at stabilizing or raising water levels in aquifers and improving the quality and quantity of surface water, recognizing and valuing its various dimensions, uses multiple and the distinct visions and values associated with them as the birthplace of waters in three Brazilian hydrographic basins;

[...]

The ecological risks listed in item V and defined as relevant were: Ecological Risk of Loss of Aquifer Recharge Area in the Distrito Federal; Ecological Risk of Soil Loss from Erosion in the Distrito Federal; Ecological Risk of Subsoil Contamination in the Distrito Federal; and the Ecological Risk of Loss of Remaining Native Cerrado Areas in the Distrito Federal.

Regarding item VI, there is a special importance when it mentions “guiding public and private agents regarding the observance of the environmental support capacity”, emphasizing the need for consideration of the environment in planning.

Item IX highlights the concern with the water availability of the DF, which is directly related to the recharge of aquifers, which, in turn, depends on the infiltration capacity, permeability and soil coverage, aspects that can be addressed in geotechnical maps if requested by the Government.

Finally, when talking about urban areas, there are other risks commonly associated with geodynamic phenomena or occupations in inadequate areas. As previously said, geotechnical maps are essentially the application of geological knowledge in solving problems related to land use and it is up to planning, through instruments such as the Master Plan de Ordenamento Territorial (PDOT), the presentation of these cartographic products and the addressing these issues.

4.3 Master Plan for Territorial Planning of Federal District (PDOT/DF)

Master Plan is a basic instrument of urban development and expansion policy which must be reviewed at least every ten years. The City Statute (BRASIL, 2001) defines Master Plans as being mandatory for cities with a population above 20 thousand inhabitants and can be defined as a set of principles and guidelines that guide the use of urban space (FELTRIN & RAIJA JUNIOR, 2013).

In DF, PDOT was instituted by Complementary Law n° 803, of April 25, 2009 (BRASIL, 2009) and updated by Complementary Law n° 854, of October 15, 2012 (BRASIL, 2012b).

Article 37 of the PDOT presents the guidelines for urbanization and land use and occupation:

- I - the establishment of more compact urbanized areas in the territory;
- II - structured urbanization along the main connecting infrastructures, with increasing demographic densities along the structural road network;
- III - the expansion of urban land in continuity with the existing urban centers and in transition with rural areas that suffer urban pressure, observing the capacity of socioeconomic and environmental support of the territory;
- IV - avoid the segregation of uses, promoting their flexibility, in order to reduce displacements and balance the distribution of places of employment and work in the Federal District;
- V - promote the integration of residential subdivisions distributed in a dispersed and fragmented manner in the territory among themselves and with the neighboring consolidated urban centers;
- VI - stimulate the occupation of residual voids in urbanized areas endowed with services, infrastructure and equipment, preferably the creation of new urban areas, in order to optimize the capacity of the installed infrastructure and reduce urbanization costs, observing the environmental conditions of the territory;
- VII - propose and admit new forms of urbanization;
- VIII - to enable the occurrence of different architectural types and facilitate the adaptation of buildings to new uses;
- IX - progressively reduce the urban social deficit represented by the lack of urban infrastructure, social services and housing, through investments and the application of the legal, tax and financial

instruments provided for in this Complementary Law.

Single paragraph. Only the occupation of areas that do not have environmental restrictions will be allowed, observing the specific legislation for environmental licensing.

This aforementioned article does not present specific guidelines related to the prohibition on the occupation of environmentally vulnerable and risky areas, or on the environmental support capacity, which is currently supplied by the ZEE-DF. However, in Art. 191, transcribed below, which deals with the granting of special use for housing purposes, areas that present a risk do not mention the use of any cartographic product that supports the application of the article.

Art. 191. Areas that present a risk to the safety of the population or an environmental risk are not eligible for special use for housing purposes.

Single paragraph. Risk areas are considered for the purposes of this Complementary Law:

I - areas whose geological and topographic characteristics present a risk to the resident, such as geotechnical instability related to landslides, rupture of massif and erosion, or risk of fire, post-fire impacts and risk of flooding;

II - areas whose degradation could compromise the resources and environmental quality of the region, representing a risk to the community, and which cannot be solved through works.

In this sense, geotechnical maps of susceptibility, aptitude for urbanization and risk allow the identification of areas unsuitable for urban and risky occupation, which would be a tool of great importance for planners in the effective application of the aforementioned article.

Among the types of geotechnical maps, the aptitude for urbanization is the most appropriate choice because they are designed to stimulate urban development in safe locations, combating the occupation of environmentally vulnerable and risky areas. In the case of areas already occupied, risk maps will be more appropriate depending on their level of detail.

4.4 Law of Land Use and Occupation (LUOS)

The Law of Land Use and Occupation of Federal District, Complementary Law No.

948, of January 16, 2019 (BRASIL, 2019b), is the complementary instrument of the territorial planning and urban expansion and development policies of the Federal District. This Law establishes the criteria and parameters for land use and occupation for plots and projections located in Urban Macrozone of the DF and in the urban subdivisions registered in a real estate registry office, implemented and / or approved by the government.

Chapter V of this Complementary Law deals with the use and occupation in urban land parceling projects, new or land regularization, however, at no time mentions the need to assess environmental capacity, or the existence of risk areas as one of the criteria permission to occupy a particular region.

Given the importance and scale of application of LUOS, aspects other than urban planning should be considered in its preparation and application. Permission to use the subsoil should consider aspects such as excavation, while, for lots that present some risk, the permission to use should only be granted in cases where the necessary measures are taken.

The current text of LUOS was designed only for the regularization of existing uses in the territory and does not seek integrated development with environmental protection.

4.5 Urbanistic guidelines

The Urbanistic Guidelines will be issued by the managing body of the territorial and urban development of the Federal District, considering the provisions contained in the current PDOT and the established in art. 6 of Federal Law nº 6.766 / 1979 (BRASIL, 1979), and more restrictive conditions can be established through environmental and urban studies (BRASIL, 2009).

The Guidelines have a validity period of 4 (four) years, and may be reevaluated in a shorter period, according to public interest or unless changes in legislation that imply alteration of land use and occupation happen. The document presents at least the principles of urbanization, the Road System and Circulation Guidelines, Land Use and Occupation, Population Density, Public Areas, Urban Design, Urban Infrastructure, in

addition to a characterization of the environment and other information related to the area of study.

The Guidelines guide the use and occupation of land in order to constitute an integrated urban space, composed of articulated parcels and which complement each other in the offer of uses and activities, contributing to the quality of life of the population. They are a prerequisite for beginning the process of regularizing occupied areas and for the authorization of new installments, and consider all the aforementioned legislation.

Among the Urbanistic Guidelines, only the updating of the Taquari Housing Sector Guidelines - Stage II, still in the elaboration stage, used information from a geotechnical chart in its elaboration.

5 CONCLUSIONS

In view of all the discussion presented here, it was possible to realize that the planning and urbanization process, despite having an extensive legal framework, needs to appropriate a much broader approach than just "urban expansion". The concern with the environment, characterization of the geological-geotechnical, availability of surface and underground water for supply, better techniques of civil construction, and quality of life of the population must be priority of an adequate urban planning.

We reinforce the importance of multidisciplinary during planning, not only of Geology, but also of Urbanism, Hydrology, Climatology, among others. Each author sought to disseminate this knowledge with their respective approaches, but all converge to the application of geological knowledge aiming at sustainable development or the non-exposure of the population to risk situations.

However, it is not uncommon for this information to be presented in raw form, that is, without proper interpretation for urban planning purposes. Thematic maps that present information about the geology, geochemistry of rocks, soils and waters, geotechnical properties of soils and rocks, mineral resources, especially building materials, geotechnical classification of slopes, landslides, areas prone to flooding, flow pattern groundwater, and others, are examples of

extremely important raw information, however it is necessary to translate these aspects into derived maps, which will be easier for planners and managers to use.

Thus, the importance of geotechnical cartography in urban planning is emphasized. In addition, the current legislation on the subject could benefit from the cartographic products already mentioned. The maps must be drawn up on the scales: 1: 25,000 for the assessment of susceptibility to gravitational mass movements and floods, which can be used to restrict areas subject to occupation; 1: 10,000 for the definition of aptitude for urbanization, which can be used for the most diverse purposes, from choosing suitable places for urban expansion to identifying places that must be preserved in order to use natural resources (eg natural materials construction, water resources, among others); and 1: 2,000 or greater for risk assessment that can be used to identify buildings in situations of risk, places where structural and non-structural interventions are needed, among others.

Eight years after the approval of Law No. 12,608 / 2012, the national registry of municipalities with areas susceptible to the occurrence of high impact landslides, sudden floods or related geological or hydrological processes has not yet been instituted. Even so, these cartographic products are widely used in the technical scientific environment. Although the Federal District has at least nineteen researches between master's dissertations and doctoral theses, six of which since the approval of the Law, related to geotechnical cartography, none of these works were considered in the Law of ZEE, LUOS and the review process of the PDOT.

Therefore, planners are recommended to multidisciplinary and qualify the teams responsible for the preparation of these cartographic products or to hire an outsourced team to perform the service. A possible alternative is to strengthen the relationship between the public service and the academy, since these cartographic products can be the result of cooperation between researchers and the government.

ACKNOWLEDGMENT

We thank the geotechnical postgraduate program at the University of Brasilia.

REFERENCES

BATISTA, P.H.L. 2014. Cartografia geotécnica aplicada aos riscos de alagamento e inundação na bacia do rio São Bartolomeu. 2014. xix, 223 f., il. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

BATHRELLOS G.D. 2007. An overview in urban geology and urban geomorphology. Bulletin of the Geological Society of Greece vol. XXXX, 2007. Proceedings of the 11th International Congress, Athens, May, 2007, 11 p.

BELL. F.G. 2009 Environmental Geology and Planning. Geology In: editado por Benedetto De Vivo, Bernhard Grasemann, Kurt Stüwe. Geology Vol. V. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), 457 p.

BRASIL 1979. Lei nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979. Dispõe sobre o parcelamento do Solo Urbano e dá outras Providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 11 p.

BRASIL. 2001. Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências.

BRASIL 2009. Lei Complementar n.º 803, de 25 de abril de 2009. Aprova a revisão do Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal – PDOT e dá outras providências.

BRASIL 2010. Lei nº 12.340, de 10 de abril de 2010. Dispõe sobre as transferências de recursos da União aos órgãos e entidades dos Estados, Distrito Federal e Municípios para a execução de ações de prevenção em áreas de risco de desastres e de resposta e de recuperação em áreas atingidas por desastres e sobre o Fundo Nacional para Calamidades Públicas, Proteção e Defesa Civil; e dá outras providências, Brasília.

BRASIL 2012a. Lei nº 12.608, de 10 de abril de

2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil – PNPDEC; dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil – SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil – CONPDEC; autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres; altera as Leis nos 12.340, de 1º de dezembro de 2010, 10.257, de 10 de julho de 2001, 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.239, de 4 de outubro de 1991, e 9.394, de 20 de dezembro de 1996; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília.

BRASIL 2012b. Atualiza a Lei Complementar nº 803, de 25 de abril de 2009, que aprova a revisão do Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal – PDOT e dá outras providências.

BRASIL 2019a. Lei Nº 6.269, de 29 de janeiro de 2019. Institui o Zoneamento Ecológico-Econômico do Distrito Federal – ZEE-DF em cumprimento ao art. 279 e ao art. 26 do Ato das Disposições Transitórias da Lei Orgânica do Distrito Federal e dá outras providências.

BRASIL 2019b. Lei Complementar nº 948, de 16 de janeiro de 2019. Aprova a Lei de Uso e Ocupação do Solo do Distrito Federal – LUOS nos termos dos arts. 316 e 318 da Lei Orgânica do Distrito Federal e dá outras providências.

BITAR, O.Y.; FREITAS, C.G.L.; MACEDO, E.S. 2015. Guia Cartas geotécnicas [livro eletrônico]: orientações básicas aos municípios. São Paulo: IPT – Instituto de Pesquisas de Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2015.

CHAND, F. 1999. Environmental geology in urban development. Ninth Regional Congress on Geology, Mineral and Energy Resources of Southeast Asia – GEOSEA '98 17 – 19 August 1998 • Shangri-La Hotel, Kuala Lumpur, Malaysia.

COUTINHO, R.Q. (Coord. e Org.) 2013. Parâmetros para a Cartografia Geotécnica e diretrizes para áreas sujeitas a Desastres Naturais, GEGEP/UFPE/MCIDADES, Recife.

CULSHAW, M.G; PRICE, S.J. 2010. The contribution of urban geology to the development,

regeneration and conservation of cities. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 70:333–376.

DAVIES, T.C. 2015. Urban geology of African megacities. *Journal of African Earth Sciences* 110:188–226.

DEARMAN, W.R. 1991. *Engineering Geological Mapping*. British Library Cataloguing Publication Data, Butterworth e Heinemann, London, UK, 415 p.

FELTRIN, T. F.; RAIÁ JUNIOR, A. 2012. A Lei 12.608/12 Instrumento de auxílio à gestão da logística humanitária no enfrentamento de desastres causados por fenômenos naturais. *Anais do IX Convibra Administração – Congresso Virtual Brasileiro de Administração*. 13p

JEFFERIS J.K. 1986. *Implications of Geology in City and Regional Planning*. The Ohio State University, degree of B.S. in Geology, 24 p.

KARROW, P.F., and WHITE, O.L. (1998). *Urban Geology of Canadian Cities*, Newfoundland, Canada, Geological Association of Canada, Special Paper 42, 500pp.

LEGGET, R.F. 1973. *Cities and geology*: McGraw-Hill Book Company, N.Y., 624 p.

MULDR, F.J. 1993. Urban geology in Europe: an overview. *Quaternary International*, Vol. 20, 1040-6182(94): 5-11.

OLIVEIRA, B.R. 2018. Cartografia geotécnica de grande escala: estudo de caso setor habitacional Asa Taquari [Distrito Federal. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-305/2018, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 144 p.

OLIVEIRA & MONTICELLI 2018. *Geologia de Engenharia e Ambiental*. ABGE, 3v.

PAULA, B.L.; CERRI, L.E.S. 2008. Proposta de representação cartográfica para cartas geotécnicas. *Revista Geotecnia*, 112(março): 11-126.

PELOGGIA, A.U.G. 1997. Delineação e

aprofundamento temático da geologia do tecnógeno do município de São Paulo. As consequências geológicas da ação do homem sobre a natureza e as determinações geológicas da ação humana em suas particularidades referentes a precária ocupação urbana. USP. IG. 288 p.

PRANDINI, F.L., NAKAZAWA, V.A., FREITAS, C.G.L., DINIZ, N.C. 1995. Cartografia geotécnica nos planos diretores regionais e municipais. In: BITAR, O.Y. (Coord.). Curso de geologia aplicada ao meio ambiente. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE) e Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), cap. 4.4, p.187-202.

RODRIGUEZ, S.K. 1998. Geologia Urbana da Região Metropolitana de São Paulo. Tese de Doutorado - Programa de Geologia Sedimentar - IG/USP. 60p.

SANTOS A.R. 2008. Diálogos geológicos: é preciso conversar com a terra. São Paulo, Em nome da rosa, 2008.

SANTOS, A.R. 2017. Cidades e Geologia: Discussão Técnica e Proposição de Projetos de Lei de Grande Interesse para as Populações Urbanas. Rudder, São Paulo, 136 p.

SHOWSHACK, R. 2014. Scientists Call for a Renewed Emphasis on Urban Geology. *Eos*, Vol. 95, No. 47, 25 November 2014, 2 p.

TOMINAGA, L.K.; PEJON, O.J.; BASTOS, C.A. 2004. Diagnóstico preliminar da cartografia geotécnica e geoambiental no Brasil. 5º simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Geoambiental. 16 a 18/11/2004. 20 p.

MÉTODOS DA GEOFÍSICA AMBIENTAL APLICADOS À INVESTIGAÇÃO DE CONTAMINAÇÃO SUBTERRÂNEA

ENVIRONMENTAL GEOPHYSICS METHODS APPLIED TO THE INVESTIGATION OF UNDERGROUND CONTAMINATION

WAGNER FRANÇA AQUINO

Programa de Pós-Graduação do ICTS da UNESP, wagnergpr@gmail.com

MÁRCIO CORRÊA DA SILVA

Geométodos Levantamentos Geofísicos Ltda, marcio@geométodos.com.br

DOUGLAS BASTIANON

Consultor Geofísico, dbastianon2003@yahoo.com.br

PAULO SÉRGIO TONELLO

Programa de Pós-Graduação do ICTS da UNESP, paulo.tonello@unesp.br

RESUMO ABSTRACT

O presente artigo apresenta os conceitos relativos à definição da Geofísica Ambiental e de seus campos de aplicação, se referenciando mais especificamente aos métodos geofísicos aplicados aos estudos de contaminação subterrânea. É apresentada a correlação da metodologia aqui discutida com os pressupostos do gerenciamento de áreas contaminadas da CETESB, além da indicação de norma nacional e de guias internacionais para orientação à aplicação da Geofísica em investigações ambientais, bem como uma breve descrição dos métodos geofísicos mais adequados. Também, é apresentada uma tabela dos diferentes tipos de contaminantes e suas propriedades físicas como os fatores mais decisivos para a seleção dos métodos geofísicos aplicáveis. Ao final, são apresentados casos reais de contaminação de solo e água subterrânea onde todos os métodos geofísicos aqui descritos foram aplicados com êxito no diagnóstico ambiental do local impactado.

Palavras-chave: Geofísica Ambiental, métodos geofísicos, contaminação subterrânea.

This article presents the concepts related to the definition of Environmental Geophysics and its applications, referring more specifically to the geophysical methods applied to studies of underground contamination. The relationship of the methodology discussed here with the assumptions of contaminated areas management of CETESB is presented, as well as the national norm and the international guides for application of Geophysics in environmental investigations, in addition to a brief description of the most appropriate geophysical methods. Also, a table of the different contaminants and their physical properties is presented as the most decisive factors for the selection of the applicable geophysical methods. At the end, real cases of soil and groundwater contamination are presented where all the geophysical methods described here were successfully applied in the environmental diagnosis of the impacted site.

Keywords: Environmental Geophysics, geophysical methods, underground contamination.

1 INTRODUÇÃO

Práticas como a infiltração de efluentes industriais ou descarte inadequado de resíduos sólidos foram comumente adotadas, principalmente, entre as décadas de 1970 e 1990, tanto de forma intencional sem o conhecimento dos órgãos públicos responsáveis pela fiscalização e controle ambiental, bem como aliadas aos conceitos equivocados de absorção e depuração em subsuperfície (Aquino, 2000), e cujas consequências à qualidade dos solos e das águas subterrâneas são constadas até os dias de hoje em alguns casos.

Além dessas ações nocivas ao meio ambiente, devem ser citados também os passivos ambientais estabelecidos após a desativação de algumas plantas industriais e que, além dos riscos que podem representar à saúde humana e outros bens a proteger, demandam elevados recursos a serem despendidos na sua remediação, principalmente, nas zonas urbanas das grandes metrópoles, onde é crescente a necessidade de reuso do solo para diferentes fins (Habermann & Gouveia, 2014).

Muitas dessas situações geraram as denominadas “Áreas Contaminadas (AC)”, as quais são definidas pela Lei n. 13.577, de 2009, como “*área, terreno, local, instalação, edificação ou benfeitoria que contenha quantidades ou concentrações de matéria em condições que causem ou possam causar danos à saúde humana, ao meio ambiente ou a outro bem a proteger*”, e que somente no estado de São Paulo atingiram, no ano de 2019, o número de 6.285 casos que estão em diferentes fases de diagnóstico e remediação (CETESB, 2019).

Portanto, do ponto de vista legal, a degradação da qualidade dos solos e da água subterrânea ocasionados em uma área contaminada se constitui, além de uma questão ambiental, também de saúde pública, sendo que seus efeitos devem ser investigados com intuito de se avaliar a extensão e os impactos causados.

Neste sentido, a aplicação da metodologia geofísica pode contribuir para definição da abrangência da contaminação subterrânea em áreas suspeitas ou comprovadamente contaminadas, sendo que os levantamentos geofísicos periódicos, muitas vezes, são a única de forma de estabelecer o monitoramento da contaminação em áreas industriais desativadas ou abandonadas e onde a

figura do agente poluidor, que seria responsável pelo diagnóstico e remediação, pode não ser encontrada (Aquino, 2000).

Assim, a aplicação dos métodos geofísicos consiste, fundamentalmente, na investigação das condições locais, tanto em relação à determinação da contaminação existente, como dos possíveis processos dinâmicos de migração do contaminante através do meio geológico, contribuindo para um melhor conhecimento dos impactos ambientais causados, além de fornecer informações fundamentais que podem ser úteis na avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos.

A metodologia geofísica aplicada aos estudos de contaminação subterrânea é classificada como métodos de *screening* no Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas da CETESB (2001), isto é, métodos preliminares de rastreamento para detectar contaminantes presentes em subsuperfície, podendo ser aplicada nas diferentes fases de um gerenciamento ambiental: investigação preliminar, investigação confirmatória, investigação detalhada e remediação.

Portanto, as informações obtidas a partir dos levantamentos geofísicos são úteis para a locação dos poços de monitoramento, como também podem fornecer estimativas de área e volume para as atividades de remoção e remediação de solos contaminados, além de reduzir o risco de perfuração de tanques e tambores enterrados contendo resíduos, ou para mapeamento de dutos e galerias subterrâneas (cadastramento de interferências) em locais contaminados.

Para orientação e definição de critérios de aplicação, foi publicada em 2011 a Norma ABNT n° 15.935 (2011) e que versa sobre a seleção e aplicação ambiental de forma bem abrangente dos métodos geofísicos de superfície e de poço(s) para a caracterização geológica e hidrogeológica do meio físico, detecção e/ou delimitação de contaminantes, detecção de resíduos, de objetos enterrados e de cavas e delimitação de aterros e lixões.

Destaca-se também, como referência aos estudos de contaminação subterrânea, o conteúdo apresentado na norma D 6429-99 de 2006 da *American Society for Testing and Materials* (ASTM), dos Estados Unidos, que orienta de maneira pormenorizada a seleção e a utilização de métodos geofísicos de superfície aplicados em investigações geológicas, geotécni-

cas, hidrológicas e ambientais, além do Guia da *Environmental Protection Agency* – EPA (1993) que descreve detalhadamente os métodos geofísicos de aerolevantamentos, de superfície e de poços aplicadas aos locais contaminados.

Portanto, diante da grande variedade de métodos e das diversas aplicações que a Geofísica possui, este artigo visa apresentar as conceituações e quais os métodos geofísicos mais efetivos, em particular do grupo da Geofísica Ambiental, em correspondência com os tipos de contaminantes mais comumente encontrados nas áreas suspeitas ou contaminadas, além de exemplos de situações reais onde foram realizados levantamentos para avaliação da contaminação subterrânea por diferentes fontes.

2 CAMPOS DE ATUAÇÃO DA GEOFÍSICA AMBIENTAL

Segundo Reynolds (2011), a Geofísica Aplicada é definida como sendo a área da Geofísica que investiga os recursos minerais ou estruturas geológicas, relativamente pequenas e pouco profundas que possam estar presentes na crosta terrestre, como por exemplo a identificação de domos salinos, jazidas minerais, falhas e contatos geológicos, e que podem ter interesse nas aplicações de prospecção de petróleo, de localização de aquíferos, de exploração mineral e de engenharia civil, entre outras. Dentro do campo de atuação da Geofísica Aplicada, Reynolds distingue a Geofísica de Exploração, em função de seus objetivos econômicos referentes à busca por recursos minerais, de outros dois grupos maiores que são a Geofísica de Engenharia e a Geofísica Ambiental, além de indicar seis subáreas distintas com utilizações mais específicas, a saber, Agrogeofísica, Arqueogeofísica, Biogeofísica, Geofísica Forense, Glaciogeofísica e Hidrogeofísica.

Conceitualmente, denomina-se de Geofísica Ambiental a área de aplicação da Geofísica voltada à avaliação dos efeitos danosos causados ao meio físico pela ação de determinados agentes em subsuperfície, sendo que Greenhouse (1991) e Steeples (1991) a definem como a aplicação dos

métodos geofísicos para investigações de fenômenos bio-físico-químicos rasos e que têm implicações no gerenciamento ambiental de um local. Alguns pesquisadores creditam o emprego da Geofísica Ambiental tão somente aos estudos de contaminação subterrânea, porém, esses autores, coerentemente, estabelecem os dois grandes campos de aplicação dos métodos geofísicos direcionados aos estudos de problemas ambientais:

- I. um primeiro grupo se refere ao diagnóstico dos impactos causados ao meio físico em eventos de degradação, tais como avaliação de processos erosivos e assoreamentos de corpos d'água, entre outros;
- II. um segundo grupo é aquele mais voltado, particularmente, à investigação de passivos ambientais provocados por contaminação subterrânea.

Quanto ao primeiro grupo de aplicação da Geofísica Ambiental, os levantamentos geofísicos podem ser implementados tanto sobre o solo, como sobre a água superficial, para avaliação dos efeitos da degradação que esses meios podem sofrer a partir dos eventos causadores.

Em relação ao segundo grupo, objeto deste trabalho, sua aplicação ambiental está direcionada à detecção de presença e mapeamento da contaminação em subsuperfície, com foco, portanto, na investigação da existência de contaminantes no solo e nas águas subterrâneas, podendo os métodos geofísicos também fornecer informações importantes quanto às feições geológicas e hidrogeológicas dos locais afetados.

Neste contexto, verifica-se, portanto, que a distinção desses dois grandes campos de aplicação da Geofísica Ambiental implica na sua utilização tanto para a avaliação dos impactos em locais que podem se constituir em áreas degradadas (AD), bem como para contribuir ao diagnóstico dos passivos ambientais das áreas contaminadas (AC).

A partir dos conceitos descritos anteriormente, é possível subdividir os campos da Geofísica conforme a Figura 1, com ênfase aos objetivos principais da Geofísica Ambiental, que é o tema deste artigo.

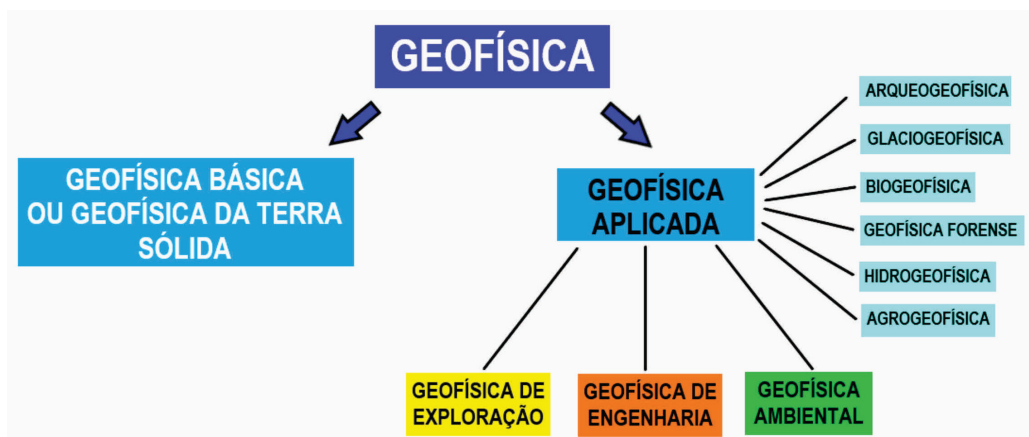


Figura 1. Subdivisões dos campos de atuação da Geofísica Aplicada e Ambiental.

Fonte: modificado de Reynolds, 2011.

3 MÉTODOS GEOFÍSICOS APLICADOS À CONTAMINAÇÃO SUBTERRÂNEA

Ao se comparar o emprego os métodos geofísicos ao dos métodos diretos de investigação de subsuperfície, como sondagens mecânicas por exemplo, uma das principais vantagens da aplicação geofísica é a rapidez na avaliação de grandes áreas com custo relativamente menor, além de propiciar a execução de perfis contínuos, possibilitando identificar com maior precisão as variações laterais por mudanças litológicas ou originadas pela presença da contaminação subterrânea (Greenhouse, 1996). Quanto à avaliação da presença da contaminação em profundidade, a utilização dos métodos geofísicos está voltada, especificamente, à localização de valas contendo resíduos, investigação da contaminação disseminada no solo e nas águas subterrâneas, detecção de tanques e tanques enterrados, e determinação de vazamentos a partir de tanques ou dutos (CETESB, 2001).

Referente às medições geofísicas, os desvios significantes do padrão normal das medidas constituem as anomalias e, do ponto de vista ambiental, podem apontar a presença de contaminantes em subsuperfície, sendo que a interpretação das anomalias geofísicas é de fundamental importância na investigação de áreas contaminadas, uma vez que suas intensidades possuem uma relação direta com as concentrações da contaminação, além de serem úteis na orientação dos trabalhos subsequentes para monitoramento da propaga-

ção subterrânea e recuperação do local afetado (Gretsky et al. 1990).

Em artigo publicado em 2019 por Aquino et al., esses autores descrevem as aplicações, as potencialidades e as limitações dos métodos geofísicos para diagnóstico das áreas contaminadas de forma pormenorizada, onde consideram que os principais e mais adequados métodos empregados na investigação da contaminação do solo e da água subterrânea são o GPR (ou Geo-radar), o Eletromagnético (EM), a Eletrorresistividade (ER) e a Resistividade Capacitiva (RC), além do Método Magnético (Magnetometria), por estes possuírem a capacidade de detecção da presença da contaminação subterrânea, cujos fundamentos básicos são descritos a seguir.

3.1 Método GPR

O GPR (*Ground Penetrating Radar*), ou Geo-radar, é um método geofísico eletromagnético que fornece seções contínuas dos perfis executados, imageando as feições em subsuperfície. O equipamento transmite para o subsolo, através de uma antena, pulsos de ondas de rádio de alta frequência (entre 10 MHz e 2.500 MHz). Na sequência, quando o sinal transmitido em profundidade atinge corpos ou estratos com diferentes permissividades dielétricas (ϵ), ou constantes dielétricas (K), parte da onda reflete nesses objetos ou interfaces, enquanto outra parte se propaga até a próxima descontinuidade. A onda eletromagnética refletida é captada por uma antena receptora,

sendo o sinal amplificado, digitalizado e armazenado para posterior processamento. Referente ao resultado que o método GPR fornece, o produto final da aquisição de campo é uma seção contínua (distância percorrida x profundidade), formada por uma série de sinais obtidos em cada ponto de amostragem (traços), que representa uma imagem de alta resolução da porção investigada do subsolo, sendo que através destas seções é possível identificar configurações representativas de feições geológicas, hidrogeológicas e ambientais presentes, e de outras estruturas em subsuperfície (Davis & Annan 1989).

3.2 Método Eletromagnético (EM)

O método Eletromagnético (EM) se baseia na indução, sem contato com o terreno, de um campo eletromagnético primário (H_p) para subsuperfície, através de uma bobina transmissora, e na geração de um campo eletromagnético secundário (H_s) em profundidade, que é detectado numa bobina receptora sobre o terreno. A propriedade física medida é a condutividade elétrica do meio e esta é proporcional à relação entre o campo primário emitido e o campo secundário captado, sendo lida diretamente em equipamentos denominados condutivímetros em unidades de miliSiemens por metro, sendo seus resultados expressos através de perfis (distância percorrida x medidas) ou por meio de mapas de valores interpolados. Quanto à profundidade de investigação, esta depende da frequência de emissão do campo eletromagnéticos, bem como da distância de separação entre o transmissor e o receptor (Aquino, 2000)

3.3 Método de Eletrorresistividade (ER)

Na execução do método de Eletrorresistividade (ER), quando uma corrente elétrica é injetada no solo por meio de um par de eletrodos cravados no terreno, os padrões de fluxo subsuperficial de corrente refletem a resistividade dos materiais em profundidade, sendo mapeados na superfície através de outro par de eletrodos que medem as variações de potencial elétrico. Desta maneira, quando a corrente elétrica atravessa um corpo de baixa resistividade elétrica ou de alta resisti-

vidade, o potencial elétrico diminui ou aumenta, respectivamente, sendo que este comportamento reflete a resistividade elétrica do meio e pode ser calculada em unidades de ohm por metro. Uma das técnicas mais utilizadas nas investigações ambientais é o Caminhamento Elétrico (CE), também nomeada mais recentemente por Tomografia de Resistividade Elétrica (TRE), a qual proporciona uma investigação das variações laterais da resistividade elétrica em determinados níveis de profundidade de investigação, gerando seções de subsuperfície onde são apresentados os valores interpolados das resistividades elétricas medidas (pseudo-seções), possibilitando a confecção de modelos geofísicos (Braga, 2006).

3.4 Método de Resistividade Capacitiva (RC)

O método de Resistividade Capacitiva (RC) é um método geofísico de aquisição de dados de resistividade elétrica diferente do método tradicional de Eletrorresistividade (ER) e vem sendo empregado em ambientes urbanos e outros locais onde o contato galvânico não pode ser efetuado ou onde altas impedâncias resultam em má qualidade dos obtidos. Esse método se baseia no conceito de acoplamento capacitivo entre o sensor e o terreno, sendo a injeção de corrente elétrica efetuada através de um cabo coaxial contendo um transmissor de corrente elétrica alternada em contato com a superfície, sincronizado a um ou mais receptores de tensão elétrica, formando, portanto, um sistema capacitivo e que atua numa faixa de frequência do método *Very Low Frequency* (VLF), de 10 a 18 kHz. Para os levantamentos de campo, utiliza-se a técnica de Imageamento de Resistividade Capacitiva (IRC) ou Caminhamento Elétrico Capacitivo (CEC), cujos pressupostos teóricos correspondem ao arranjo polo-polo da Eletrorresistividade convencional, sendo seus resultados apresentados na forma de pseudo-seções de resistividade elétrica (Kuras, 2002).

3.5 Método Magnético (Magnetometria)

O método Magnético, ou Magnetometria, quando aplicado nas investigações ambientais tem por objetivo medir altos e baixos anômalos que

tambores, tanques ou resíduos metálicos ferrosos enterrados possam gerar no campo geomagnético natural, cuja unidade de medida é nanoTesla (nT). A propriedade física envolvida neste método é a suscetibilidade magnética que é uma medida da capacidade de um material ser magnetizado, sendo que em áreas de disposição de rejeitos, o ferro e o aço são as principais fontes de anomalias por possuírem alta suscetibilidade magnética, contrastando fortemente com os materiais geológicos encaixantes, que geralmente são não magnéticos. Neste contexto, o método Magnético é classificado como sendo um método geofísico passivo, pois não necessita de uma fonte artificial de sinal, diferentemente dos métodos apresentados anteriormente, uma vez que a alta suscetibilidade magnética dos materiais ferromagnéticos, por ser uma propriedade intrínseca, gera por si só um magnetismo anômalo no local onde se encontram. Os resultados deste tipo de levantamento podem ser apresentados sob a forma de gráficos individuais das linhas executadas ou através de mapas de anomalias magnéticas (Greenhouse, 1996).

4 TIPOS DE CONTAMINANTES E APLICABILIDADE DOS MÉTODOS GEOFÍSICOS

Conforme apontado por Greenhouse (1996), o emprego de dois ou mais métodos geofísicos distintos numa determinada investigação aumenta a precisão das interpretações, minimizando as ambiguidades na interpretação dos resultados,

sendo que para este autor a natureza dos contaminantes e a geologia local, nesta ordem, são os fatores preponderantes na seleção das técnicas geofísicas a serem utilizadas.

Dentre estes fatores anteriormente mencionados, primeiramente, é fundamental associar o tipo de contaminante aos melhores métodos geofísicos a serem utilizados, uma vez que para a investigação ambiental de um determinado meio é necessário que haja correspondência entre a propriedade física da fonte de contaminação com a adequada metodologia a ser aplicada e, que, se refere, assim, a utilização de um método geofísico específico e que também possua a capacidade de detecção de variações em suas medições (Paranis, 1997).

Quanto ao papel do ambiente geológico no qual está localizado o contaminante influenciando a eficiência e aplicabilidade dos métodos geofísicos, não que este seja negligenciável, porém, à luz das tecnologias atuais, existem formas de contornar tal problema, como por exemplo, através da aplicação de outra metodologia que a inicialmente programada, da alteração de frequência de operação do equipamento geofísico, da mudança de técnica ou arranjo de levantamento de campo, entre outros.

Neste contexto, são apresentadas, a seguir, as descrições dos tipos mais comuns de contaminantes presentes em casos de contaminação subterrânea por diferentes fontes, sendo este o fator fundamental para correspondência com os métodos geofísicos mais adequados a serem aplicados.

Tabela 1. Contaminantes e métodos geofísicos aplicáveis.

Tipo de contaminante, propriedades físicas e fontes de contaminação	Métodos geofísicos aplicáveis
Resíduos ou objetos metálicos: - Alta suscetibilidade magnética e alta condutividade elétrica. Exemplos: tambores ou tanques metálicos, areia de fundição.	1. Eletromagnético; 2. Magnético; 3. GPR; 4. Resistividade Capacitiva (método alternativo).
Resíduos inorgânicos: - Alta condutividade elétrica, ou baixa resistividade. Exemplo: resíduos domésticos.	1. Eletromagnético; 2. GPR; 3. Resistividade Capacitiva; 4. Eletroresistividade (método alternativo).
Pluma inorgânica (íons e sais dissolvidos na água subterrânea): - Alta condutividade elétrica, ou baixa resistividade elétrica. Exemplos: plumas de contaminação de lixões e de infiltração de efluentes industriais	1. Eletromagnético; 2. Eletroresistividade; 3. Resistividade Capacitiva; 4. GPR (método alternativo).
Resíduos orgânicos e plumas orgânicas: - Baixa condutividade elétrica e pequena constante dielétrica. Observação: os métodos geofísicos só detectam os contaminantes orgânicos em altas concentrações em subsuperfície (fase livre, retida ou adsorvida), não sendo capazes de identificar a fase orgânica dissolvida na água subterrânea. Exemplo: pluma de fase livre de contaminação de combustível ou de solventes organoclorados	1. GPR; 2. Resistividade Capacitiva; 3. Eletroresistividade (em condições muito especiais); 4. Eletromagnético (em condições muito especiais).
Rejeitos de mineração: - Alta condutividade elétrica e alta acidez. Exemplo: lixiviados ou lamas de extração de mineração de ferro.	1. Eletromagnético; 2. Resistividade Capacitiva (método alternativo); 3. Eletroresistividade (método alternativo); 4. GPR (método alternativo).
Contaminação difusa na agricultura: - Alta condutividade elétrica (em geral). Exemplos: vinhaça, lodos de tratamento, fertilizantes ou efluentes.	1. Eletromagnético; 2. Resistividade Capacitiva; 3. Eletroresistividade (método alternativo).
Necrochorume: - Baixa resistividade elétrica, ou alta condutividade. Exemplo: cemitérios.	Resistividade Capacitiva; Eletroresistividade; Eletromagnético (método alternativo); GPR (método alternativo).
Lodo de estações de tratamento, lodo de esgoto ou material de dragagem: - Alta condutividade elétrica, ou baixa resistividade. Exemplo: áreas de disposição de ETE ou ETA.	Eletromagnético; Eletroresistividade; Resistividade Capacitiva; GPR (método alternativo).

Fonte: modificado de Aquino *et al.*, 2019.

5 ESTUDOS DE CASOS

Na sequência, são apresentados casos reais de aplicação dos métodos geofísicos aqui descritos, que foram empregados pelos autores ao diagnóstico de contaminação subterrânea por diferentes fontes, e que tiveram êxito nas investigações dos passivos ambientais gerados. A importância dos exemplos a seguir se refere às diferentes formas que os contaminantes subterrâneos produzem nos resultados dos métodos aplicados, constituindo, portanto, suas assinaturas geofísicas.

5.2 Investigação de resíduos ou objetos metálicos enterrados

O primeiro caso reportado exemplifica o emprego do método GPR para a localização de tanques de armazenamento subterrâneo de combustíveis (TASC) em posto de serviço. Para aquisição de dados, foi utilizado o equipamento modelo Ramac/GPR, fabricado pela Malã Geoscience, empregando-se a antena blindada de 250 MHz de frequência e executando-se linhas em formato de malha (*grid*), com espaçamento de 2,0 m de dis-

tância entre os perfis de campo e amostragem a cada 20 cm. Nesta investigação, foram localizados seis tanques subterrâneos de combustíveis no total, sendo que na Figura 2a é possível se observar a presença de quatro desses, representados na seção A pelas suas hipérbolas de difração em profundidades por volta de 1,40 m.

Como resultado final, foram plotados os posicionamentos dos tanques identificados no mapa de amplitude do sinal GPR na profundidade de corte de 1,40 m, apresentado na Figura 2b, onde se observam anomalias de maiores reflexões do sinal nos locais de existências desses tanques subterrâneos.

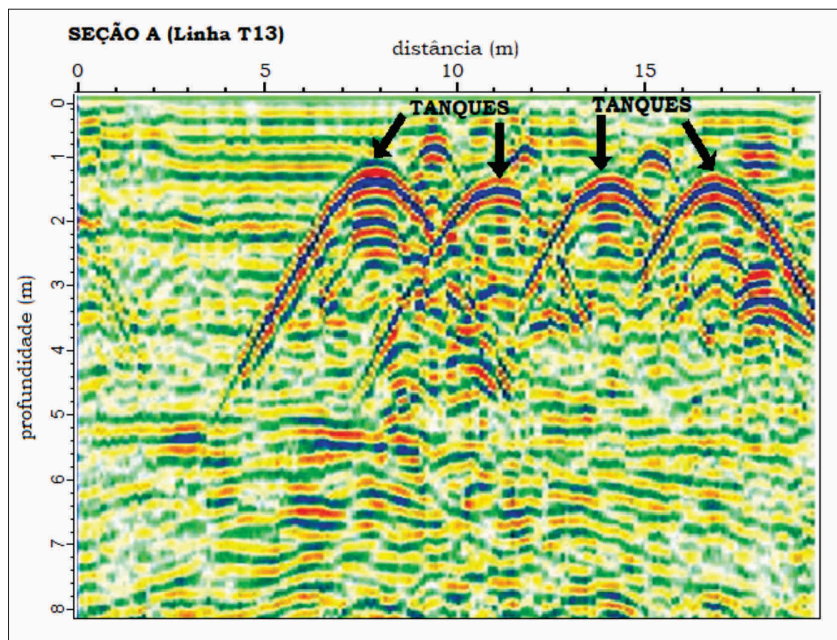


Figura 2a. Seção "A" indicando a detecção de tanques subterrâneos.

Fonte: os autores.

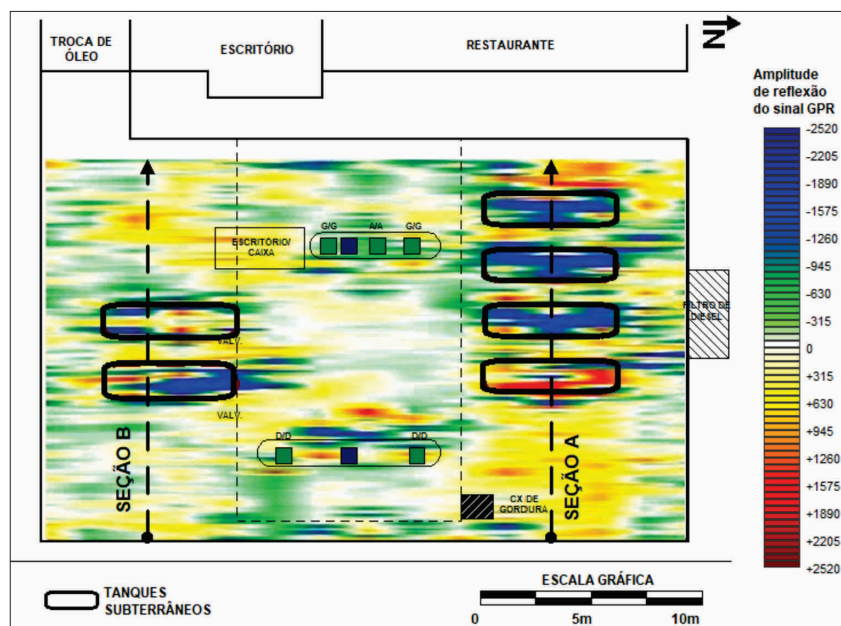


Figura 2b. Mapa de amplitude do sinal GPR na profundidade de 1,40 m.

Fonte: os autores.

O segundo estudo se refere à aplicação do método Magnético em varredura de área em planta industrial no intuito de se confirmar a presença de resíduos metálicos enterrados. A relevância deste levantamento está no fato que poderia ter sido empregado o método Eletromagnético Indutivo, comumente utilizado neste tipo de situação, porém em face de demanda impositiva foi empregado o método Magnético, que no Brasil é quase que exclusivamente aplicado à pesquisa mineral ou arqueológica, mas que comprovou sua eficiência neste caso, podendo ser aplicado em situações similares para avaliação ambiental. Na aquisição de dados em campo, foi utilizado o magnetômetro da marca Gem Systems, modelo GSM-19, sendo adotado um espaçamento de 1,0 m entre os pontos de medidas. Como resultado do levanta-

mento realizado obteve-se o mapa de anomalias do gradiente do campo magnético total (Figura 3), o qual apresenta mais ao centro do terreno investigado três anomalias geofísicas principais (A, B e C) e onde foram encontrados, não resíduos industriais, mas sim sucatas metálicas enterradas e que foram prontamente removidas do local.

A terceira investigação corresponde à aplicação do método Eletromagnético Indutivo para a determinação de posicionamento de tanque subterrâneo em área de antiga garagem de ônibus e que foi reutilizada como condomínio residencial posteriormente. Neste estudo, dois outros tanques subterrâneos já tinham suas localizações conhecidas, havendo dúvida sobre posicionamento de um terceiro tanque próximos a esses e que deveriam ser removidos todos em conjunto.

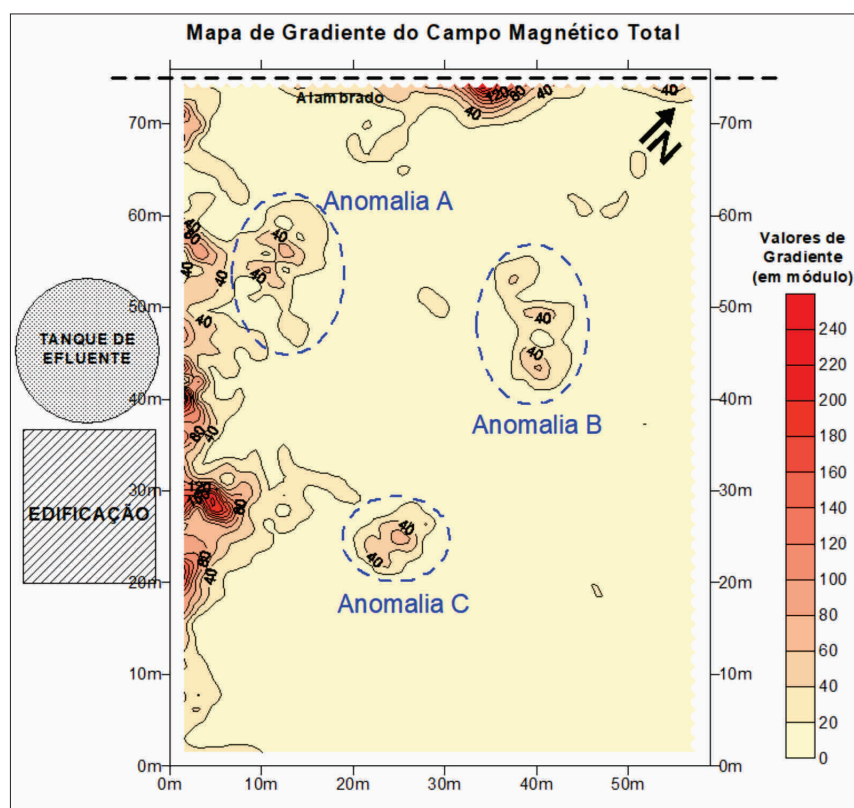


Figura 3. Mapa de anomalias magnéticas de material metálico enterrado.

Fonte: os autores.

Assim, foram executadas linhas de varredura no local suspeito, sendo empregado o equipamento de emissão e recepção transiente EM-61, marca Geonics Limited, que é um instrumento muito

sensível à detecção de objetos metálicos enterrados e que apresenta resolução lateral centimétrica nas medições, sendo obtidos, como exemplo os perfis a seguir.

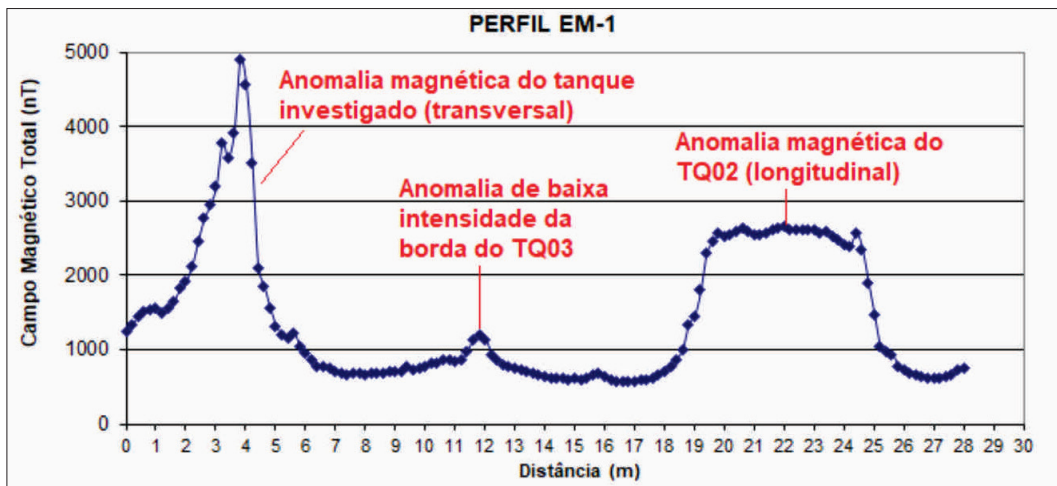


Figura 4a. Perfil de medidas magnéticas EM-1.

Fonte: os autores.

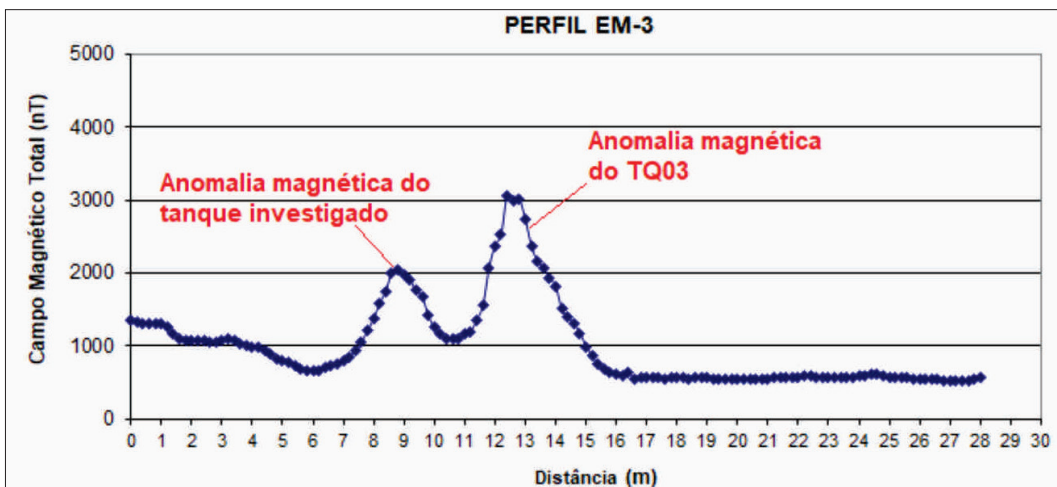


Figura 4b. Perfil de medidas magnéticas EM-3.

Fonte: os autores.

A partir da análise da amplitude das anomalias magnéticas (intensidade e largura) e das distâncias em que foram detectadas nos perfis eletromagnéticos, foi possível determinar o

posicionamento do tanque investigado e apresentá-lo no mapa seguir, sendo este e os outros tanques retirados do local em etapa posterior ao levantamento.

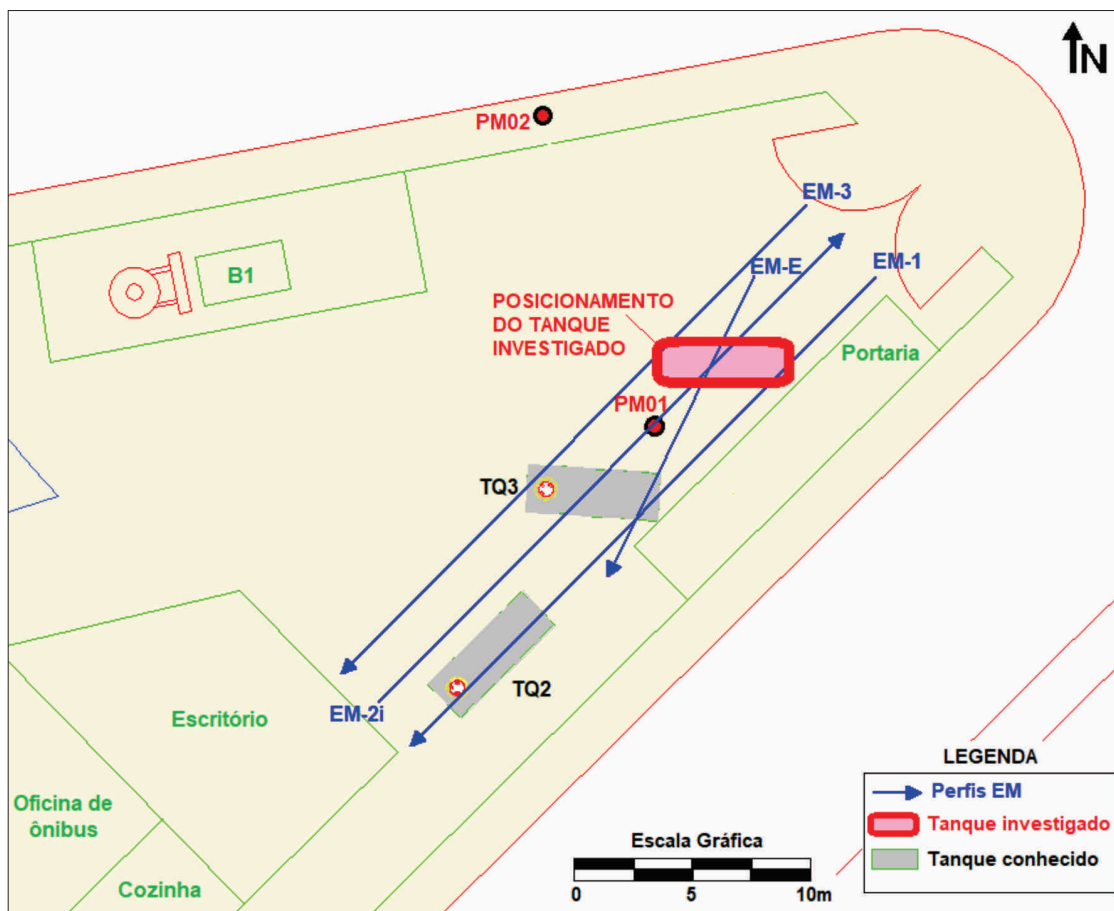


Figura 4c. Localização do tanque investigado no levantamento EM.

Fonte: os autores.

5.3 Investigação de resíduos inorgânicos enterrados

A avaliação apresentada na sequência corresponde ao estudo efetuado em área rural para a detecção e delimitação de cava onde havia ocorrido descarte diretamente no solo de resíduos inorgânicos, proveniente de indústria química e farmacêutica. Para esta pesquisa, foi utilizado o equipamento Ramac/GPR, com antenas não blindadas de 200 MHz de frequência, arranjo *com-*

mon off-set (dipolo) e intervalo de medidas de 25,0 cm, sendo executadas em campo linhas paralelas equidistantes de 15,0 m, seccionando, assim, a área suspeita conforme a Figura 5a.

Em algumas seções GPR obtidas, foram observadas feições indicativas de material revolvido, sendo bem representativo o apresentado na Figura 5a e onde se verifica uma anomalia em formato de cava, com largura de aproximadamente 26,0 m e com base irregular de profundidade máxima de 2,5 m.

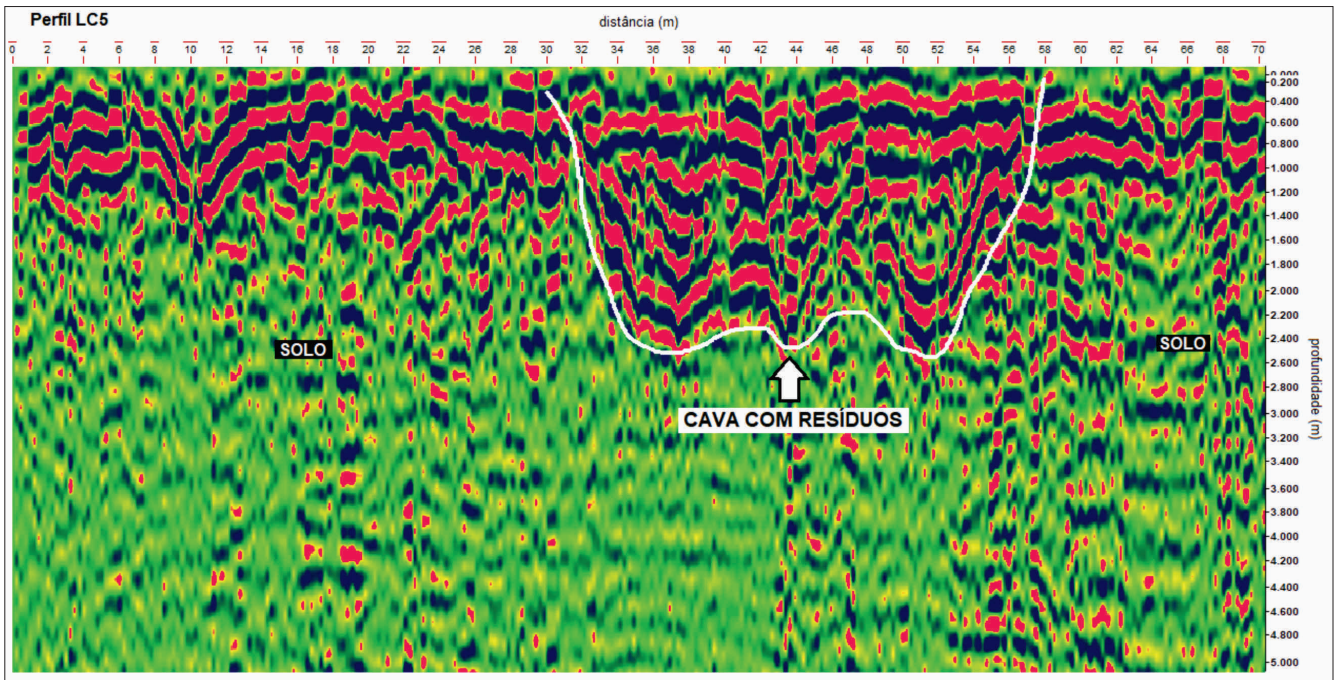


Figura 5a. Trecho de perfil GPR indicando cava com resíduos inorgânicos.

Fonte: os autores.

Integrando-se os dados dos perfis GPR paralelos, foi possível estimar os limites da disposição de resíduos no local investigado (Figura 5b), o

qual, tempos depois, foi submetido às atividades de intervenção para recuperação do local.



Figura 5b. Localização dos perfis GPR e área inferida com resíduos.

Fonte: os autores.

5.4 Pluma de contaminação inorgânica

O seguinte exemplo é sobre a avaliação da abrangência de pluma de contaminação subterrânea, originada por disposição no solo de resíduos inorgânicos do tratamento de couro proveniente de curtume. Na aquisição de dados deste levantamento, empregou-se o método Eletromagnético (EM), através do uso do condutivímetro de solo EM-31, marca Geonics Limited, para a realização de 20 perfis geofísicos longitudinais, com espaçamento médio de 20,0 m, e dois perfis transversais distantes de 8,0 m.

Quanto às linhas executadas, o intervalo adotado de medidas de condutividade elétrica foi de 10,0 m e 20,0 m nos perfis transversais e longitudinais, respectivamente, tomando-se as medições nas duas faixas de profundidades teóricas de investigação fornecidas pelo equipamento, de 3,0 m e 6,0 m. Como exemplo do comportamento da condutividade elétrica medida na área, podem ser observadas as curvas do Perfil P13 apresentado na Figura 6a, que aponta valores crescentes desde seu início até praticamente o final, com valores mais expressivos de 240 m a 360 m, onde os resíduos enterrados, certamente, estavam presentes em maiores concentrações.

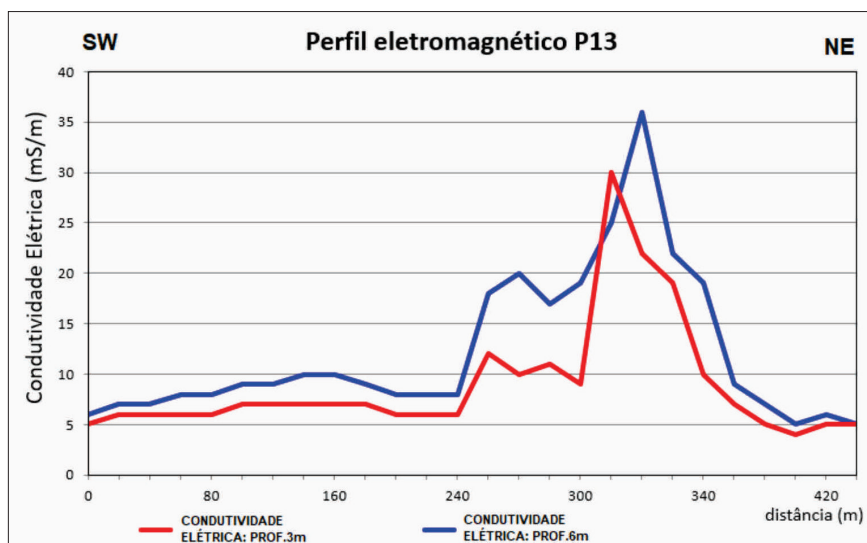


Figura 6a. Perfil P13 de condutividade elétrica de 3,0 m e 6,0 m de profundidade.
Fonte: os autores.

Por meio da plotagem dos pontos de leitura em planta base da área e interpolação pelo método de krigagem dos valores de condutividade elétrica, foram elaborados mapas de anomalias geo-

físicas, como visto na Figura 6b e que corresponde às variações das medidas para a profundidade de 6,0 m e que está dentro dos domínios da zona saturada.

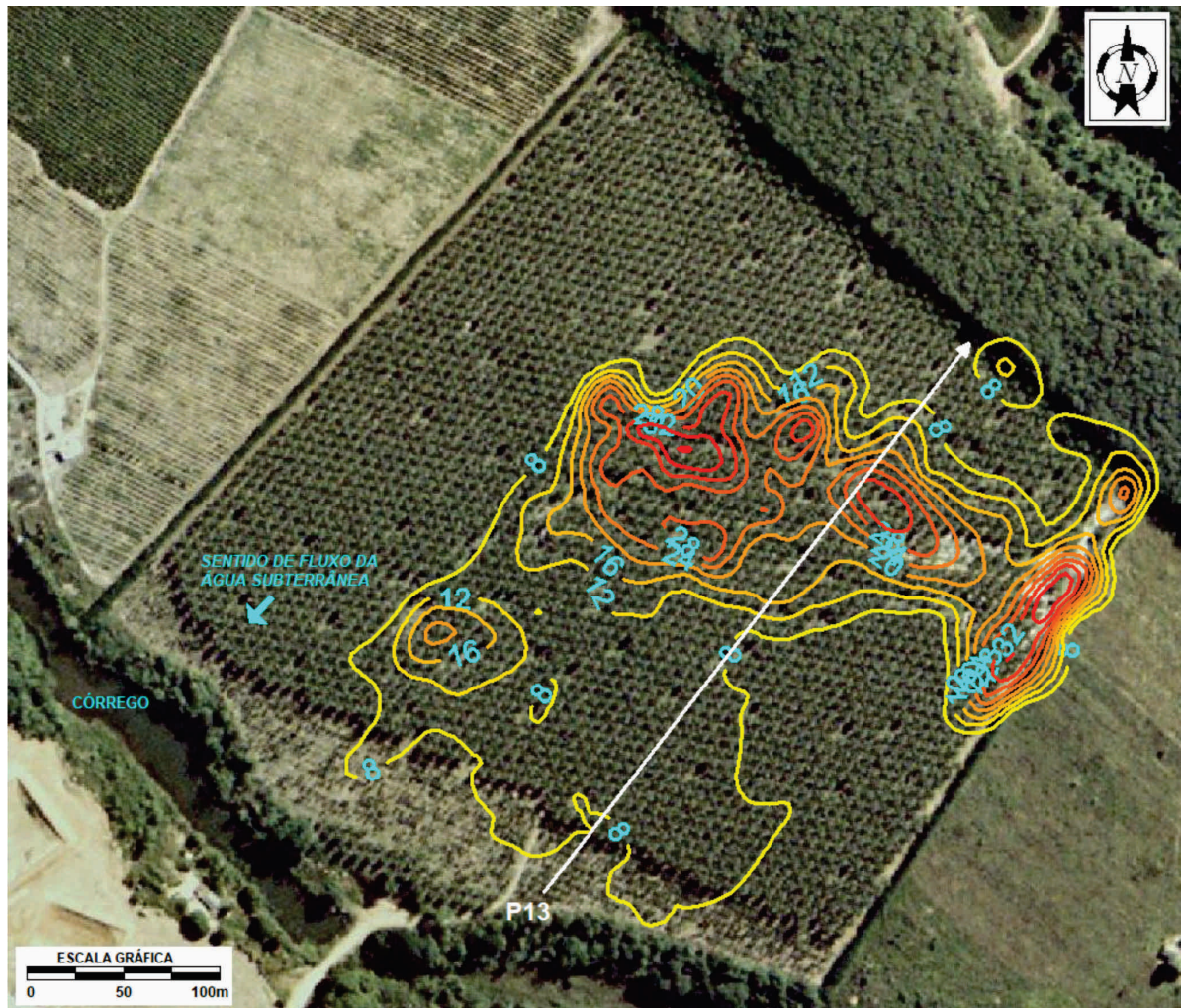


Figura 6b. Mapa de condutividade elétrica da profundidade de até 6,0m.

Fonte: os autores.

Este mapa da Figura 6b apresenta a abrangência da eventual pluma de contaminação inorgânica em direção ao córrego mais a sudoeste da área, concordante, portanto, ao sentido do fluxo local da água subterrânea, além de evidenciar os maiores valores de condutividade elétrica na porção nordeste, onde a fonte de contaminação é mais expressiva e é representada pelos resíduos ali enterrados quando do levantamento geofísico.

5.5 Contaminação orgânica na zona não saturada

A detecção de contaminação orgânica, em especial de combustíveis, já foi tema de diversas

aplicações do GPR, podendo ser citado os trabalhos de Aquino et al. (1998) e Dehaini (2001). Como ilustração ao tipo de anomalia que poderia ser detectado neste caso, segue exemplo de aplicação em posto de serviço, que na data do levantamento apresentava contaminação e estava em fase de remediação, onde foi utilizado o equipamento Ramac/GPR, com antenas de 400 MHz não blindadas e intervalo de distância de amostragem de 10,0 cm.

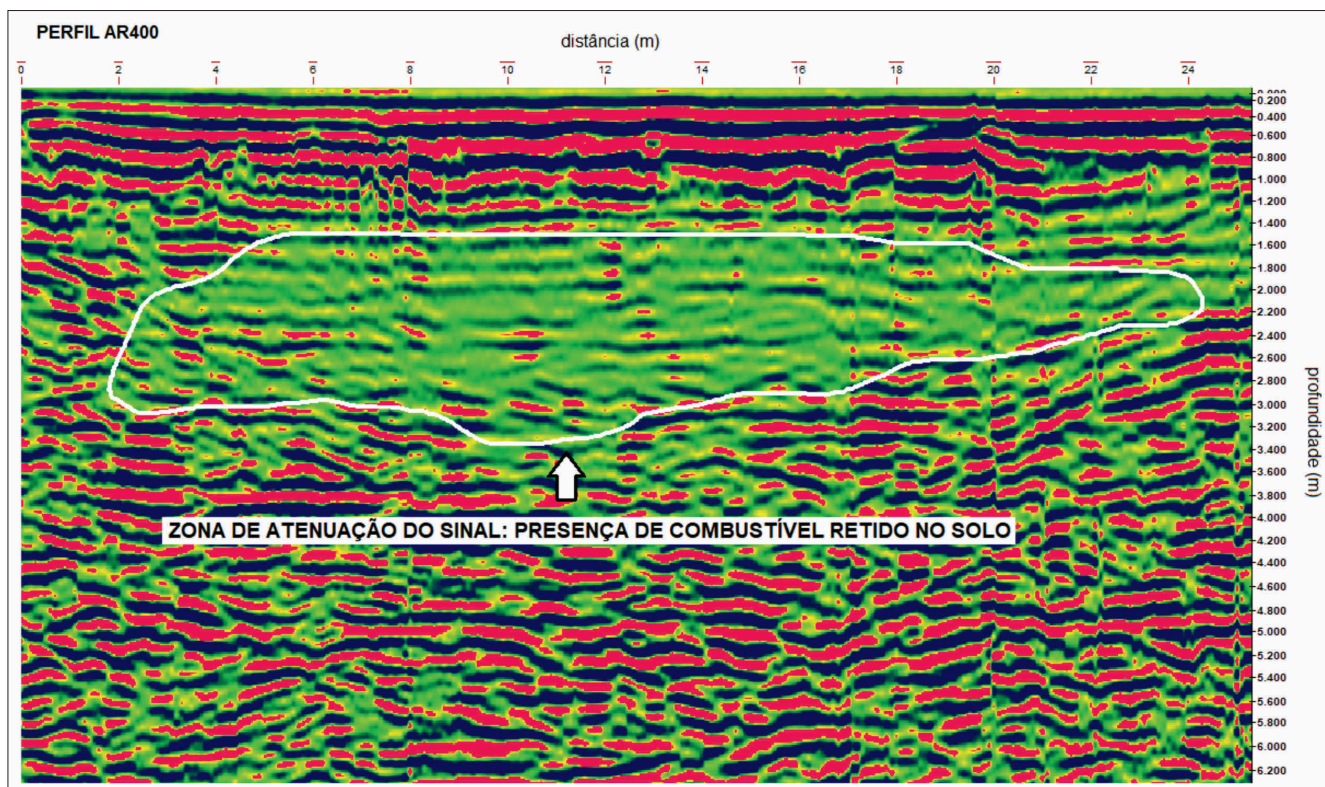


Figura 7. Seção GPR com atenuação associada à fase retida de combustível.

Fonte: os autores.

Na seção da Figura 7, observa-se que a presença de combustível em fase retida na zona não saturada é detectada pela visualização de região com atenuação do sinal GPR e que é produzida pela baixa constante dielétrica que este possui, reduzindo, assim, a amplitude das reflexões.

5.6 Pluma orgânica na zona saturada

Outro exemplo de detecção de contaminação orgânica em subsuperfície se refere à aplicação do método de Resistividade Capacitiva (RC), o qual tem indicado resultados muito promissores para este tipo de levantamento. No caso em questão, a atividade executada no local avaliado é o manejo de resíduos domésticos e onde havia setor de lubrificação e abastecimento de caminhões, que

apresentava contaminação comprovada por fase livre de produto na zona saturada e que foi interceptada pelos perfis geofísicos conforme visto a seguir (Figura 8a).

O resultado do levantamento pode ser visualizado na seção a seguir (Figura 8b), onde se verifica a presença de duas zonas de altas resistividades elétricas mais ao centro e que foi interpretada como a zona de abrangência da contaminação orgânica, sendo dividida pela atuação do poço de bombeamento ali instalado.

Nesta figura, também podem ser constatadas duas zonas de baixas resistividades elétricas na parte inicial do perfil em profundidades mais rasas e que podem indicar a infiltração de contaminação inorgânica na porção superficial do solo a partir dos resíduos domésticos ali operados.

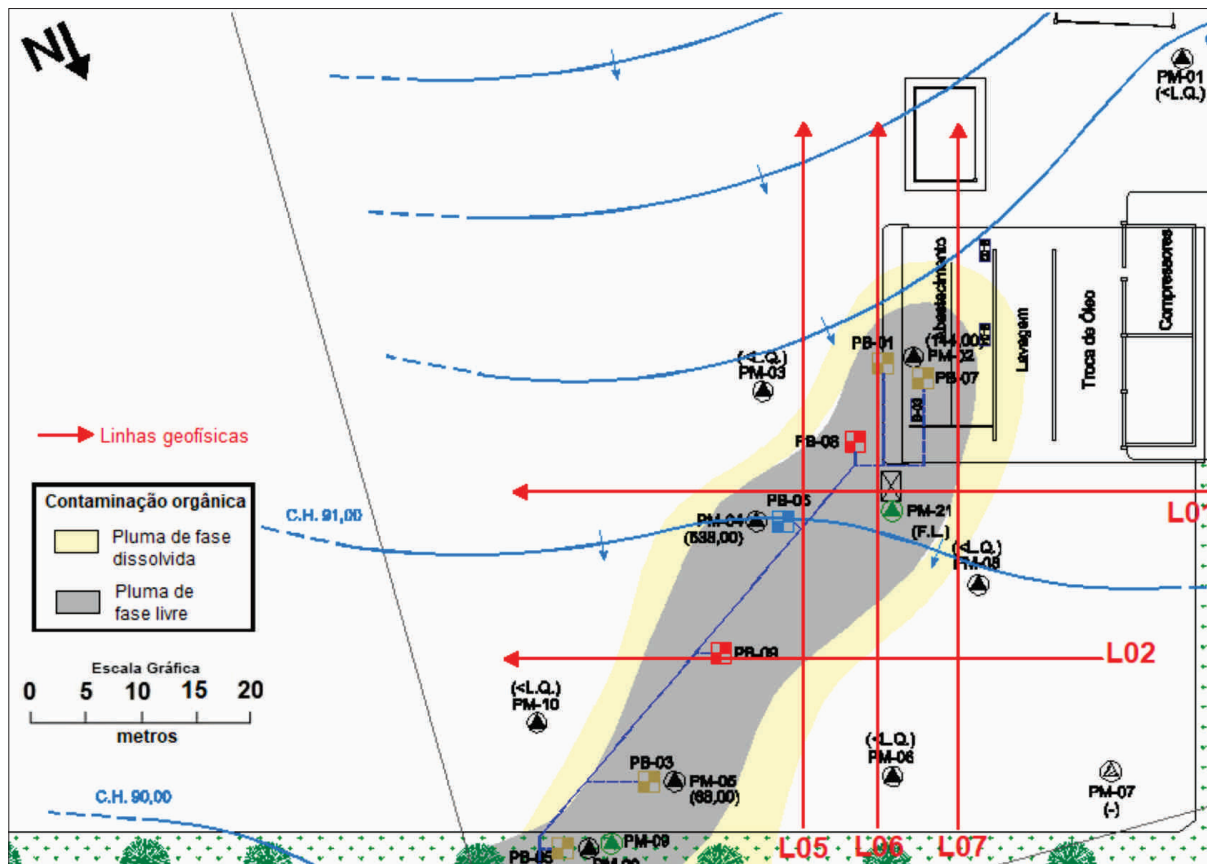


Figura 8a. Linhas de Resistividade Capacitiva na área investigada.

Fonte: os autores.

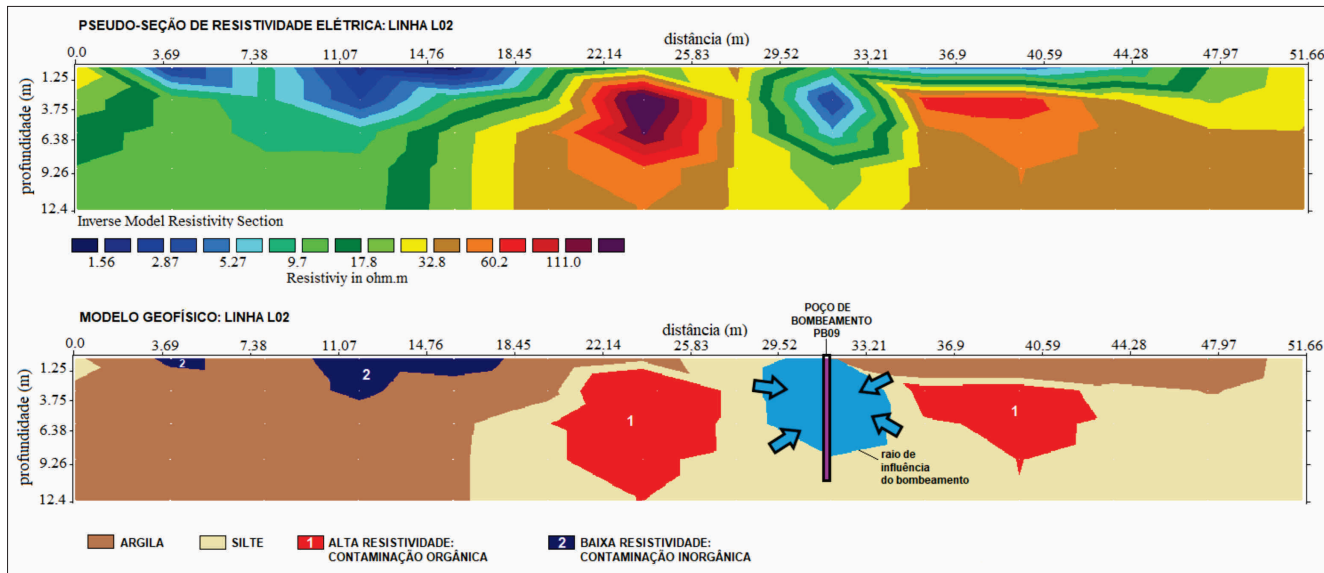


Figura 8b. Pseudo-seção e modelo da linha L02 indicando contaminações.

Fonte: os autores.

5.7 Rejeitos de mineração

O próximo caso se refere a avaliação de antiga de cava de mineração de areia, localizada em

várzea de rio, onde havia o histórico de preenchimento com rejeitos de atividade minerária (escória metálica), sendo o levantamento geofísico aplicado para determinação de área e volume de

material aterrado. Para a investigação em questão, foi empregado o método GPR, utilizando-se o equipamento Ramac/GPR com antenas não blindadas de frequência de 100 MHz, adotando-se o

arranjo dipolo (ou *common off-set*) e 10,0 cm como intervalo de medidas (amostragem), sendo os perfis dispostos em formato de malha, com espaçamento médio de 5,0 m (Figura 9a).

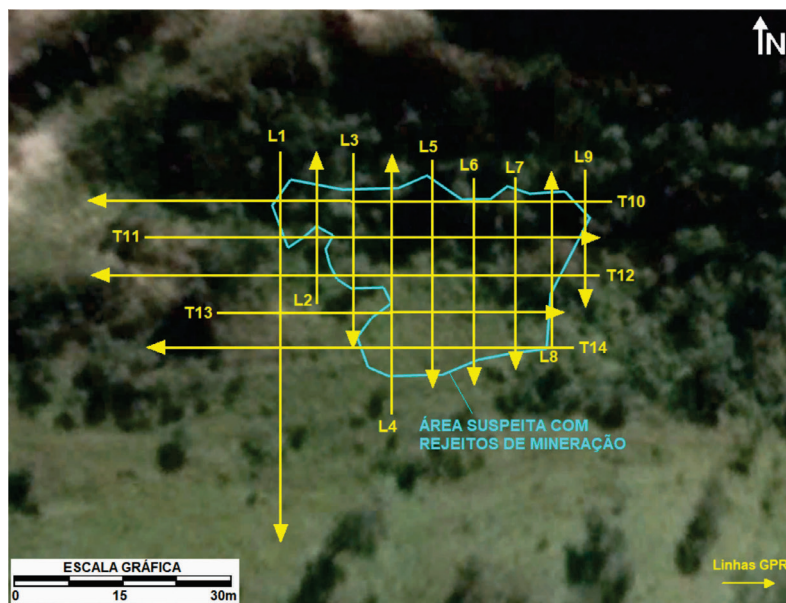


Figura 9a. Perfis GPR na área suspeita de conter resíduos de mineração.
Fonte: os autores.

Após o levantamento de campo, o processamento de dados e a elaboração das seções GPR revelaram a configuração da cava contendo os

resíduos de mineração, cujo exemplo pode ser observado na seção do Perfil T12, apresentada na sequência na Figura 9b.

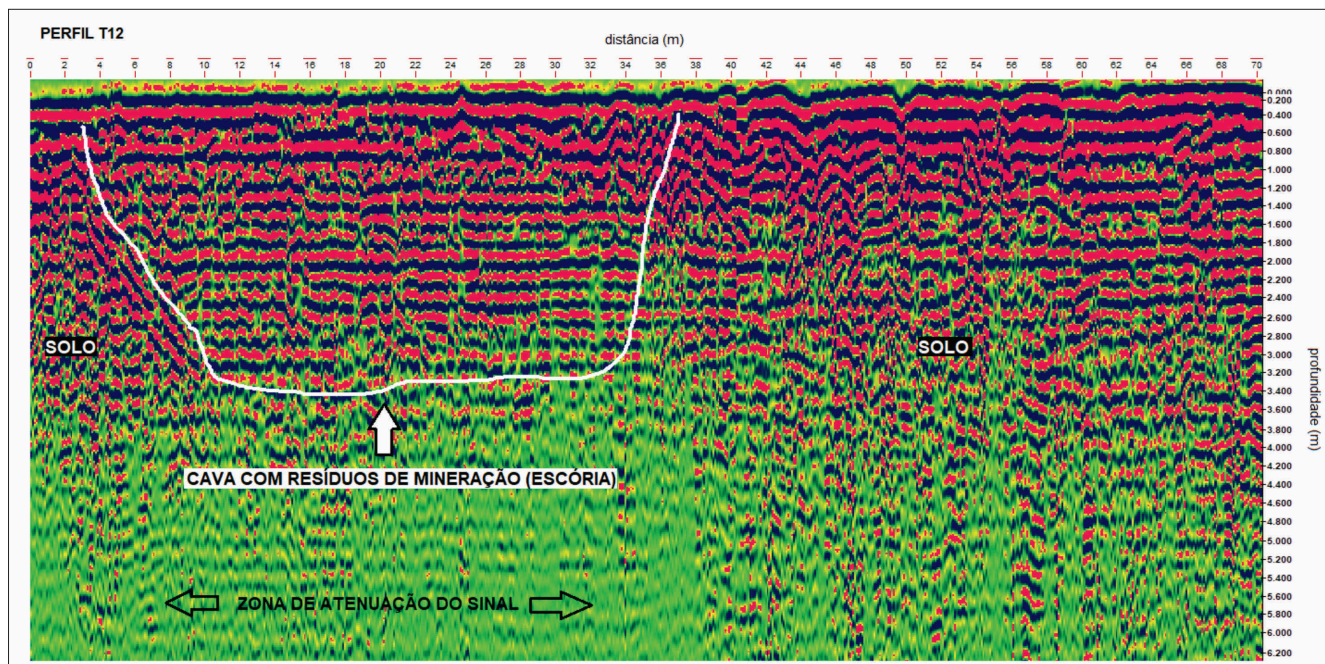


Figura 9b. Seção GPR do Perfil T12 com indicação de cava com rejeitos.
Fonte: os autores.

Tanto na seção da Figura 9b, como em outras deste levantamento, foi possível observar a configuração da cava, sendo que neste exemplo sua extensão é da ordem de 34,0 m e profundidade máxima de 3,5 m. Destaca-se, nesta imagem, a feição de refletores plano-paralelos no interior da cava que é característico de reverberações do sinal GPR quando da presença de material muito condutivo, representados, neste caso, pela escória metálica. Além disso, deve ser observada a atenuação do sinal GPR em níveis pouco mais profundos e que pode indicar a lixiviação a partir do material da cava, formando, possivelmente, uma pluma de contaminação, sendo que o nível d'água raso existente no local, em torno de 2,0 m de profundidade, favoreceria este processo.

5.8 Contaminação difusa da agricultura

Decorrente das grandes dimensões das propriedades agrícolas, é difícil a definição de pon-

tos de amostragem para uma eventual investigação confirmatória caso a área seja suspeita de apresentar contaminação. Neste caso, os levantamentos geofísicos podem contribuir de forma relevante na determinação dos pontos de maiores concentrações dos contaminantes, principalmente os métodos eletromagnéticos indutivos, como é o caso do exemplo a seguir, no qual foi realizado o rastreamento em local de cultura de cana de açúcar onde ocorreu a disposição de lodo biológico industrial e cinzas de biomassa.

O levantamento em questão se desenvolveu através da utilização do equipamento EM-31, sendo realizados perfis transversais à área de disposição, espaçados em 20,0 m, com leituras em intervalos de 10,0 m e nas duas faixas de profundidades de 3,0 m e 6,0 m, cujas variações medidas de condutividade elétricas podem ser verificadas no exemplo a seguir (Figura 10a).

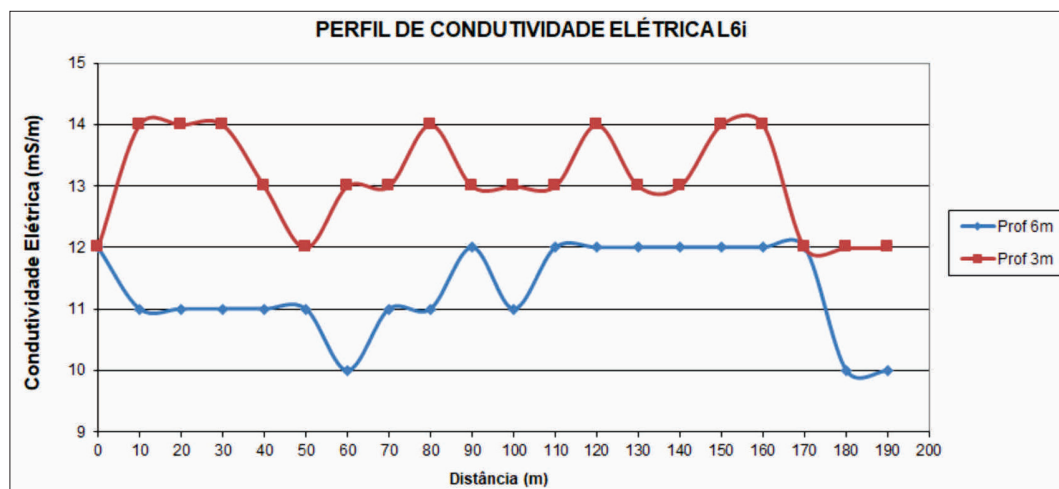


Figura 10a. Perfil L6i de condutividade de até 3,0 m e 6,0 m de profundidade.

Fonte: os autores.

Comparando o comportamento dos gráficos anteriores, se observa que os valores medidos de condutividade elétrica para a faixa de profundidade de 3,0 m são maiores que os apresentados para 6,0 m, o que não é muito comum, mas é coerente com a situação investigada onde os resíduos foram dispersos em superfície e sua infiltração permanece nas camadas mais rasas do solo.

Posteriormente, os mapas de anomalias de condutividade elétrica do local foram confeccionados ao se interpolar os dados obtidos nos perfis, sendo possível visualizar as variações da condutividade elétrica na área investigada e distinguir, conforme exemplo a seguir (Figura 10b), duas faixas principais de anomalias com maiores valores, mais ao norte e mais ao sul, e onde foi verificado

in loco pequenas porções com resíduos expostos e misturados ao solo, o que é concordante aos resul-

tados aqui expressos, indicando, assim, a eficiência do método geofísico empregado.

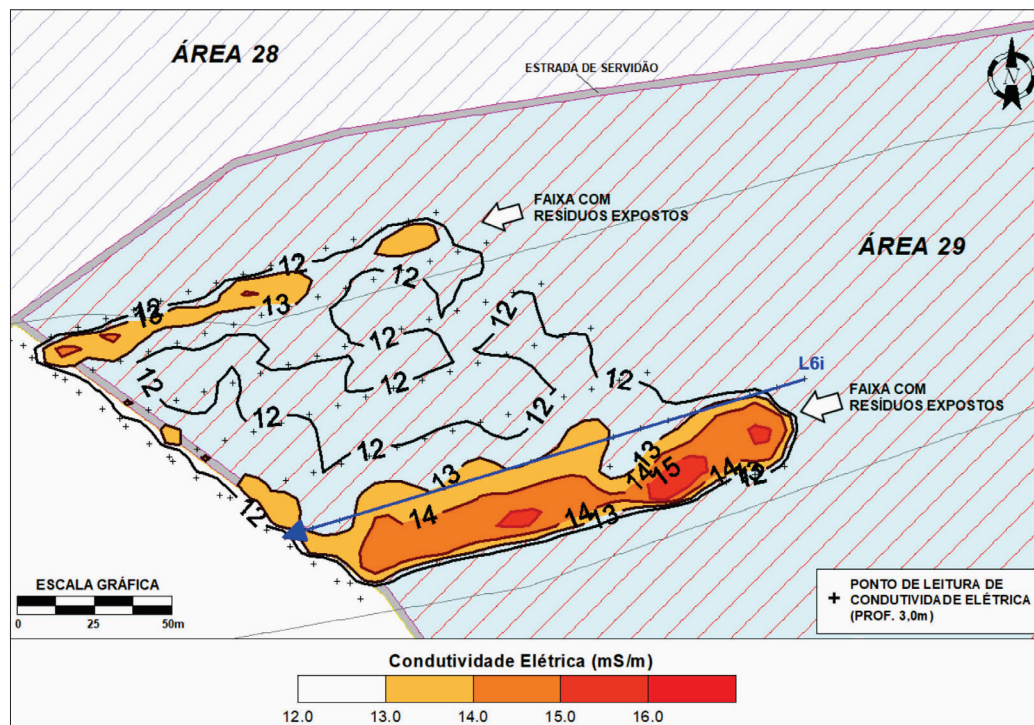


Figura 10b. Mapa de condutividade elétrica na profundidade de até 3,0 m.

Fonte: os autores.

5.9 Necrochorume

De acordo com Silva (2018), os cemitérios apresentam risco potencial de contaminação ambiental, em particular, para águas subterrâneas de menor profundidade, ou seja, para o aquífero freático, decorrente da percolação de líquidos oriundos da decomposição de cadáveres e dos materiais dos invólucros e que constituem, assim, o necrochorume.

Neste contexto, os métodos geofísicos podem ser aplicáveis para mapeamento das anomalias de baixas resistividade elétrica (altas condutividades) indicativas de locais de maior concentração

de contaminantes em subsuperfície, como será visto a seguir, principalmente pela aplicação do método de Resistividade Capacitiva (RC).

O estudo de caso a seguir corresponde apenas a um exemplo onde a metodologia da Resistividade Capacitiva (RC) foi aplicada para diagnóstico de contaminação subterrânea em diversos cemitérios de diferentes dimensões. Na área em questão, os trabalhos de campo se desenvolveram através da execução de uma malha de perfis de Imageamentos Elétricos Capacitivos, com linhas longitudinais e transversais, contemplando todo o local (Figura 11a).



Figura 11a. Linhas de Resistividade Capacitiva executadas em cemitério.

Fonte: os autores.

Em várias seções de resistividade elétrica obtidas neste levantamento, observou-se a presença de anomalias de baixos valores, sendo que um dos resultados mais proeminentes é o observado

na seção do Perfil T2, cuja zona anômala pode representar uma pluma de contaminação subterrânea decorrente de sua feição alongada e da profundidade verificada.

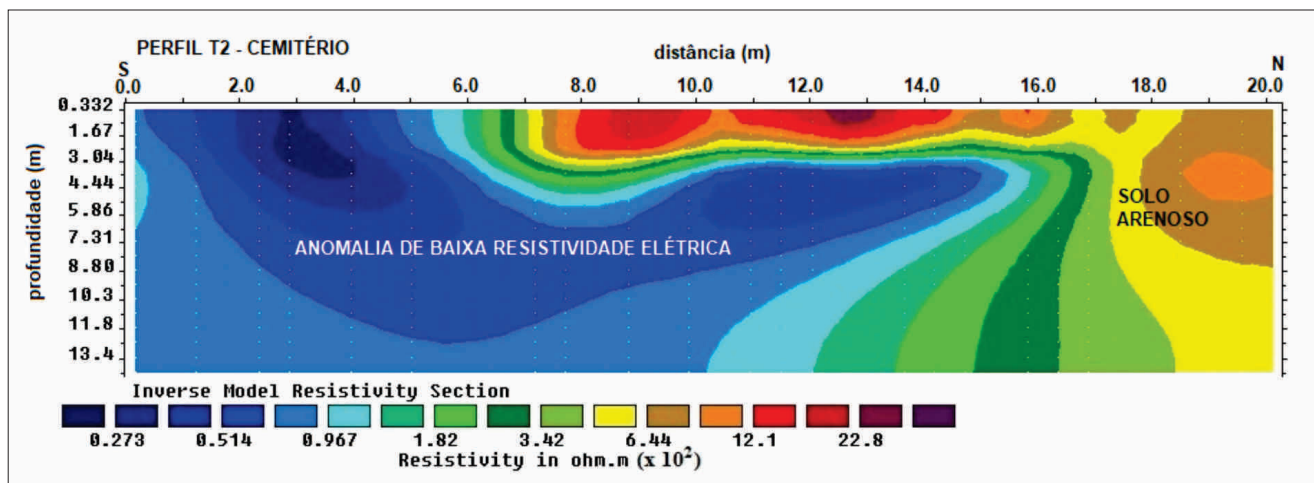


Figura 11b. Seção do Perfil T2 com anomalia de baixa resistividade elétrica.

Fonte: os autores.

Posteriormente, integrando-se e interpolando-se os valores de resistividade elétrica dos diferentes perfis de campo, foram elaborados mapas de anomalias de resistividade elétrica, sendo apresentado, como exemplo, o mapa de profun-

didade de corte de 2,0 m, que reflete a situação pouco abaixo das bases de sepultamento, e onde se observam os menores valores na parte sul do cemitério e que são os locais mais indicados às sondagens confirmatórias e amostragens de solo.

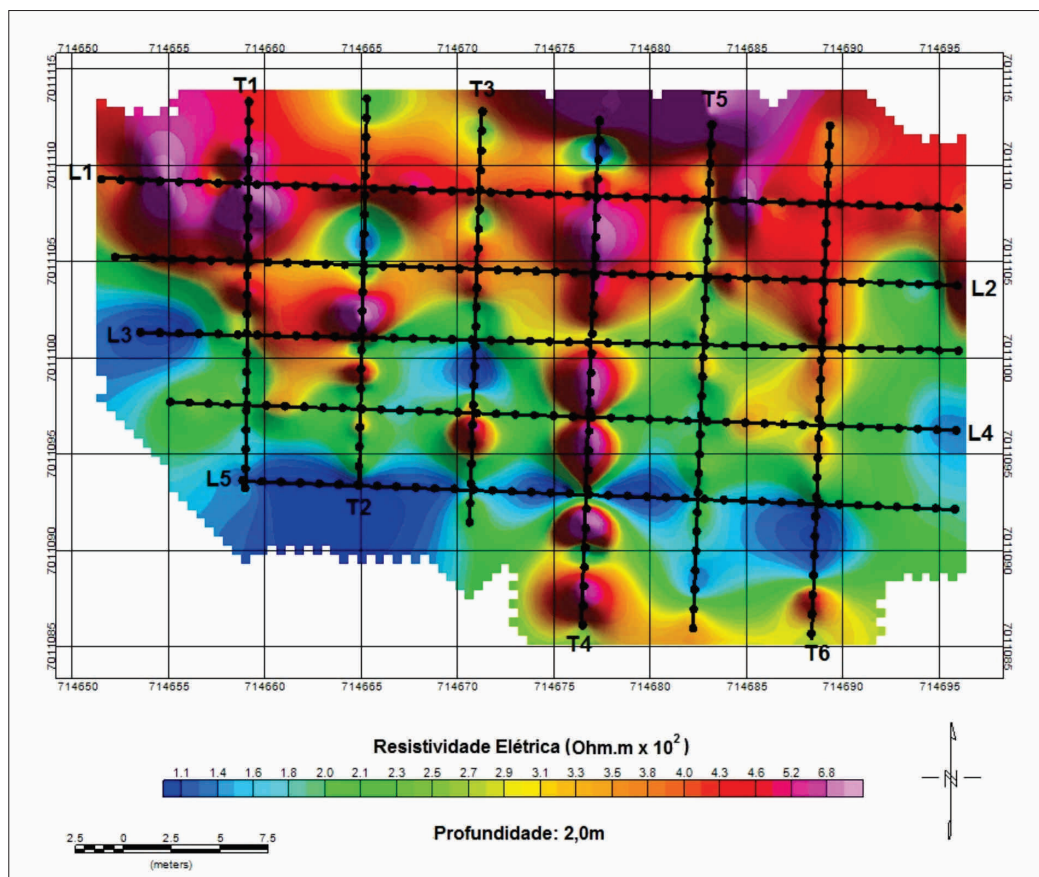


Figura 11c. Mapa de resistividade elétrica na profundidade de corte de 2,0 m.

Fonte: os autores.

Deve ser ressaltado que, no trabalho em questão, a aplicação da Resistividade Capacitiva (RC) demonstrou grande potencialidade em função, principalmente, da alta sensibilidade e resolução na detecção das anomalias geofísicas, rapidez na execução em campo e ausência de interferências externas nas medições, o que permite inferir, assim, que essa metodologia se mostrou mais eficiente quando comparada a outros métodos geofísicos que também poderiam ser empregados neste tipo de levantamento.

5.10 Lodo proveniente de esgoto

Como exemplo ilustrativo de como seria a detecção do sinal anômalo de disposição de lodo proveniente de esgoto, ou oriundo de estações de tratamento, é apresentada a seguir a seção obtida em levantamento com o equipamento Ramac/GPR, sendo empregadas as antenas não blindadas de 400 MHz de frequência, com intervalo de distância de amostragem de 10,0 cm e arranjo *common off-set*, e que foi aplicado em local onde haviam sido aterrados materiais removidos de fossas sépticas.

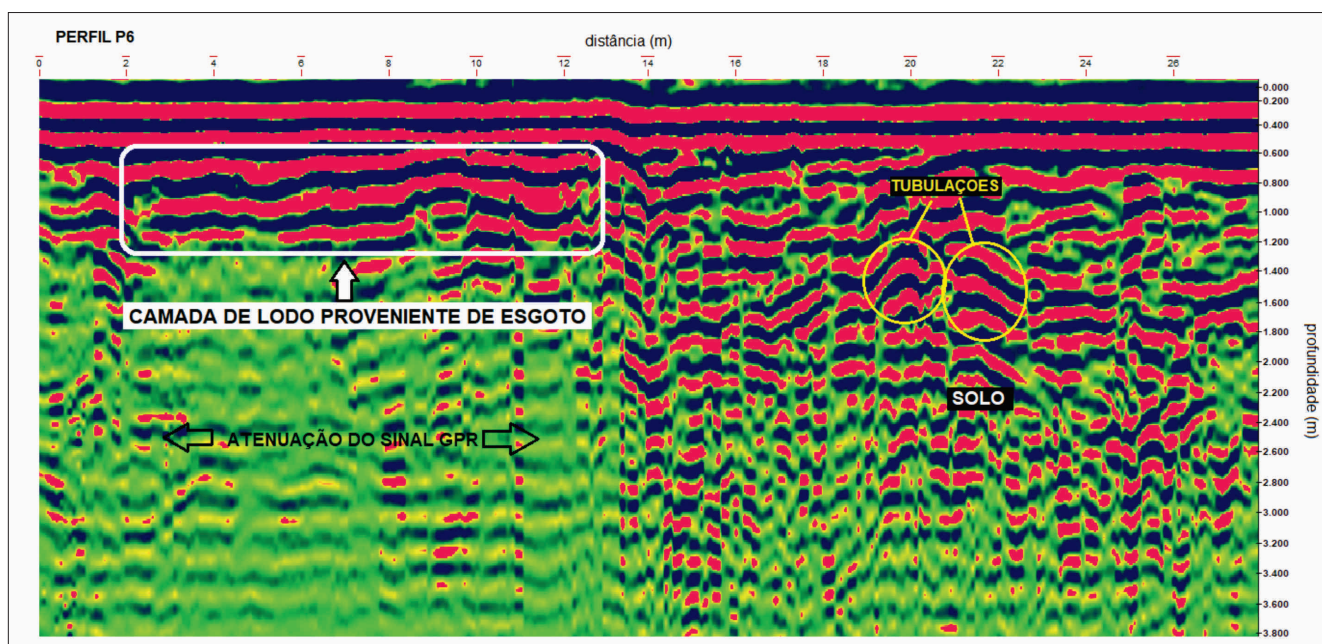


Figura 12. Seção GPR com feição anômala de camada de lodo de esgoto.

Fonte: os autores.

Observa-se na seção da Figura 12 o acamamento plano-paralelo como sinal GPR característico deste tipo de resíduo quando enterrado, contrastando com o aspecto do solo do entorno e que possui padrão difuso. Além disso, destaca-se a zona de atenuação do sinal abaixo de onde estão presentes esses resíduos, provocada por suas altas condutividades elétricas, e que decorrem da existência de compostos inorgânicos, principalmente nitritos ou nitratos, que, além do material biológico, podem ser contaminantes potenciais da água subterrânea.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme apresentado neste artigo, verifica-se que a escolha da metodologia geofísica para a investigação ambiental de contaminação subterrânea deve ser definida, primordialmente, pela correlação das propriedades físicas do contaminante com a potencialidade que os métodos geofísicos possuem para detectar e medir suas variações. Desta forma, observou-se nos exemplos apresentados que os tipos de fonte de contaminação mais comuns que impactam o solo e a água subterrânea podem ter suas presenças identificadas pela aplicação de determinados métodos geofísicos

e conforme suas especificações. Além disso, nos casos reportados é possível verificar quais seriam os sinais que esses contaminantes provocam nos resultados obtidos, produzindo, portanto, as assinaturas das diferentes fontes de contaminação subterrânea nos dados geofísicos. Em relação à geologia local que poderia afetar a eficiência do método geofísico, esta situação pode ser solucionada através de modificações na metodologia empregada, tais como mudança do método escolhido, da configuração dos parâmetros de aquisição, das técnicas de campo e da forma de amostragem dos dados, entre outros, e que se reflete na diversidade dos casos aqui apresentados. Contudo, em pesquisas da Geofísica Ambiental para avaliação da contaminação subterrânea é necessário que o profissional envolvido tenha pleno conhecimento das propriedades físicas e do comportamento físico-químico dos contaminantes em subsuperfície, além do domínio do método geofísico a ser aplicado. Por fim, é importante destacar, entre outras vantagens, que a utilização da metodologia geofísica se mostra adequada à sustentabilidade, pois envolvem tecnologias não invasivas e, devido a isso, não causam nenhuma alteração no meio investigado e nenhum prejuízo às pessoas ou danos aos bens materiais durante os trabalhos de pes-

quisa, contribuindo com a preservação do meio ambiente e da manutenção do bem-estar social.

REFERÊNCIAS

- Aquino, W.F.; Dehaini, J.; Mendes J.M.B. Geo-Radar para a detecção de contaminação por hidrocarboneto. Anais do II Encontro de Geotecnia e Meio Ambiente e II Workshop de Geofísica Aplicada, Rio Claro – SP. CD-ROM. 1998.
- Aquino, W.F. Métodos geofísicos eletromagnéticos aplicados ao diagnóstico da contaminação do solo e das águas subterrâneas em área de infiltração de resíduos industriais. São Paulo. 121p. Dissertação (Mestrado em Hidrogeologia e Recursos Minerais) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 2000.
- Aquino, W.F.; Tonello P.S.; Resende, P.R. Experimentation and indirect methods applied to investigate the contaminated areas. Revista de Gestão e Sustentabilidade (GEAS). Edição Especial. p.568-586. 2019.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS Norma n.15.935. Investigações ambientais: aplicações de métodos geofísicos, 21p. 2011. Disponível em <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=86681>.
- ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard guide for selecting surface geophysical methods*. D 6429-99, 15p. 2006.
- Braga, A.C.O. Métodos de eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática. Rio Claro, 126p. Tese (Livro Docência em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. 2006.
- CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Manual de gerenciamento de áreas contaminadas. Programa CETESB/GTZ. São Paulo. 389p. 2001.
- CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Relatório de áreas con-
- taminadas e reabilitadas no estado de São Paulo. São Paulo. 12p. 2019. Disponível em <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/wp-content/uploads/sites/17/2020/02/TEXTO-EXPLICATIVO-2019-12.02.20.pdf>
- Davis, J.L. & Annan, A.P. Ground-penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, v.37 (5), p 531-551. 1989.
- Dehaini, J. Detecção da pluma de contaminação de hidrocarbonetos em subsuperfície pelo método de radar de penetração. Tese (Doutorado em Hidrogeologia e Recursos Minerais) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 159p. 2001.
- EPA – ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Use of airborne, surface and borehole geophysical techniques at contaminated sites. A Reference guide EPA/625/R-92/007. Washington: Eastern Research Group. Chapter 1, pp. 1-37. 1993. Disponível em <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/geophysics-guide.pdf>. Acessado em 03 jun 2019.
- Greenhouse, J.P. Environmental geophysics: it's about time. *Geophysics: The Leading Edge*, v.10, p. 32-34. 1991.
- Greenhouse, J.P. Aplicações de metodologias geofísicas em estudos ambientais e geotécnicos. Rio Claro. Centro de Estudos Ambientais, Universidade Estadual Paulista, 111p. 1996.
- Gretsky, P., Barbour, R. & Asimenios, G.S. Geophysics, pit surveys reduce uncertainty. *Pollution Engineering*, p. 102-108. 1990.
- Habermann, M. & Gouveia, N. Requalificação urbana em áreas contaminadas na cidade de São Paulo Revista Estudos Avançados. v. 28 n. 82. p.129-137. São Paulo Oct./Dec. 2014.
- Kuras. The capacitive resistivity technique for electrical imaging of the shallow subsurface. Tese de doutorado. Universidade de Nottingham. Inglaterra, 286p. 2002.
- Parasnis. Principles of applied geophysics, 5 ed., Chapman & Hall Editores, London, 429p. 1997.

Reynolds, J.M. An introduction to applied and environmental geophysics, 2 ed., Wiley-Blackwell Editores. Oxford, 696p. 2011.

São Paulo. Lei n. 13.577, de 08 de julho de 2009. Dispõe sobre diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento de áreas contaminadas, e dá outras providências correlatas. Disponível em <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/2009/lei-13577-08.07.2009.html>.

Silva, F.C. Avaliação de metais potencialmente tóxicos em zona não saturada da necrópole de Nossa Senhora Aparecida, Piedade, SP. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) – Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, 249p. 2018.

Steeple, D. Uses and techniques of environmental geophysics. *Geophysics: The Leading Edge*, v.10, n. 9, p. 30-31. 1991.

UTILIZAÇÃO DO TELEVISIONAMENTO ÓPTICO DE FUROS DE SONDAGEM NA AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DE TALUDES EM DEPÓSITOS DE FERRO

USE OF OPTICAL IMAGING OF BOREHOLES IN THE EVALUATION
OF SLOPE STABILITY IN IRON ORE DEPOSITS

DOUGLAS MARCEL QUATIABARA SANDER LIBARDI

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, Brasil. quatiabara@gmail.com

PAULO SALVADORETTI

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, Brasil. paulo.salvadoretti@ufrgs.br

GEORGE OLUFUNMILAYO GASPER

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, Brasil. gee_mailz@yahoo.com

OLUWAFEMI SHEKONI AYODEJI

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, Brasil. shekony@yahoo.com

ANDRÉ CEZAR ZINGANO

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, Brasil. andrezin@ufrgs.br

JOÃO FELIPE COIMBRA LEITE DA COSTA

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, Brasil. jfelipe@yahoo.com

ELIAS KASPARY POOTER

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, Brasil. e_pooter@hotmail.com

RESUMO ABSTRACT

O *Optical Televiewer* (OTV) é um dispositivo de perfilagem geofísica que produz uma imagem contínua e orientada da parede de furos de sondagem. Neste trabalho, foram selecionadas imagens obtidas em furos de sondagem executados em duas jazidas de ferro que fazem parte da 'Megaestrutura Gandarela', localizada na porção centro-norte do Quadrilátero Ferrífero, Estado de Minas Gerais, Brasil. As imagens geradas com OTV desempenham um papel auxiliar em campanhas de exploração mineral e também na aquisição de informações geotécnicas. No presente estudo, os dados de OTV coletados em taludes de duas minas a céu aberto serviram para efetuar-se a identificação e orientação (*dip e dip direction*) das estruturas geológicas, a correção da declinação magnética das estruturas e análises cine-

The *Optical Televiewer* (OTV) is a geophysical logging device that produces a continuous and oriented image of the borehole wall. In this study, images obtained from boreholes collected at two iron deposits that are part of the 'Mega Structure Gandarela', located in the north-central portion of the Quadrilátero Ferrífero, State of Minas Gerais, Brazil, were selected. The images generated with OTV play an auxiliary role in mineral exploration survey and also in the acquisition of geotechnical information. The OTV data collected on slopes of two open pit mines served to carry out the identification and orientation (*dip and dip direction*) of the geological structures, the correction of the magnetic declination of the structures and kinematic analyzes indicating the possible types of rupture of

máticas indicando os possíveis tipos de ruptura dos taludes, as quais foram realizadas nos softwares *WellCad e Dips*. O principal objetivo é comparar as estruturas identificadas via OTV em furos de sondagem em relação as já observadas nos levantamentos de superfície, de modo a verificar se o comportamento das estruturas locais permanece inalterado em profundidade. O estudo mostrou que mesmo dispondo-se de um número limitado de furos de sondagem, as estruturas em profundidade marcadas com OTV servem como um importante complemento às observações feitas a partir dos mapeamentos geológicos estruturais de superfície.

Palavras-chave: geofísica, optical televiewer, minério de ferro.

1 INTRODUÇÃO

O televisionamento de furos de sondagem é uma técnica relativamente nova. Foi introduzida no Brasil no ano de 2001 (Baillot et al., 2004) e apresenta-se hoje como uma técnica auxiliar na análise de problemas geológico-geotécnicos (Oliveira, 2015).

O *Optical Televiewer* (OTV) é um dispositivo de televisionamento que produz imagens contínuas e orientadas da parede de furos de sondagem. O uso de imagens de OTV é prática internacionalmente conhecida na identificação de feições geológicas dos estratos (Fredrick et al., 2014). De acordo com Blake (2010) e Baillot (2012), a combinação da técnica de sondagem com circulação reversa (sondagem RC) e o televisionamento de furos pode levar a uma redução significativa dos custos da pesquisa mineral, reduzindo a necessidade de extração de testemunhos com sondagem rotativa convencional e o uso da sondagem orientada. Desta forma, as imagens geradas com OTV desempenham um papel auxiliar em campanhas de exploração mineral e também na aquisição de informações geotécnicas.

Neste trabalho, é feita uma aplicação de imagens de OTV em furos de sondagem rotativa convencional, executados em duas jazidas de ferro (minas de Gongo Soco e Tamanduá), localizadas na porção centro-norte do Quadrilátero Ferrífero, no Estado de Minas Gerais. Em função da necessidade de serem coletados dados geotécnicos com-

plementares de taludes finais nestas duas minas, novos furos de sondagem foram perfurados, com posterior aquisição de imagens de OTV. Estudos anteriores feitos nestas minas serviram para definir seus respectivos modelos de comportamento lito-estrutural. Levantamentos estruturais de superfície foram realizados ao longo da vida útil dos empreendimentos, os quais revelaram muitos detalhes a respeito das características geotécnicas das rochas presentes nestas áreas.

Keywords: geophysics, optical televiewer, iron ore.

No presente estudo, o principal objetivo é comparar as estruturas identificadas via OTV em furos de sondagem em relação as já observadas nos levantamentos de superfície, de modo a verificar se o comportamento das estruturas locais permanece inalterado em profundidade. Além disso, é feita uma análise cinemática em alguns taludes de interesse em ambas as minas, a partir de estruturas marcadas em imagens de OTV, comparando-a com a análise cinemática efetuada a partir das estruturas identificadas no mapeamento geológico estrutural de superfície, para verificar se houve mudanças que poderiam resultar em novas possibilidades de ruptura desses taludes.

A técnica de perfilagem geofísica consiste na passagem de dispositivos contendo sensores dentro de furos de sondagem, efetuando-se medições de várias propriedades físicas das rochas adjacentes ao furo de sondagem.

2 OPTICAL TELEVIEWER

A técnica de perfilagem geofísica consiste na passagem de dispositivos contendo sensores dentro de furos de sondagem, efetuando-se medições de várias propriedades físicas das rochas adjacentes ao furo de sondagem.

No caso específico da aquisição de imagens de OTV, é feito um imageamento radial da parede do furo, obtendo-se imagens orientadas no espaço. Esta orientação possibilita uma análise cuidadosa das estruturas geológicas de interesse. Tipicamente, os dados são exportados para a confecção, por exemplo, de estereogramas das estruturas. Eventualmente, as imagens são usadas para gerar outras informações adicionais com respeito aos perfis (p. ex. frequência de fraturas).

Durante a perfilagem, os dados adquiridos incluem o registro de inclinação e azimute do furo, nível de iluminação das imagens, resolução, velocidade de aquisição, temperatura, radiação gama natural emitida pelas rochas, entre outros parâmetros.

O OTV gera imagens da parede do furo com alta resolução (até 1 milímetro, aproximadamente). As aplicações para este tipo de dispositivo incluem inspeções de defeitos em revestimentos, caracterização de fraturas em furos preenchidos

tanto com ou sem água, entre outras. Esta sonda, quando combinada com outros sensores mais tradicionais, pode ser usada para observar variações mineralógicas e estudos de foliação das rochas ao longo de furos de sondagem.

Imagens adquiridas com *televiwer* são orientadas através da coleta simultânea de dados das componentes tridimensionais do campo magnético terrestre e componentes tridimensionais de inclinação do furo, incorporados no OTV, essenciais para a interpretação. A imagem possui uma direção referencial comum, geralmente o norte magnético. Estruturas planares que intersectam a parede do furo produzem traços senoidais na imagem do *televiwer* projetadas (“desembrulhada”) (Figura 1). Usando a direção referencial gravada durante a perfilagem, senóides podem ser analisadas para a produção de características estruturais de mergulho (*dip*) e da direção mergulho (*dip direction*) das estruturas em profundidade.

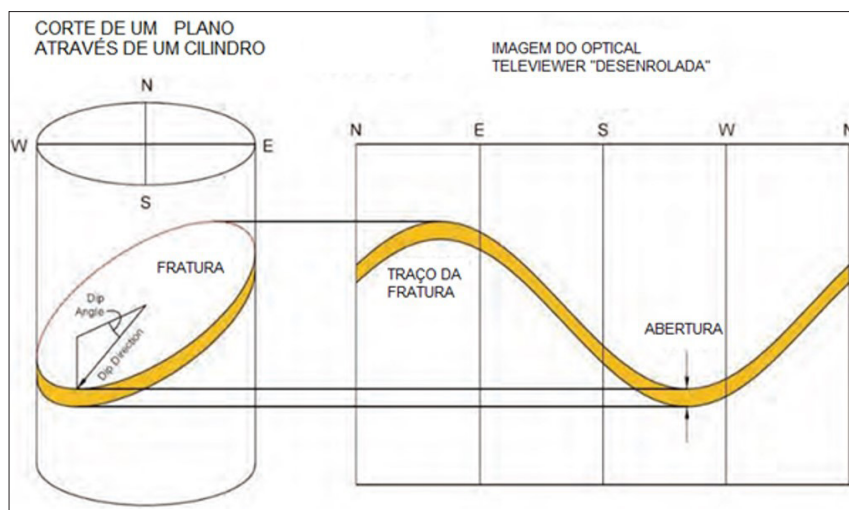


Figura 1. Formação e orientação da imagem gerada por OTV.

Fonte: Robertson, 2014.

A definição de *dip* e *dip direction* a partir das imagens abertas de OTV pode ser vista na Figura 2. Conforme Chung *et al.* (2008), as imagens geradas com *televiwers* resultam em imagens contínuas e orientadas de 360° da parede do furo a partir da qual a relação, a orientação da litologia e/ou as características planares estruturais podem ser definidas.

Um exemplo de imagem em minério de ferro encontra-se na Figura 3, a qual apresenta litologias friáveis. Percebe-se que a imagem gerada com OTV mostra uma fratura no maciço rochoso na profundidade de 14,3 m, a qual não pode ser observada na caixa de testemunhos. A orientação de características estruturais planares visíveis com OTV é geralmente local, e pode não represen-

tar a tendência global da estrutura na rocha. Isto é superado quando, na área de interesse, estiver disponível um número suficiente de furos de sondagem, de tal forma que exista uma amostragem estatística das estruturas.

Outra funcionalidade do OTV é que ele pode fornecer valiosas informações, com foco principal no posicionamento espacial (*dip e dip direction*) de descontinuidades e outras estruturas (veios, bandamentos, acamadamentos), quando estas são feições identificáveis. Conforme Gwynn *et al.*(2013) e Thomas *et al.*(2015) o erro previsto na determinação da posição espacial destas feições, considerando a técnica de sondagem orientada, pode chegar a 13°, enquanto que o OTV apresenta um

erro cumulativo de $\pm 1,7^\circ$ para o *dip* e $\pm 4^\circ$ para o *dip direction*. Assim, é uma ferramenta de grande auxílio na construção de estereogramas e na análise de estabilidade cinemática.

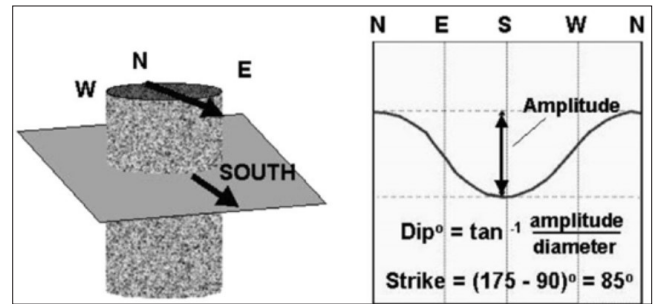


Figura 2. Tensão Crítica x Perda de Solo Para Amostra Natural.

Fonte: Retirado de Chung *et al.*, 2008.

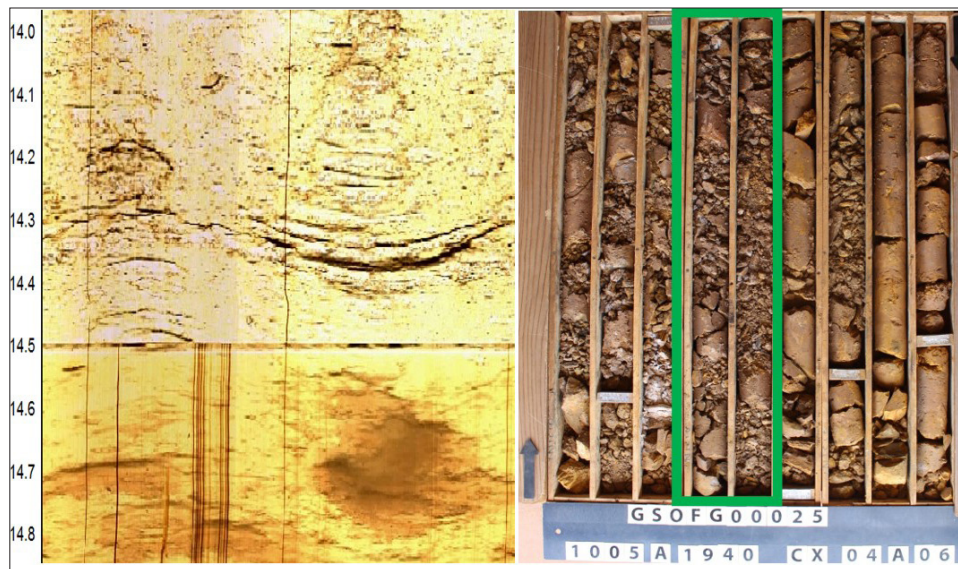


Figura 3. Imagem de fratura em litologias friáveis (à esquerda), ao lado da foto de testemunhos de sondagem (à direita). O fraturamento é visível somente no televisionamento. (Nível d'água em 14,5m).

Fonte: ?

As principais vantagens no uso dos métodos e observações do *Optical Televiewer* incluem:

- Redução potencial no esforço de sondagem testemunhada;
- As imagens permitem ver claramente as zonas de baixa recuperação e intenso fraturamento *in-situ* - o equivalente a 100% de recuperação pode ser alcançada;
- Perfilagem com OTV é relativamente barato para se realizar e é altamente portátil, permi-

tindo que a técnica seja utilizada em terrenos difíceis;

- Sondagem testemunhada exige várias operações repetitivas que muitas vezes acabam sendo registradas como uma série de segmentos entre paradas ou execuções, enquanto que o OTV fornece um registro contínuo do furo com profundidade e referências mais precisas;

- Dados gravados como informações de estruturas marcadas sobre as imagens podem ser importados diretamente para aplicações de softwares de análise cinemática;
- Possibilidade de estabelecer a orientação espacial verdadeira das estruturas visualizadas, evitando o uso de sondagem orientada, a qual apresenta maiores custos.

3 LOCALIZAÇÃO E ASPECTOS GEOLÓGICOS DAS ÁREAS DE ESTUDO

Neste estudo, foram utilizados furos de sondagem executados em minas que fazem parte da 'Megaestrutura Gandarela', localizada na porção centro-norte do Quadrilátero Ferrífero, Estado de Minas Gerais – Brasil (Figura 4).



Figura 4. Localização das áreas de estudo (Mina Gongo Soco e Mina Tamandua).

Fonte: ?

3.1 Geologia local – Mina Gongo Soco

A geologia da Mina Gongo Soco, onde encontram-se três furos filmados com OTV, apresenta como principais litologias aflorantes: solo saprolítico, rocha intrusiva metabásica, hematitas, itabiritos, quartzitos, filitos e xistos (Anon., 2008).

A geologia estrutural da área, obtida em mapeamentos feitos diretamente sobre o terreno (Anon., 2008) identifica várias estruturas planares e lineares, sendo as mais importantes: bandamento (Sb), foliação (Sn), clivagem de fratura (Sn+1), famílias de fraturas (Fr) presentes nas rochas metabásicas (IN), lineação de intersecção (Li) e eixo de dobra (bn).

O bandamento (Sb) é a estrutura principal e condicionante da estabilidade dos taludes na

Mina Gongo Soco, sendo possível sua identificação em quase todas as litologias da cava.

Outra estrutura penetrativa observada em praticamente todos os litotipos é a foliação Sn. A geração da Sn pode estar associada tanto a processos cisalhantes como a dobramentos.

Em se tratando de fraturas, de uma maneira geral, as juntas apresentam persistência métrica. Suas superfícies são predominantemente lisas e onduladas, fechadas, sem preenchimento e com espaçamento pequeno a moderado (centimétrico e decimétrico).

Note que o bandamento Sb, a foliação Sn e as fraturas são as estruturas possíveis de visualização com o OTV, sendo que este fato é levado em conta nas análises realizadas neste trabalho.

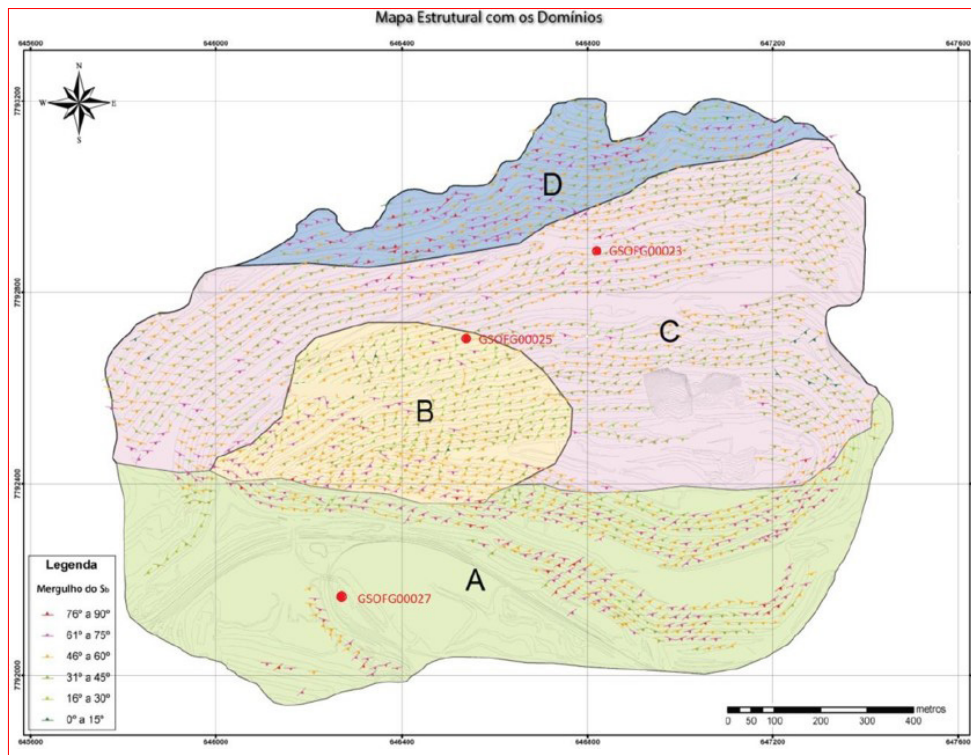


Figura 5. Mapa dos Domínios Estruturais da Mina Gongo Soco, com a localização dos três furos imageados com OTV. As letras A, B, C e D representam as regiões dos 4 domínios estruturais existentes na Mina Gongo Soco.

Fonte: Anon., 2008.

3.2 Geologia local – Mina Tamanduá

A Mina Tamanduá posiciona-se na região centro-norte do Quadrilátero Ferrífero e se insere no domínio geológico do Supergrupo Minas, representado pelos quartzitos da Formação Moeda e filitos da Formação Batatal (Grupo Caraça) e formações ferríferas da Formação Cauê (Grupo Itabira). Na Mina Tamanduá, foram adquiridas imagens de OTV em dois furos, assinalados na Figura 6.

Segundo Anon. (2012), a cava atual desta mina é constituída predominantemente por itabiritos friáveis (IF, IGO), itabiritos médios (IM), itabiritos compactos (IC), filitos e quartzitos, com presença subordinada de hematitas, itabiritos argilosos (IAL, IMN), rochas intrusivas e metavulcânicas.

Em termos de estruturas geológicas existentes na área, foram identificados os seguintes elementos (Anon., 2012): o acamamento S0 (observado nos filitos e quartzitos da encaixante), o bandamento composicional Sb, a foliação Sn e as superfícies de cisalhamento Scis.

4 RESULTADOS

Após a aquisição de dados em campo, as imagens de OTV foram analisadas de modo a permitir a marcação de estruturas geológicas, correção da declinação magnética e análises cinemáticas, o que foi efetuado com a utilização dos softwares *Wellcad* e *Dips*.

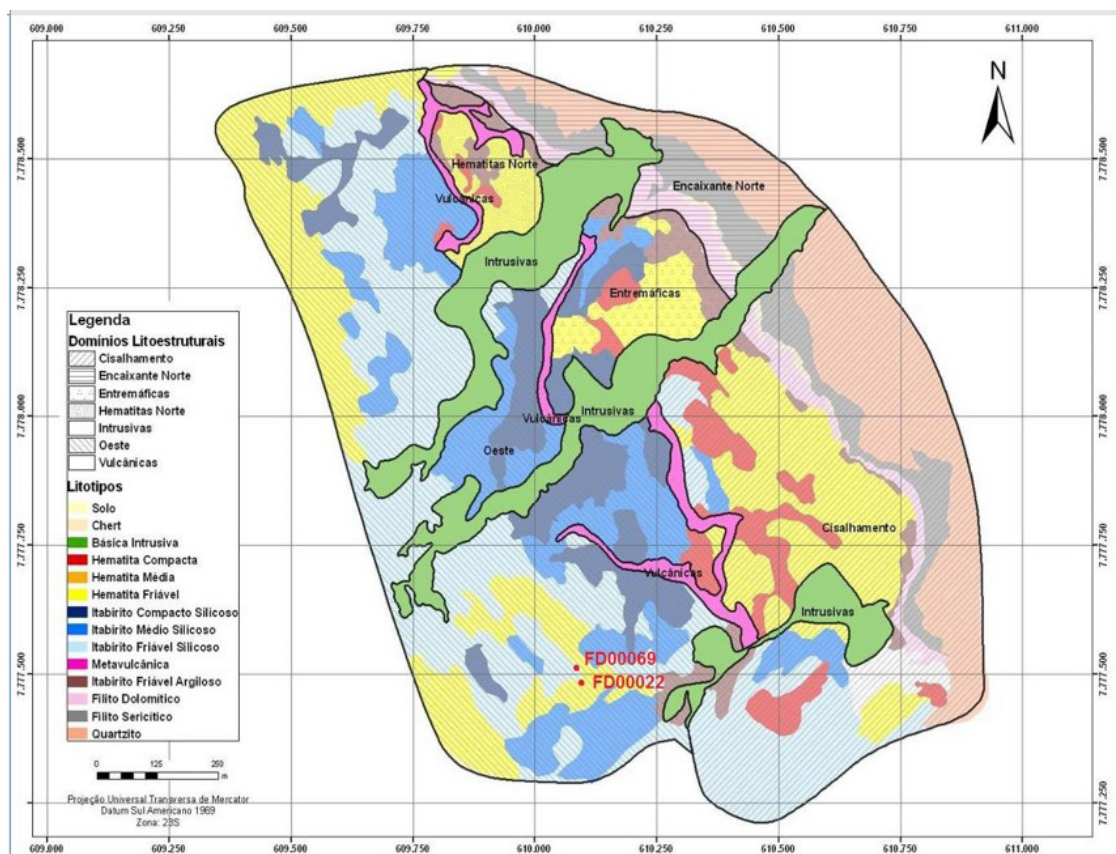


Figura 6. Representação da Mina Tamanduá. Os furos televisionados encontram-se no Domínio Oeste e entre os Subdomínios de Hematita Friável e Itabirito Friável Silicoso.

Fonte: ?

4.1 Estereogramas das feições observadas

Mina Gongo Soco

Com base nas imagens de OTV, foram confeccionados estereogramas, consistindo de bandamentos e fraturas marcadas nestas. No furo GSOFG00023, foi possível obter, contabilizando-se todas as estruturas visíveis nas imagens, um total de 86 marcações. Os furos GSOFG00025 e GSOFG00027 contabilizaram 101 marcações e 14 marcações, respectivamente. Considerando as estruturas visíveis nos 3 furos, obteve-se um total de 201 marcações. A título de comparação, vale salientar que a quantidade de dados adquiridos em levantamentos de superfície feitos em Gongo Soco para a realização das análises foi de aproximadamente 1300 pontos, os quais foram usados para definir as estruturas principais da mina.

Comparando-se os estereogramas gerados pela análise de dados de OTV com os dados de

levantamentos de superfície gerados em Anon. (2008) para bandamento e foliação (estruturas principais), pode-se notar boa semelhança visual entre os mesmos (ver Figura 7). Tem-se então um forte indicativo de que as estruturas observadas nos levantamentos em superfície se repetem em profundidade, sendo esta uma informação importante buscada na análise de imagens de OTV.

Pode-se perceber, na Figura 7, que a soma das marcações dos três furos em apenas um estereograma revela grande semelhança com as estruturas principais apontadas em Anon. (2008), em especial com a *dip direction* da foliação. Ainda que nas marcações de estruturas realizadas nas imagens de OTV não seja possível discernir entre as estruturas Bandamento e Foliação, apenas podendo-se diferenciar fraturas das outras estruturas, pode-se afirmar que as estruturas demarcadas nas imagens tendem a indicar diretamente a presença e continuidade das estruturas principais no interior dos taludes.

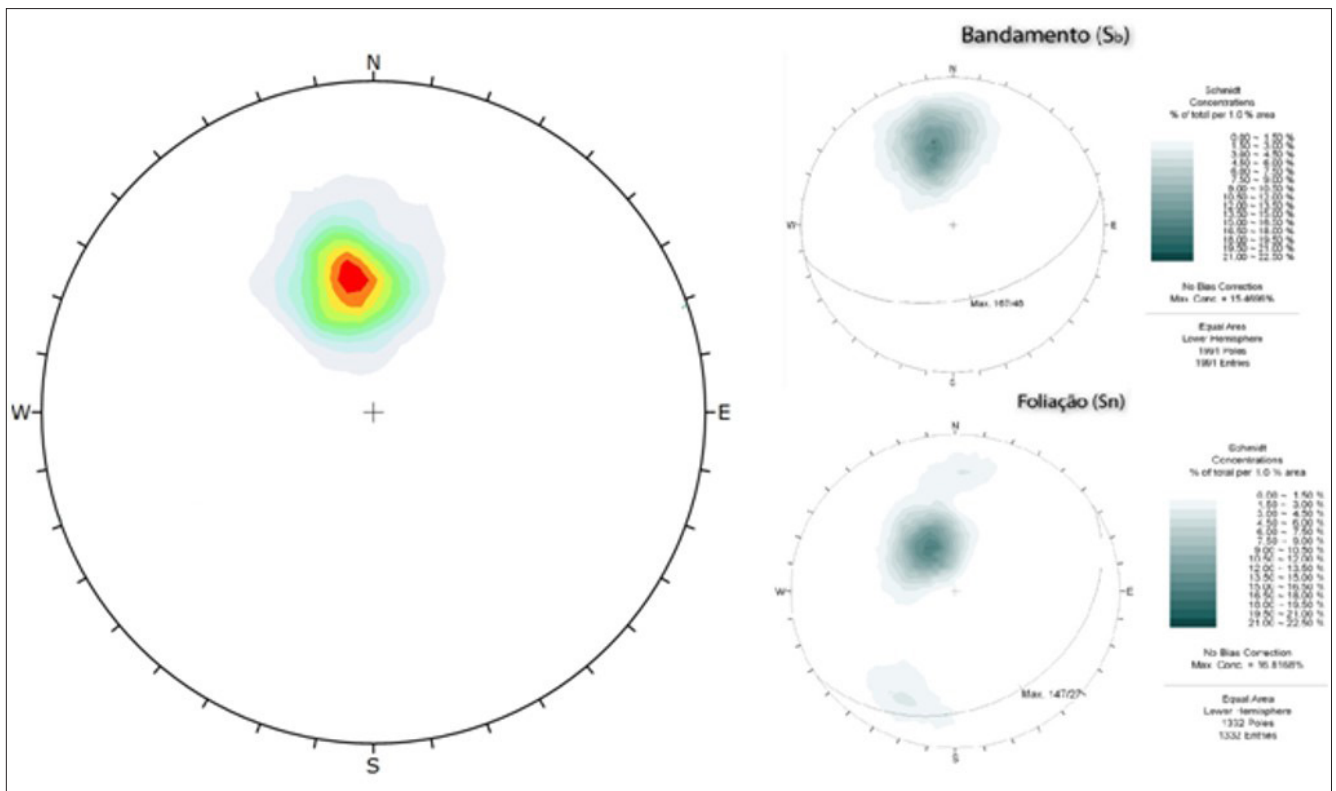


Figura 7. Estereograma mostrando os dados obtidos por OTV (à esquerda) e as duas estruturas principais na Mina Gongo Soco (à direita).

Fonte: ?

Mina Tamanduá

Para a Mina do Tamanduá, ao se comparar os estereogramas gerados em Anon. (2008) das estruturas principais e os estereogramas gerados pela análise de imagens de OTV, nota-se uma boa semelhança visual estes (Figura 8). Para comparação, a quantidade de dados adquiridos em Anon. (2012) para a realização das análises dos levantamentos de superfície foi de mais de 1500 pontos, definindo assim quais são as estruturas principais da Mina do Tamanduá. Por outro lado, no furo TAMFD00022 conseguiu-se um total de 31 marcações com OTV, contabilizando todos os tipos de estruturas, e para o furo TAMFD00069 obteve-se

um total de 71 marcações. Somando os dois furos, chega-se a um total de 102 marcações a partir de OTV.

Percebe-se, na Figura 8, que existem boas semelhanças entre as estruturas marcadas com OTV e as estruturas principais apontadas em levantamentos de superfície (Anon., 2004 e 2012), em especial quanto ao *dip/dip direction* do acamada-mento. Como frisado anteriormente, as imagens de OTV não permitem discernir entre as estruturas acamada-mento (S_0), bandamento (S_b) e foliação (S_n), mas pode-se afirmar que tais estruturas tendem a produzir fraturas, as quais por sua vez tendem a ser visíveis nas imagens de OTV.

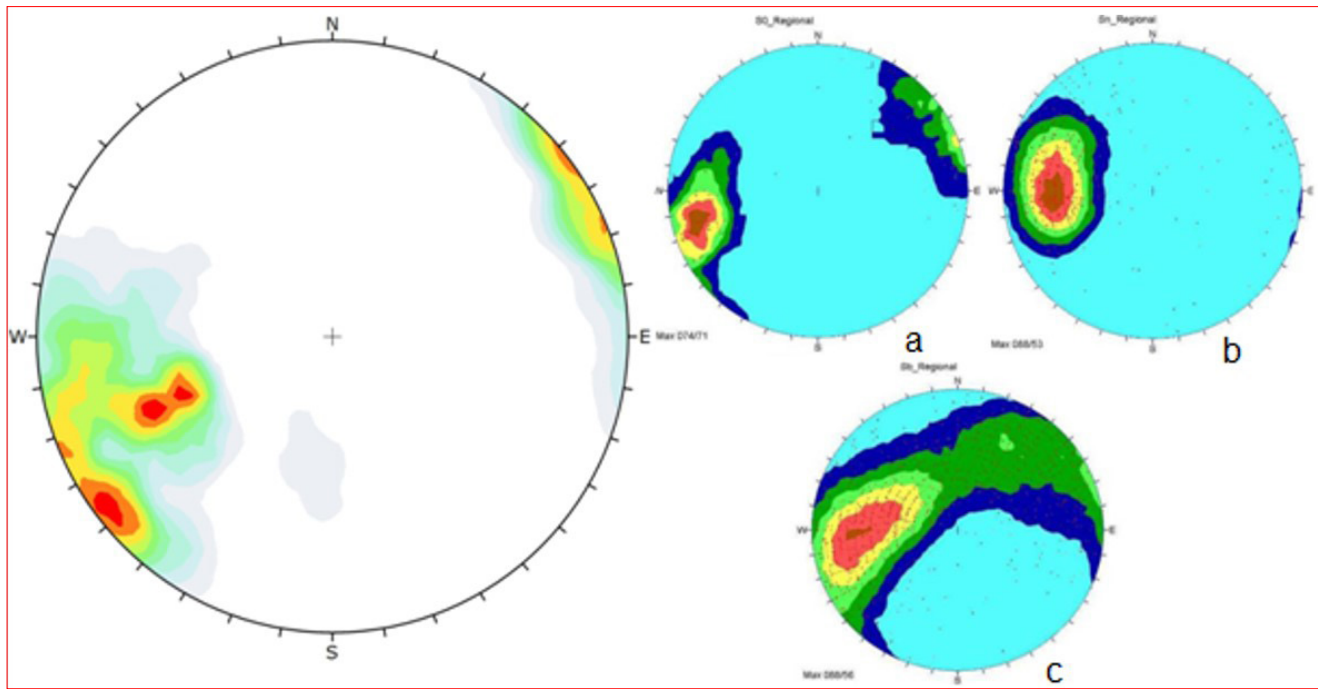


Figura 8. Estereogramas mostrando os dados obtidos por OTV (à esquerda) e as três estruturas principais na Mina do Tamanduá (à direita). Legenda: a - Acamadamento; b - Foliação; c - Bandamento Principal.

Fonte: ?

4.2 Comparação de Análises Cinemáticas

A seguir é feita uma comparação entre os dados cinemáticos obtidos em levantamentos geológicos de superfície nas áreas deste estudo, os quais encontram-se registrados em Anon. (2008) e Anon. (2012), e os dados processados a partir das imagens geradas por OTV.

As análises cinemáticas em Gongo Soco foram efetuadas nos três domínios nos quais foram executados os furos coletores de imagens de OTV, denominados aqui genericamente de domínios A, B, e C. Na Mina Tamanduá, realizou-se a análise no Domínio Oeste. Em ambos os casos foi utilizada a metodologia de *Markland* (Mah *et al.*, 2004) para análise de rupturas. Os ângulos de atrito utilizados para construção do cone de atrito foram de 25° e 35°, para a Mina Gongo Soco, e 36°

para a Mina do Tamanduá, seguindo os valores usados em Anon. (2008) e Anon. (2012), onde foram analisadas as possibilidades de ocorrência de rupturas planares, em cunha e tombamento, considerando-se todas as estruturas planares levantadas nas minas.

Na Figura 9, a área vermelha corresponde à zona de instabilidade para rupturas em cunha e planar. A área marrom corresponde à zona de instabilidade para tombamentos. Os pontos correspondem às intersecções entre os planos das discontinuidades. Os pontos em verde indicam as intersecções entre planos sem potencial de ruptura e os pontos em vermelho indicam as intersecções entre os planos com potencial de ruptura em cunha. As setas vermelhas indicam as discontinuidades com potencial de ruptura planar (Anon., 2008).

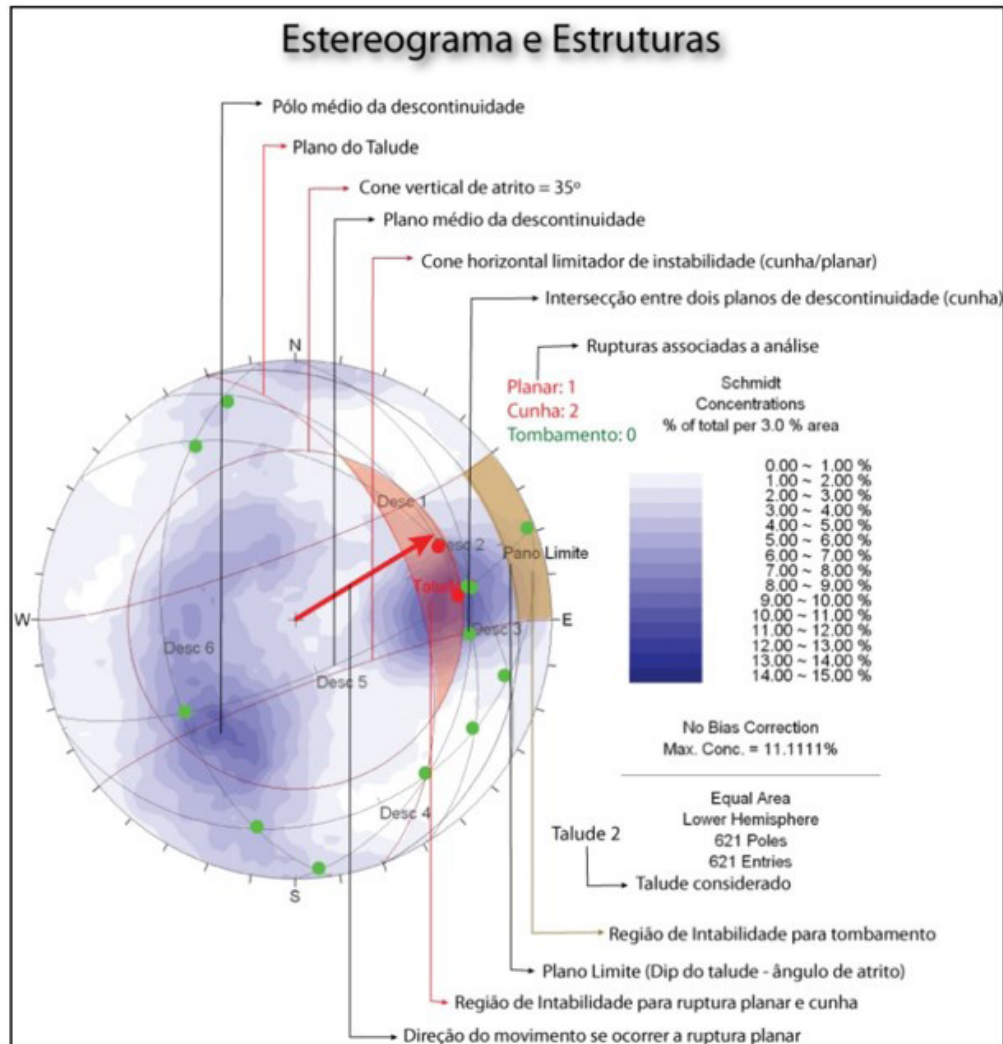


Figura 9. Identificação dos elementos considerados na análise cinemática.

Fonte: Anon., 2008.

Como forma de ilustrar as comparações realizadas entre as análises cinemáticas feitas por Anon. (2008) e as análises derivadas de OTV, para o Furo GSOFG00023 no domínio C da Mina Gongo Soco, segue na Figura 10 as análises cinemáticas feitas por Anon.(2008) e na Figura 11 as análises cinemáticas para o mesmo domínio, feitas pela equipe da UFRGS.

Foram considerados três planos de talude (135/60,180/60 e 220/60). Para os três planos foram realizadas análises para os ângulos de atrito igual a 25° e 35°. O talude 135/60 apresentou

duas situações favoráveis ao desenvolvimento de ruptura planar (para Sb), uma para o ângulo de atrito igual a 25° e outra para o ângulo igual a 35° (Figura 10). A análise para o talude 180/60 para os dois ângulos de atrito, deu favorável ao desenvolvimento de rupturas planares (para Sb) e a rupturas em cunhas (intersecção entre a Sb e Sn+1) (Figura 10). Por último, a análise cinemática para o talude 220/60 deu condições favoráveis ao desenvolvimento de rupturas em cunha para os dois ângulos de atrito (intersecção entre a Sb e Sn+1) (Figura 10).

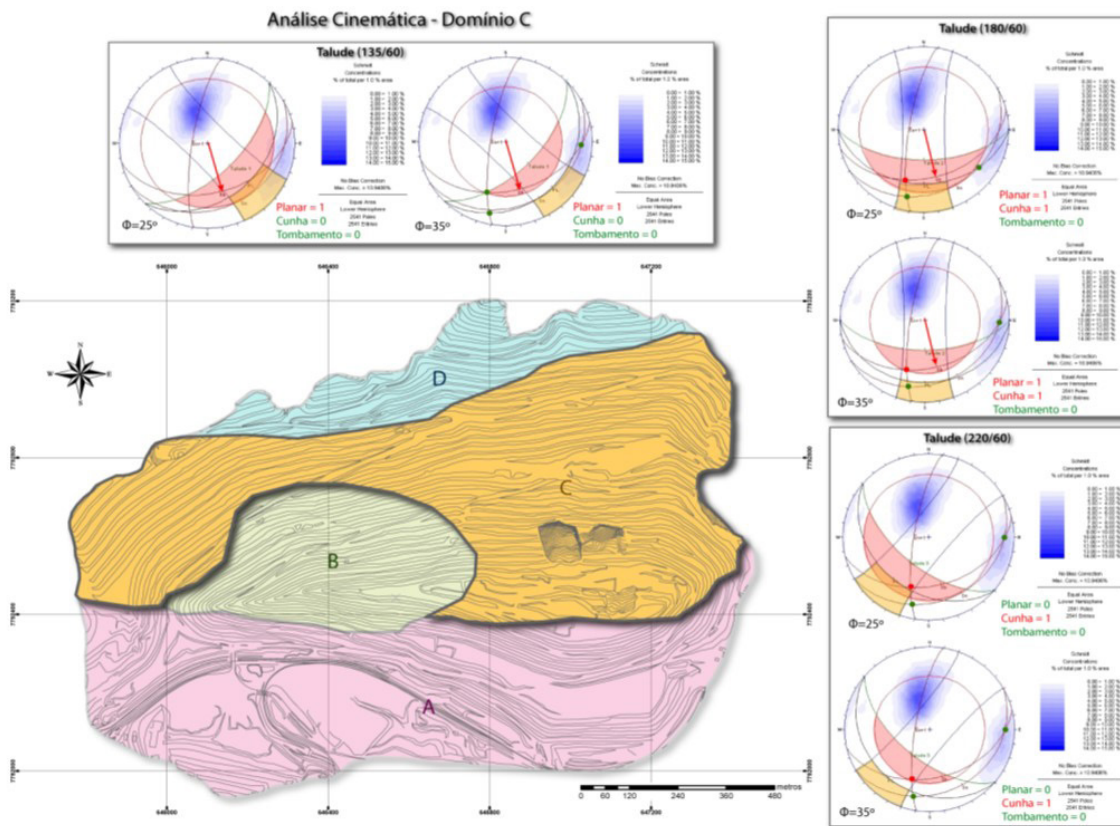


Figura 10. Análise cinemática do Domínio C, de acordo com Anon.(2008).

Fonte: Anon., 2008.

A análise cinemática do Furo GSOFG00023, localizado no domínio C, foi realizada baseada em três planos de talude médios (135°/60°, 180°/60° e 220°/60°). Para os três foram realizadas análises considerando o ângulo de atrito igual a 25° e igual a 35°. Para cada talude médio foram avaliadas as possibilidades de ruptura planar, em cunha, tombamento de deslocamento circular ou de base. São apresentadas a seguir as imagens que se referem à possibilidade mais crítica, ou seja, a maior possibilidade de ruptura dentro os parâmetros com possibilidade de serem controlados (tipo de ruptura e ângulo de atrito).

O talude 135°/60° (Figura 11a) apresenta a probabilidade de deslocamento em cunha, com 36,1% de possibilidade, para um ângulo de atrito de 25°. A análise cinemática para o talude 180°/60° (Figura 11b) foi favorável ao desenvolvimento de ruptura do tipo tombamento (para o Sb) para os dois ângulos de atrito, com a probabilidade de queda atingindo 62,37%, para o ângulo de atrito de 35°. A análise cinemática para o talude 220°/60° (Figura 11c) foi favorável ao desenvolvimento de ruptura do tipo cunha (para o Sb) para os dois ângulos de atrito, com a probabilidade de queda atingindo 28,12% para o ângulo de 25°.

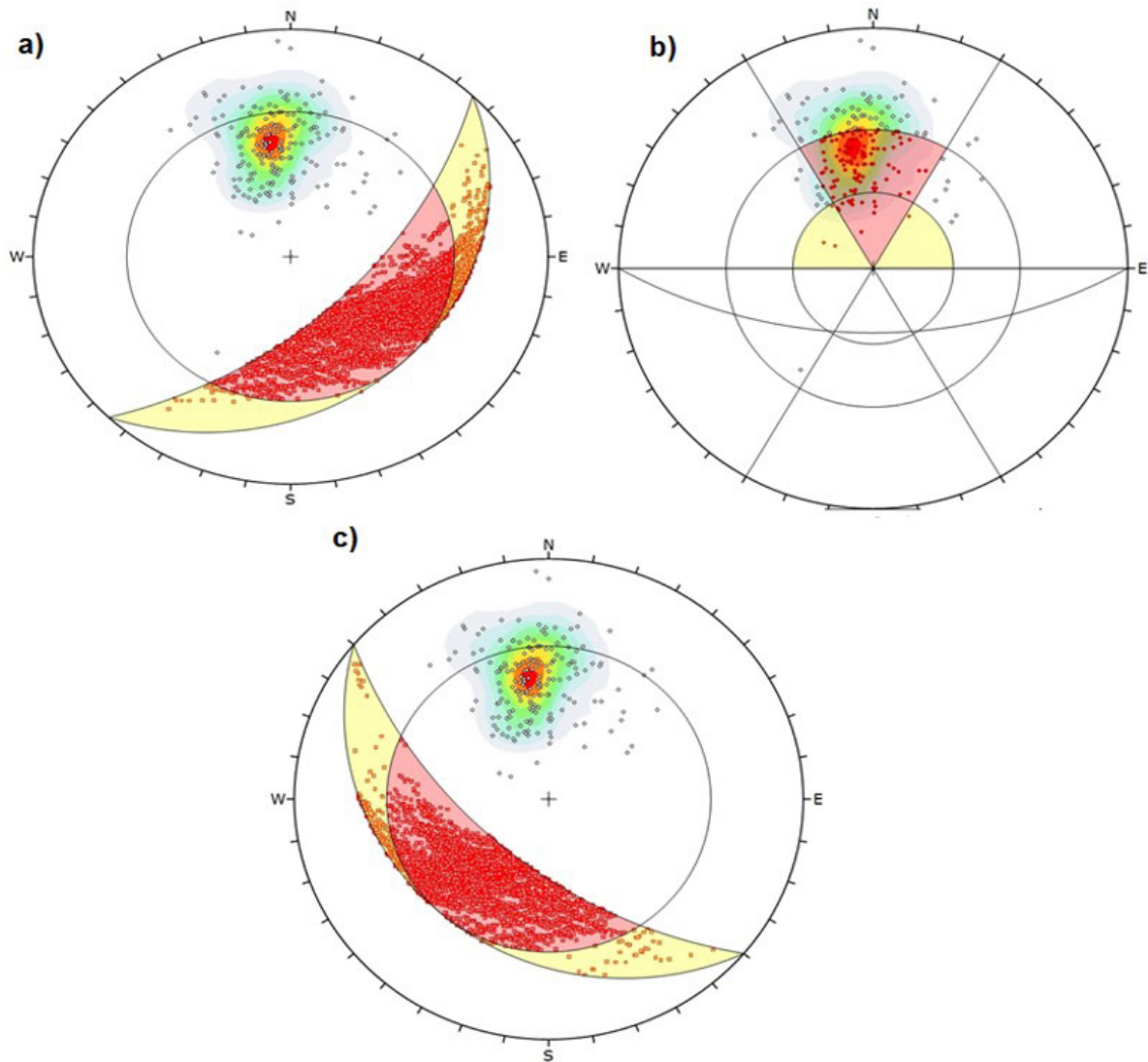


Figura 11. Análises feitas a partir das imagens de OTV. a) Análise cinemática do Domício C, talude médio $135^{\circ}/60^{\circ}$, ângulo de atrito 25° ; b) Análise cinemática do Domício C, talude médio $180^{\circ}/60^{\circ}$, ângulo de atrito 35° ; c) Análise cinemática do Domício C, talude médio $220^{\circ}/60^{\circ}$, ângulo de atrito 25° .

Fonte: Anon., 2008.

A seguir é apresentado um resumo comparativo entre os resultados obtidos com as análises cinemáticas geradas pelas marcações efetuadas nas imagens produzidas pelo televisionamento dos furos e os resultados apresentados em Anon. (2008) e Anon. (2012). As Tabelas 1 e 2 trazem estas comparações. A Tabela 1 retrata as análises e os principais resultados da Mina Gongo Soco, ao passo que a Tabela 2 refere-se aos principais resultados da Mina Tamanduá. Nota-se que a maioria das rupturas apresentadas na análise realizada com OTV indica para a possibilidade de tombamento. Esta diferença entre resultados pode levar

a uma conclusão precipitada de que os resultados apresentados pela análise de campo e a análise de dados gerados pela sonda podem não ser compatíveis. Comparando os estereogramas gerados em Anon. (2008 e 2012) com as respectivas estruturas principais e os estereogramas gerados pela análise de dados do OTV pode-se notar uma semelhança visual entre os estereogramas.

Mesmo que não seja possível diferenciar os tipos de estruturas marcadas nas imagens geradas pelo OTV, é possível sim afirmar que estas marcações estão compreendidas nas estruturas principais, pela comparação entre estereogramas.

Tabela 1. Análise comparativa entre resultados OTV e levantamentos de superfície (Anon., 2008) na Mina Gongo Soco.

FURO	DOMÍNIO	TALUDE	ANGULO DE ATRITO	TIPO DE RUPTURA - OTV	TIPO DE RUPTURA - Levant. superfície
GSO00023	Domínio C	135/60	25	Cunha	Planar
			35	Tombamento	Planar
		180/60	25	Tombamento	Planar e Cunha
			35	Tombamento	Planar e Cunha
		220/60	25	Cunha	Cunha
			35	Cunha	Cunha
GSO00025	Domínio B	020/60	25	Tombamento	Sem Possibilidades
			35	Tombamento	Sem Possibilidades
		150/60	25	Tombamento	Planar e Cunha
			35	Tombamento	Planar
		295/60	25	Tombamento	Sem Possibilidades
			35	Tombamento	Sem Possibilidades
GSO00027	Domínio A	350/60	25	Tombamento	Tombamento
			35	Tombamento	Tombamento

Tabela 2. Análise comparativa entre resultados OTV e Anon. (2012): possibilidades de rupturas para cada talude no Domínio Oeste (entre parenteses a segunda maior probabilidade), Subdomínio Itabirito Friável. Mina Tamanduá.

Talude	Anon. (2012)	OTV - FUIROS 22 e 69
14	Sem possibilidades	Tombamento
15	Sem possibilidades	Tombamento
19	Planar e Cunha (duas possibilidades para cada)	Cunha
20	Planar e Cunha	Tombamento (Cunha)
21	Cunha (duas possibilidades)	Tombamento
23	Cunha (duas possibilidades)	Tombamento (Cunha)
26	Planar e Cunha (duas possibilidades para cada)	Tombamento (Cunha)
30	Planar e Cunha (duas possibilidades para cada)	Tombamento (Cunha)

4.3 Declinação Magnética

Durante a aquisição de dados de OTV, o posicionamento das imagens apresentadas é orientado de acordo com o norte magnético da Terra, em função do uso de magnetômetros para a orientação da sonda. Conforme Oliveira (2015), a aquisição das imagens pode ser realizada considerando-se o norte magnético, e apenas no processamento delas é adicionada a declinação magnética, de

modo a obter-se a orientação final com relação ao norte geográfico. Esta sistemática foi seguida no presente caso. Desta forma, após a marcação das estruturas geológicas nas imagens, a correção da declinação magnética foi realizada no *dip direction* das estruturas descontando-se a diferença entre o eixo magnético, medido pela sonda, e o eixo do norte verdadeiro das mesmas. A declinação magnética assumida aqui foi de 23,5°.

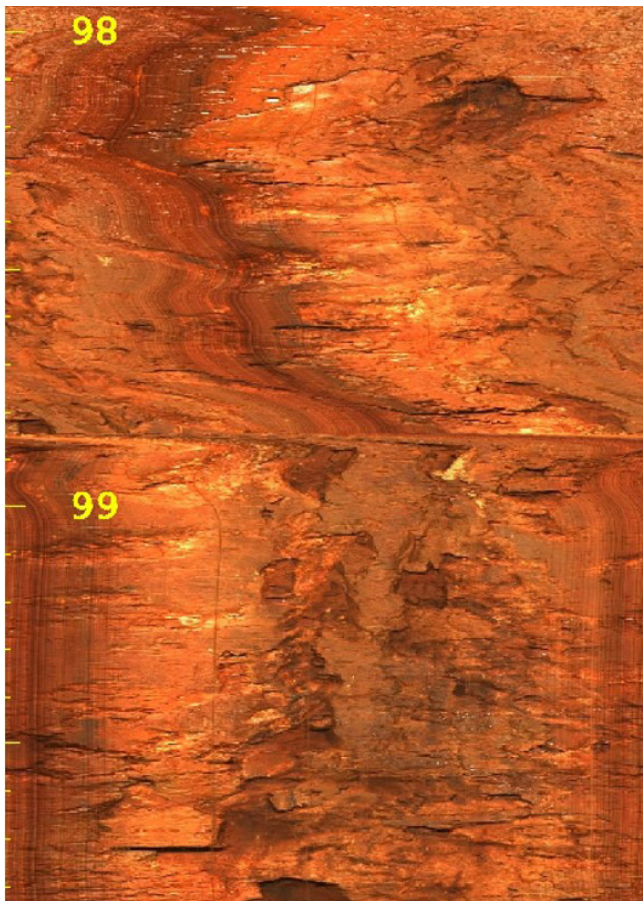


Figura 12. Imagem de OTV mostrando, entre 98 e 99 metros de profundidade, a influência de material magnético na leitura. A partir de 99 metros, essa influência desaparece, permitindo a melhor análise da imagem.

Fonte: ?

Na aquisição de dados, a equipe usou uma sonda de susceptibilidade magnética para apontar possíveis zonas de distorções nas imagens pela presença de minerais de alta susceptibilidade magnética (magnetita, essencialmente). Nos trechos onde a influência magnética foi percebida, os valores máximos e mínimos de susceptibilidade ficaram entre 0,009 e 0,046 (sistema cgs de unidades), e foram considerados dentro do esperado para as litologias investigadas (Dearing, 1999). A análise visual das imagens da sonda OTV mostrou que em nenhum dos furos houve grandes distorções causadas pelo magnetismo das rochas. Apenas em alguns trechos de pequeno comprimento (poucos metros) nos furos de sondagem, percebeu-se a influência de minerais magnéticos (Figura 13), os quais não tiveram interferência nos resultados gerais.

5 CONCLUSÕES

Este estudo permite afirmar que é possível retirar informações úteis sobre a geologia estrutural e aspectos geotécnicos de um maciço rochoso via imagens de OTV. Reitera-se o potencial do OTV como uma ferramenta de apoio, mas não um substituto para a sondagem testemunhada, consistindo em um importante aliado na obtenção de informações não visíveis em amostras diretas. É importante ressaltar também o benefício oferecido pelo OTV em termos do posicionamento de estruturas geológicas. Fazendo um tratamento cuidadoso das imagens, pode-se orientar as estruturas com mais segurança que a sondagem orientada. O azimute de discontinuidades e outras estruturas ficam mais próximas do valor verdadeiro quando estimadas por OTV. Desta forma, é totalmente viável a produção de estereogramas com as estruturas marcadas nas imagens, os quais terão grande semelhança com estereogramas gerados a partir de levantamentos de campo efetuados em superfície ou sondagens orientadas, conforme apresentado no tópico 4 (figuras 8 e 9).

Outro ponto de discussão são as possíveis influências de materiais com alta susceptibilidade magnética sobre as imagens. Observando-se o fato de que a sonda OTV utiliza magnetômetros para marcar seu geoposicionamento, a presença de material magnético pode influenciar neste posicionamento e gerar distorções nas imagens produzidas. Durante a aquisição e processamento de dados verificaram-se poucas situações de distorção. Como é apresentado no tópico 4.3, no presente caso não foram encontrados materiais com susceptibilidade suficientemente alta para produzir distorções nas imagens de modo a interferir nas análises.

Embora o uso do televisionamento de furos introduza alguns cuidados operacionais que tendem a tornar mais lenta a atividade de sondagem (p.ex. limpeza do furo, tratamento do fluido com floculante, etc.), acredita-se que a utilização do OTV pode ser valiosa na aquisição de informações geológico-geotécnicas em empreendimentos de mineração em locais como o Quadrilátero Ferrífero-MG.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem fortemente à empresa VALE S.A. pelo suporte disponibilizado para a execução deste estudo.

REFERÊNCIAS

- ANON., **Mapeamento Lito-Estrutural e Geomecânico da Mina Gongo Soco**, BVP-Engenharia, Mina Gongo Soco - VALE, 2008.
- ANON., **Avaliação Geotécnica da Geometria dos Taludes das Cavas Finais das Minas DIFL, Avaliação Geotécnica da Cava Final da Mina Tamanduá**, BVP-Engenharia, 2012.
- BAILLOT, R. T., **TELEVISAMENTO 360° DAS PAREDES DE FUROS DE SONDAGEM**, Empresa Alpageos, Divulgação Técnica, 2012.
- BAILLOT, R.T., Colas, R., Barton, N., Abrahão, R. e Ribeiro Júnior, A. **Comparing 360° Televising of Drill Hole Walls with Core Logging**. Proc. International Site Investigation Conf, Portugal. 2004.
- BLAKE, J.R., **Application of borehole imagery in iron ore: examples from Mount Whaleback**, Western Australia. Applied Earth Science (Trans. Inst. Min. Metall. B), VOL 119, NO 3. 2010.
- CHUNG, M.C., HSU, S.M., KU, C.Y., TAN, C.H., CHI, S.Y.; **Geotechnical Engineering Research Center, Sinotech Engineering Consultants, Inc.**, Taipei, Taiwan. 2008.
- DEARING, J., **Environmental Magnetic Susceptibility: A Guide to Using Bartington MS2 System**. 1999.
- FREDRICK, F., Nguyen, T., Seymour, C., Dempers, G., **Geotechnical data from optical and acoustic televiewer surveys**. The AusIMM Bulletin - Journal of the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, n.5, October. 2014.
- GWYNN, X.P.; BROWN, M.C.; MOHR, P.J.; Combined use of Tradicional Core Logging and Televiewer Imaging for Pratical Geotechnical data Collection, SRK Consulting (UK) LTD, United Kingdom, September 2013.
- MAH, C. W. e Wyllie, D.C., **Rock slope engineering: civil and mining**. 4th ed, 2004.
- MILLOY, Sophie F., McLean Katie e McNamara David D., **Comparing Borehole Televiewer Logs with Continuous Core: An Example from New Zealand**, Proceedings World Geothermal Congress, Australia, 2015.
- OLIVEIRA, D.G.G., **Televisamento óptico de sondagens - proposta metodológica para execução e suas aplicações em obras subterrâneas**, Dissertação - IGc/USP, São Paulo, 2015.
- ROBERTSON GEOLOGGING, **OPTV USER MANUAL**, 2014.
- THOMAS, R.D.H.; NEILSEN, J.M.; WILSON, H.F.; LAMB,P.; **Structural Interpretation from Televiewers Surveys**, Australian Centre for Geomechanics, Perth, Australia, 2015.

SEÇÃO ESPECIAL –
60 ANOS DO COMITÊ
BRASILEIRO DE BARRAGENS

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS 60 ANOS

DELFINO LUIZ GOUVEIA GAMBETTI

Presidente da ABGE,
presidencia@abge.org.br

A História do Comitê Brasileiro de Barragens- CBDB iniciou-se em 1961, quando a população brasileira era de quase 75 milhões de habitantes, mesmo ano do primeiro homem ao espaço (Yuri Gagarin), Construção do Muro de Berlin em uma única noite, e lançamento da música Stand By Me que fez e faz o maior sucesso até hoje, assim como o CBDB.

As histórias do CBDB e da Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental – ABGE são muito parecidas e parelhas. Temos apenas 7 anos de diferença de origem ou nascimento.

Se fossemos uma família, seríamos irmãos bem próximos com anseios e atitudes semelhantes. Foi o que ocorreu.

Talvez em algum momento desta jornada nos distanciamos, mas sempre fomos irmãos e de vez em quando reunimos a família e discutimos nossos problemas, um ajudando o outro, mas também nos confraternizamos e nos divertimos.

Posso cometer alguma injustiça quando se cita nomes, mas sintam-se todos homenageados além dos que citarei aqui.

Nos nossos 50 anos, em São Paulo, o CBDB esteve presente através do Carlos Henrique Medeiros, na época presidente, sempre interagindo conosco, até porque hoje ele continua sendo nosso representante do Nordeste.

Acredito que o Marcos Vasconcelos, nosso querido Marcão, pelo menos no período que estive mais presente no Comitê foi uma das pessoas que mais interagiu com as duas entidades. O Marcão sempre atuou na ABGE e no CBDB, assim como eu também convivi com as duas entidades, em épocas intervaladas, motivado por compromissos profissionais.

No Congresso de Salvador em 2003, onde caiu uma tempestade quase impedindo o Coque-

tel de Confraternização, o Mendes, meu amigo, na época na CPFL, me indicou que eu seria convidado para um trabalho, e graças a ele, ao Godoy e porque não, ao CBDB, fui inserido no segmento das SPES. Fui para Barra Grande, o que me abriu portas para as demais grandes obras, neste formato, que participei. Já em 2008, também através de conhecimento obtido nos congressos e eventos do CBDB, meu nome foi lembrado, pelos meus grandes amigos Manuel Freitas e Nelson Caproni para fazer parte da Usina de Santo Antônio, no Rio Madeira, sem dúvida um dos mais gloriosos trabalhos que desenvolvi na minha carreira profissional.

Portanto lógico que devo algo ao CBDB, amigos como o Pierri, Cassio Viotti, Erton Carvalho, Joaquim Pimenta e Dra. Aparecida não se consegue gratuitamente. Convivemos com ótimos profissionais desta Associação principalmente no entorno de 1994.

Estive presente quando o Comitê Brasileiro de Grandes Barragens mudou o nome para Comitê Brasileiro de Barragens, incorporando assim a importância que se avizinhava das médias e Pequenas Centrais Hidroelétricas.

Eu estava no primeiro Simpósio de Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas em Poços de Caldas, ajudando efetivamente na organização.

Nesta época também estive na ABGE e fizemos o 8ºCBGE no Rio de Janeiro, na sede da Petrobras, onde o CBDB participou ativamente, ajudando a viabilizar o evento, onde novamente o Marcão atuou neste sentido de forma competente e amiga.

Época de muita felicidade para mim, por poder entre outras coisas desenvolver este trabalho conjunto entre o CBDB e a ABGE.

Estou falando apenas do período pós 1990, ou seja, pouco mais de 30 anos, mas foram os que eu vivi, portanto foram fatos que eu vivenciei e ajudei a incorporar na história das duas entidades.

História é isso, lembrança e emoção. Meu amigo João Jerônimo Monticelli quem diz: “Quando fores escrever algo sobre entidades em que trabalhou e pessoas não se envergonhe de colocar a emoção nas suas palavras”, e é o que estou fazendo nesta narrativa.

Dedicação, carinho, empenho, de muitos profissionais ao longo destes 60 anos do CBDB, desde a sua criação com seu primeiro Presidente Antonio Alves de Noronha em 25 de Outubro de 1961 e já em 24 de Janeiro de 1962 com o Flavio Lyra, até os dias atuais com o José Bernardino Botelho é que mantém ativa e atuante esta entidade sempre com eficiência e eficácia.

Não pensem que é fácil. Os presidentes do CBDB e seus diretores, assim como os Núcleos, que tem uma grande semelhança com a Estrutura Organizacional da ABGE, têm que trabalhar duro, sempre deixando de lado seus interesses pessoais, de maneira extremamente filantrópica para que estas entidades estejam atuantes e amigas.

A tentativa de realização de eventos conjuntos, troca de informações, sempre esquecendo o negacionismo, trabalhando dia a dia, tentando nos unir quando possível e sempre valorizando nossos profissionais são as marcas destes voluntários que comandam estas associações e por elas trabalham.

Sem dúvida nossos associados são os melhores na área de Barragens e na de Geologia de Engenharia e Ambiental.

Quando da formação destas entidades e até a quase trinta anos atrás, a nossa dependência de

consultoria externa era muito grande. Atualmente não dependemos tanto de consultores estrangeiros pois nós somos, com raras exceções, auto suficientes nestas atividades afins. Nosso relacionamento com a área de Arquitetura foi um aprendizado. Os barrageiros tinham como foco principal e quase único a construção de “sua barragem” e, portanto, estas disciplinas que foram pouco a pouco interagindo conosco tiveram que ser capazes de nos moldar aos novos tempos. Na CESP, a área de arquitetura era muito forte e atuante e muito nos ajudou nesta formação de convivência com outras disciplinas que não a Engenharia. Assim também ocorreu com a Geologia de Engenharia e também com o Meio Ambiente. Aspectos Sociais destas grandes obras foram e estão sendo cada vez mais inseridas quando dos seus planejamentos iniciais, assim como a questão da segurança dos trabalhadores.

Esta RBGE enaltece a competência de todos os colaboradores do CBDB, que com menor ou maior dedicação fizeram que existisse, sempre competentemente no que se propunham a realizar esses 60 anos de CBDB, independentemente das dificuldades sazonais ao longo deste período glorioso.

Este é o espírito que norteia nossas associações. Tempos difíceis, decisões difíceis, mas sempre com alegria, felicidade e agradecimento a todos que se foram e todos que continuam, dia a dia, trabalhando arduamente para engrandecer as entidades e principalmente os seus profissionais.

VIVA OS 60 ANOS DO COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS E DE TODOS OS PROFISSIONAIS QUE FIZERAM COM QUE ISTO PUDESSE ACONTECER. PARABÉNS COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS.

PALAVRAS DO PRESIDENTE DO CBDB

JOSÉ BERNARDINO BOTELHO

*Presidente do CBDB,
presidente@cdbd.org.br*

Recebi com grande satisfação o convite formulado pelo Geol. Erik, amigo de longa data, para juntamente com o Eng° Delfino Gambetti, fazermos um Editorial alusivo à Comemoração dos 60 Anos de Fundação do Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB).

Delfino lembra de acontecimentos que marcaram indelevelmente a história mundial, pois lembrou do primeiro homem lançado no espaço, o russo Yuri Gagarin, o Muro de Berlim, além da música Stand By me.

Acrescentaria mais alguns, porém domésticos, que também tiveram grandes repercussões entre nós, quais sejam: o cumprimento do Plano de Metas do Presidente Juscelino Kubitschek de Oliveira concretizado por Três Marias, Complexo Paulo Afonso, Furnas e Jupuíá, a construção e mudança da nova Capital do País, Brasília, hoje patrimônio histórico Universal e em decorrência a interiorização do desenvolvimento do País no sentido centro e oeste brasileiros, hoje um dos maiores polos da agroindústria do mundo, além de importantes rodovias que permitiram e ainda permitem a circulação de grande parte dos bens de consumo produzidos no país.

De fato, CBDB e ABGE são duas instituições co-irmãs que trabalham juntas em prol do desenvolvimento da infraestrutura do País. A ABGE cuja maioria dos seus associados é constituída de geólogos e geotécnicos trabalha com o necessário suporte à construção da grande maioria das obras de infraestrutura implantadas no País.

Nossa missão de divulgar e desenvolver tecnologias ligadas ao planejamento, elaboração de projetos de engenharia, construção, operação, monitoramento e manutenção de Barragens se confunde. As questões relacionadas aos aspectos geomecânicos na implantação de projetos e

construção de Barragens e obras conexas passam sempre pelo suporte técnico dos geólogos e geotécnicos.

O CBDB, para cumprir sua missão, depende diretamente de suporte técnico de instituições como a ABGE, ABMS, ABRH dentre outras, sem o qual não levaríamos avante a missão que foi concebida e que rigorosamente têm sido cumprida desde sua fundação.

Para comemorar esta importante data, o CBDB promove uma série de eventos ao longo de 2021, dentre os quais a realização de 12 Cursos, 5 Eventos Especiais e o Evento Principal que será levado a feito na última semana de outubro que conta como 3° Simpósio Internacional de Segurança de Barragens de Rejeitos, Simpósio de P&D, XXXIII Seminário Nacional de Grandes Barragens e Simpósio de Acidentes e Incidentes em Barragens.

Convidamos aos associados da ABGE a participarem dos nossos eventos haja vista a grande interação existente nos diversos temas que estão sendo e ainda serão apresentados e discutidos sempre no sentido do desenvolvimento de tecnologias ligadas à implantação de Barragens.

A continuidade do intercâmbio entre o CBDB e a ABGE, proposta há muito praticada e com muito sucesso, é tarefa que temos que levar adiante, haja vista os bons frutos até então colhidos.

Agradecemos a distinção a nós dedicada com a Edição da Revista que mostra o trabalho realizado por abnegados profissionais que estiveram a frente de nossa instituição.

Obrigado

HISTÓRIA DAS USINAS HIDRELÉTRICAS

GERALDO MAGELA PEREIRA
 Universidade de Brasília, DF, Brasil.
 magela2909@gmail.com

O presente trabalho apresenta um resumo sobre a história das usinas hidrelétricas, extraído do livro Projeto de Usinas Hidrelétricas Passo a Passo¹ do autor (2015), o qual foi elaborado com o intuito de preencher uma lacuna existente no assunto.

Apesar de a Terra e o sistema solar terem se originado há 4,6 bilhões de anos, foi somente durante o período Quaternário, época do Holoceno, há cerca de 10 mil anos, que os seres humanos desenvolveram a agricultura de subsistência. Nós passamos a maior parte de nossa história como caçadores e coletores de alimentos.

Apenas nos últimos 9.000 a 10.000 anos, nossa espécie descobriu como plantar e dominar animais. Tais mudanças provavelmente ocorreram nas colinas da Síria e do Iraque dos dias atuais.

As barragens têm servido aos povos por pelo menos 5.000 anos, como atestam as ruínas de obras pré-históricas de irrigação na Mesopotâmia, no Egito, Índia, Pérsia e no Extremo Oriente (Jansen, 1983²). O Quadro 1 apresenta uma cronologia do conhecimento da água.

A história remota das barragens não é bem conhecida. Muitas datas antes de 1.000 a.C. podem ser apenas estimadas. Isto é particularmente verdade no Egito antigo, cuja cronologia peculiar, às vezes, lança apenas uma fraca luz em muitas dinastias e suas realizações de engenharia.

Ruínas de obras antigas na Índia e Sri Lanka (antigo Ceilão) oferecem alguma evidência de como os reservatórios de água foram criados pelas civilizações antigas. Um dos métodos comuns de construção envolvia as barreiras de terra atra-

vés dos rios. Alguns dos lagos formados ocupavam vastas áreas.

Quadro 1. Cronologia de conhecimento a respeito da água antes da era cristã (Mays, 1999³).

Período	Tipo de Uso
Pré-histórico	Minas de água, fontes naturais.
III a II milênio a.C.	Barragens, Cisternas e Poços.
II milênio a.C.	Suprimento de água por gravidade: canais e condutos.
Século VIII a VI a.C.	Linhas longas de abastecimento de água com túneis e pontes, bem como intervenções para aproveitamentos de água cárstica.
Século VI a.C.	Banheiros públicos: banheiras, chuveiros, latrinas, lavanderias. Uso definitivo de dois ou três tipos de qualidade de água: potável, sub potável e não potável, incluindo uso para irrigação.
Século VI a III a.C.	Tubos pressurizados e sistemas de sifão.

Os materiais de construção eram transportados em cestas ou outros recipientes. A compactação era realizada pelo pisotear dos pés dos transportadores. Até hoje, em alguns países onde os custos do trabalho são relativamente baixos, esse método é usado. Os construtores antigos fizeram uso livre de solos e cascalhos. Como eles só tinham um leve conhecimento da mecânica dos materiais e dos escoamentos das cheias, seus métodos eram ao acaso, e frequentemente, suas obras ruíam.

No Egito antigo, a construção de canais foi o maior esforço dos faraós. Os primeiros deveres dos governadores das províncias eram a escavação e o reparo de canais, os quais eram usados para irrigar grandes extensões de terras nas épocas de cheia do rio Nilo. A terra foi retalhada

1 Pereira, Geraldo M. - Projeto de usinas hidrelétricas - Passo a passo. Oficina de Textos, 2015

2 Jansen, Robert B. - Dams and public safety. US Department of the Interior. Bureau of Reclamation, 1983

3 Mays, Larry W. - Water distribution system handbook. McGraw-Hill Education, 1999

com pequenas bacias através de um sistema de diques.

Como reportado por Jansen (*op cit*), um dos registros mais antigos de obras de engenharia é o relativo à fundação da cidade de Memphis, junto ao rio Nilo, cuja execução pode ser estimada entre 5.700 e 2.700 d.C. O historiador Heródoto atribuiu esta construção à Menés, o primeiro faraó do início da dinastia egípcia. De acordo com algumas interpretações dos registros de Heródoto, Menés construiu uma barragem de alvenaria no rio Nilo, em Kosheish, 20 km a montante do sítio planejado para a capital.

Esta versão, considerada lenda por alguns historiadores, relata que, antes de fundar a capital, Menés desviou o curso do rio Nilo para o lado leste do vale, construindo uma barragem grande junto das colinas líbias, com o propósito de assegurar espaço para a construção da cidade do lado oeste, mais protegido dos ataques dos inimigos.

As quedas d'água têm sido usadas para realizar trabalho há milhares de anos. A ação direta do

jato proveniente de uma queda sobre uma roda d'água, por exemplo, produz energia mecânica. Os romanos já conheciam esses dispositivos desde o século I a.C.

No entanto, as rodas só passaram a ser usadas extensivamente a partir do século XIV em trabalhos de moagem, nas serrarias e para a alimentação de fábricas têxteis, dentre outras utilizações. Ao final do século XVIII, existiam aproximadamente 10.000 rodas d'água na Inglaterra.

Durante os séculos XVIII e XIX, com o surgimento de tecnologias como a máquina a vapor, o motor, o dínamo, a lâmpada e a turbina hidráulica, tornou-se possível converter a energia mecânica em energia elétrica. Moinhos e fábricas eram construídos juntos aos sítios das hidrelétricas visando-se utilizar diretamente a energia disponível. A potência dessas primeiras usinas, limitada a 100 kW (134 CV), é comparada na figura abaixo com as de outras fontes de energia no período entre 1700 e 1970.

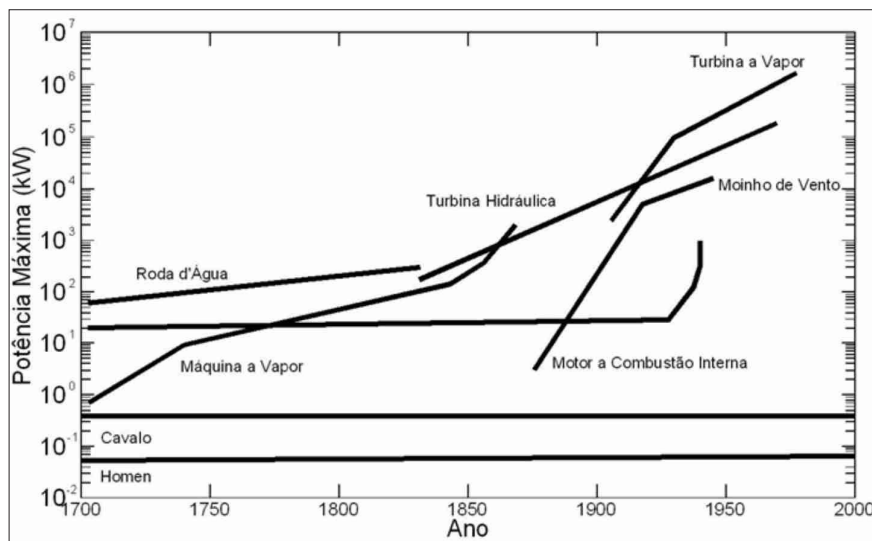


Figura 1. Potências máximas de máquinas selecionadas no período de 1700 a 1970.

Fonte: Gulliver e Arndt, 1991⁴.

4 Gulliver, John S., Arndt, Roger, E.A. – Hydropower Engineering Handbook. McGraw-Hill, 1991

No Brasil, a primeira usina hidrelétrica entrou em operação em 1883. Ela foi construída no ribeirão do Inferno, afluente do rio Jequitinhonha, na cidade de Diamantina (MG). Foi instalada numa queda de 5 m e possuía dois dínamos Gramme de 8 HP cada, que geravam energia capaz de movimentar bombas d'água para desmonte das formações rochosas das minas de diamante. Mais tarde, a usina passou a gerar energia para abastecimento da cidade. A linha de transmissão associada tinha 2 km de extensão.

Em 1887, foi colocada em operação no rio Macacos, Nova Lima, Minas Gerais, uma usina de 500 HP, sob uma queda de 40 m, para atender a uma mineração de ouro e para iluminação.

Dois anos depois, em 1889, entrou em operação a Usina Marmelos Zero no rio Piabanha, Minas Gerais, (Figs. 2 e 3), da Companhia Mineira de Eletricidade. Foram instalados dois grupos de geradores com potência de 126 kW cada um, da empresa americana Max Nothman & Co, para fornecimento de energia para Juiz de Fora. Em 1891 foi instalado um terceiro gerador, de 125 kW, para fins industriais.



Figura 2. Usina Marmelos Zero. Vista aérea do reservatório com a BR-040 à direita.



Figura 3. Usina Marmelos Zero. Vista geral de jusante para montante com casa de força em primeiro plano e barramento vertente ao fundo.



Figura 4. Usina Marmelos Zero. Detalhe do barramento vertente.

Na virada para o século XX, a Light Serviços de Eletricidade S.A. foi fundada em 30 de maio de 1905, no Rio de Janeiro, com a tarefa de implantar o desenvolvimento da engenharia de barragens e colocar usinas hidrelétricas em funcionamento no Brasil. A ilustração abaixo mostra os aproveitamentos da Light.

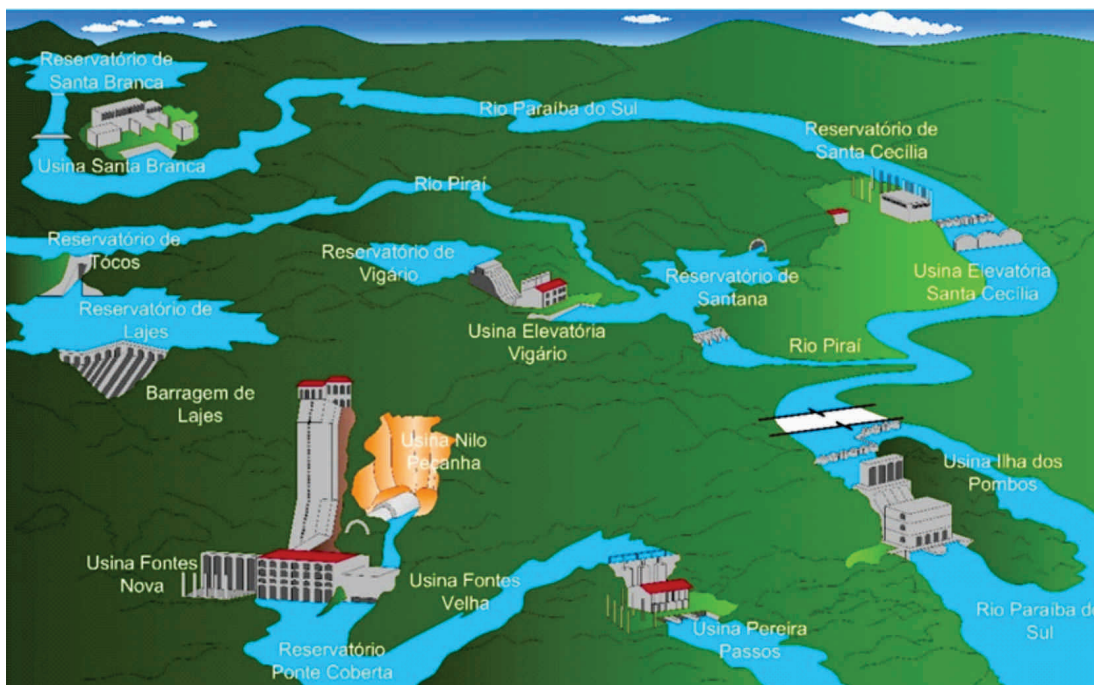


Figura 5. Esquema dos aproveitamentos hidrelétricos da Light.

Fonte: Adaptado de “Esquema geral do aproveitamento hidrelétrico dos rios Paraíba, Pirai e do ribeirão das Lajes” (Light, 1981).

A UHE Fontes Velha foi inaugurada em 1908 com potência de 12 MW, sendo em sua época a maior da América Latina e a segunda maior do mundo. A barragem, concluída em 1906, era uma estrutura do tipo concreto gravidade em arco de 100 m de raio, 32 m de altura, com 234 m de extensão na crista, sendo 134 m do vertedouro de lâmina livre. Em 1909 foi concluída a ampliação para 24 MW, gerenciada pelo Engenheiro Clint Kearny (CBDB, 2011), um evento digno de destaque.



Figura 6. UHE Fontes Velha. Estrutura da casa de força (24 MW).

Em 1914, foi concluída no rio Pirai a barragem de Tócos, com 25 m de altura e um túnel de 8,4 km de extensão, na época o mais longo túnel hidráulico do mundo, para desviar água (25 m³/s) para o reservatório de Lajes, possibilitando aumentar capacidade da UHE Fontes para 54 MW.

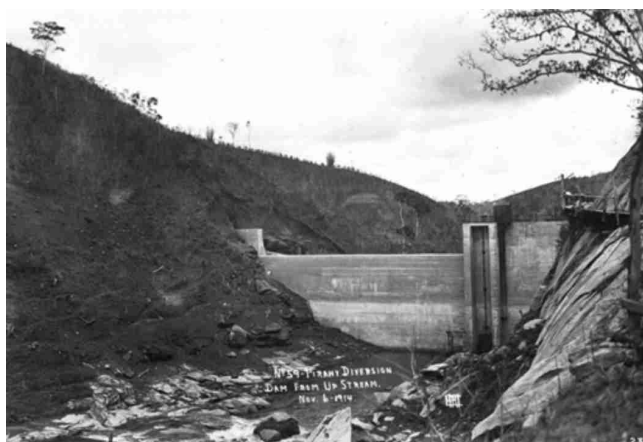


Figura 7. Barragem de Tócos (1914).



Figura 8. Emboque de jusante do túnel de Tócos.



Figura 9. UHE Ilha do Pombos.

Fonte: CBDB (2011).

Em 1924, foi concluída a UHE Ilha dos Pombos. A usina tem um canal de adução com 2,5 km de comprimento constituído por diques de terra compactada e trechos em concreto. O vertedouro principal, localizado na margem esquerda, tem três comportas tipo setor, com vão de 45 m por 7,40 m de altura, área de 333 m², que até hoje são as maiores do mundo e operam normalmente (CBDB, 2011, e Erbisti, 2002). Em 1937, após a ampliação, a usina, com 31 m de queda bruta, atingiu a potência de 167 MW. Nos anos 90, após mais de 50 anos de operação, foi executada uma reabilitação completa da barragem e das comportas.



Em 1937, foi criada a Seção de Geologia e Petrografia do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. Em 1938, ela foi transformada em Seção de Geologia e Minas e em 1939, em Seção de Solos, chefiada por Ernesto Pichler, que se dedicava a estudos na área de Geologia de Engenharia sobre a qual, até então, não existiam informações precisas (Ruiz, 1987⁵). A Seção de Geologia Aplicada do IPT foi criada em 1955.

O Comitê Brasileiro de Barragens – CBDB publicou em 2011, na comemoração dos seus 50 anos, um excelente livro sobre a história das barragens no Brasil nos séculos passados. Recomen-

da-se consultar essa publicação para maiores detalhes sobre nossa brilhante história.

O Quadro 2, a seguir, resume uma série de eventos importantes para o Setor Elétrico Brasileiro, dentre os quais destaca-se:

- 1941 – Companhia Siderúrgica Nacional (CSN);
- 1942 – Companhia Vale do Rio Doce (CVRD);
- 1943 – Início da criação das companhias estaduais e federais de energia;
- 1945 – Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF);
- 1952 – Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG);
- 1953 – Usinas Elétricas do Paranapanema (USELPA);

5 Ruiz, Murilo D. – A evolução da geologia de engenharia no Brasil e suas perspectivas. Anais do CBGE, 1987.

- 1995 – Companhia Energética do Rio Pardo (CHERP), Centrais Elétricas do Urubupungá (CELUSA) e Centrais Elétricas de Goiás (CELG);
- 1956 – Centrais Elétricas do Espírito Santo (ESCELSA);
- 1957 – FURNAS;
- 1961 – ELETROBRÁS.

Quadro 2. Eventos de Energia Elétrica no Brasil 1880 e 2010 (2013).

Ano	Evento
1889	1ª UHE de grande porte, Marmelos Zero, Cia. Mineira de Metais (JF-MG)
1892	1ª Linha de bondes elétricos do Rio de Janeiro
1903	Congresso aprova texto disciplinando o uso da energia elétrica
1905	Criada, em 30/05, a The Rio de Janeiro LIGHT and Power Co. Ltd.
1908	Inauguração da UHE Fontes Velha, 12 MW, (RJ), à maior da América Latina e a 2ª do mundo
1909	Concluída a Ampliação de Fontes Velha para 24 MW
1912	Unificação da LIGHT RJ-SP. Companhia Paulista de Força e Luz
1913	UHE Delmiro Gouveia – 1ª hidrelétrica da cachoeira de Paulo Afonso no rio S. Francisco (BA)
1920	Capacidade instalada atinge 360 MW
1924	Inauguração da UHE Ilha dos Pombos
1930	Capacidade instalada atinge 780 MW (541 hidrelétricas, 337 térmicas e 13 mistas)
1934	Edição do Código de Águas
1940	Capacidade instalada atinge 1.250 MW
1941	CSN – Companhia Siderúrgica Nacional
1942	CVRD – Companhia Vale do Rio Doce
1943	Ano de Início da Criação das Companhias Estaduais e Federais de Energia
1945	CHESF – Companhia Hidro Elétrica do São Francisco. Início do projeto de Paulo Afonso I
1950	Capacidade instalada atinge 1.900 MW
1952	BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social; CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais
1953	USELPA – Usinas Hidrelétricas do Rio Paranapanema
1954	UHE Paulo Afonso I em operação. CELESC – Centrais Elétricas de Santa Catarina
1955	CHERP e CELUSA. CELG – Centrais Elétricas de Goiás
1956	ESCELSA – Centrais Elétricas do Espírito Santo
1957	FURNAS (iniciam-se os projetos de Porto Colômbia, Marimbondo, Estreito e Volta Grande)
1960	Capacidade instalada atinge 4.800 MW. Ministério das Minas e Energia
1961	ELETROBRAS – Centrais Elétricas Brasileiras S. A.
1962	CANAMBRA – Canambra Engineering Company executou estudos no Brasil
1963	UHE Furnas ligando MG-RJ-SP
1965	DNAEE – Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
1966	CESP – Cia Energética de São Paulo. Iniciam-se os projetos dos rios Paranapanema, Tietê, Grande e Paraná. Jupia, I. Solteira, Á. Vermelha. Continuam os projetos do rio Paranaíba (S. Simão, Emborcação)
1968	ELETROSUL, UTE Santa Cruz, ENERAM (Comitê Coordenador dos Estudos Amazônia)
1969	GCOI – Grupo Coordenador da Operação Interligada
1970	Capacidade instalada atinge 11.460 MW
1973	ITAIPU, ELETRONORTE, NUCLEBRÁS, CEPEL
1979	LIGHT nacionalizada. UHE Sobradinho
1980	Capacidade instalada atinge 31.300 MW
1982	GCPS – Grupo Coordenador do Planejamento do Sistema
1984	UHE Itaipu, UHE Tucuruí
1985	Usina Nuclear ANGRA I

Ano	Evento
1990	Capacidade instalada atinge 53.000 MW
1995	Iniciam-se os leilões de privatização
1996	ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
1997	ELETRONUCLEAR - Centrais Elétricas Nucleares
1998	MAE-Mercado Atacadista de Energia; ONS - Operador Nacional do Sistema
2000	Capacidade instalada atinge 72.200 MW. UHE Itá. Programa Prioritário de UTEs
2001	Crise, racionamento. UHE Lajeado
2002	UHE Canabrava. UHE Machadinho
2003	Capacidade Instalada atinge 77.300 MW
2004	EPE - Empresa de Pesquisa Energética (MME)
2005	CERAN - Complexo Energético do Rio das Antas
2007	UHE Campos Novos e UHE Barra Grande
2010	Capacidade Instalada atinge 78.658 MW.
2016	Capacidade instalada atinge 96.925 MW
2021	Capacidade Instalada atinge 108.650 MW (Dado do site do O.N.S)

A partir da criação da Eletrobras, em 1961, a instalação de hidrelétricas no Brasil tomou maior impulso, como mostrado na Figura 10.

No Quadro 3 abaixo apresentam-se as maiores usinas hidrelétricas ao redor do mundo ranqueadas pela potência instalada.

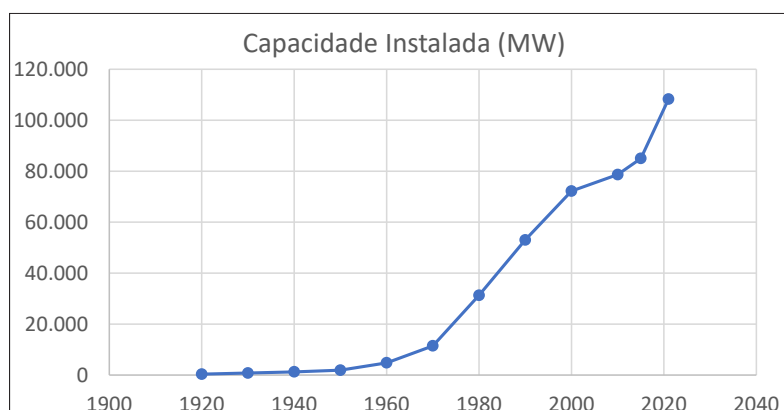


Figura 10. Evolução da capacidade instalada no Brasil.

Fonte: ?

Quadro 3. Maiores usinas hidrelétricas em potência instalada ao redor do mundo.

Ordem	Nome	País	H ^a (m)	Potência (MW)	Data
1	Three Gorges	China	181	22.400	2012
2	Itaipu	Brasil/Paraguai	196	14.000	2004
3	Guri ^b	Venezuela	162	10.600	1968
4	Tucuruí	Brasil	93	8.400	2003
5	Grand Coulee	USA	168	7.460	1942
6	Sayano-Shushensk	Rússia	245	6.400	1980
7	Krasnoyarsk	Rússia	124	6.000	1968
8	La Grande 2	Canadá	168	5.328	1979
9	Churchill Falls	Canadá	32	5.225	1971
10	Bratsk	Rússia	125	4.500	1961

Ordem	Nome	País	H ^a (m)	Potência (MW)	Data
11	Ust-Ilim	Rússia	102	3.840	1977
12	Ilha Solteira	Brasil	74	3.200	1973
13	Brumley Gap	USA	78	3.200	1973
14	Xingó	Brasil	140	3.012	1987
15	Bennett, W.A.C.	Canadá	183	2.730	1968
16	Mica	Canadá	242	2.660	1976
17	São Simão	Brasil	120	2.680	1979
18	Volvograd	Rússia	47	2.563	1958
19	Paulo Afonso IV	Brasil	33	2.460	1979
20	Cahora Bassa ^b	Moçambique	171	2.425	1975
21	Chicoas`em	Mexico	261	2.400	1980
22	Gezhouba	China	47	2.340	1975
23	La Grande 3	Canadá	93	2.304	1982
24	Volga-V.I. Lenin	Rússia	45	2.300	1955
25	Iron Gates	Romania/Servia	60	2.300	1970

^a Altura da barragem sobre fundação. ^b Capacidade Adicional Planejada ou em Construção.

Fonte: adaptado de Gulliver e Arndt (1991).

Em 1995 ocorreu a reestruturação do setor elétrico. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) foi criada em 1996 e o Operador Nacional do Sistema (ONS) em 1998.

A EPE, Empresa de Pesquisa Energética foi criada em 2004, vinculada ao Ministério das Mi-

nas, e tem por finalidade prestar serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético brasileiro. As figuras abaixo foram selecionadas do Plano Nacional de Energia 2030 – Geração Hidrelétrica⁶

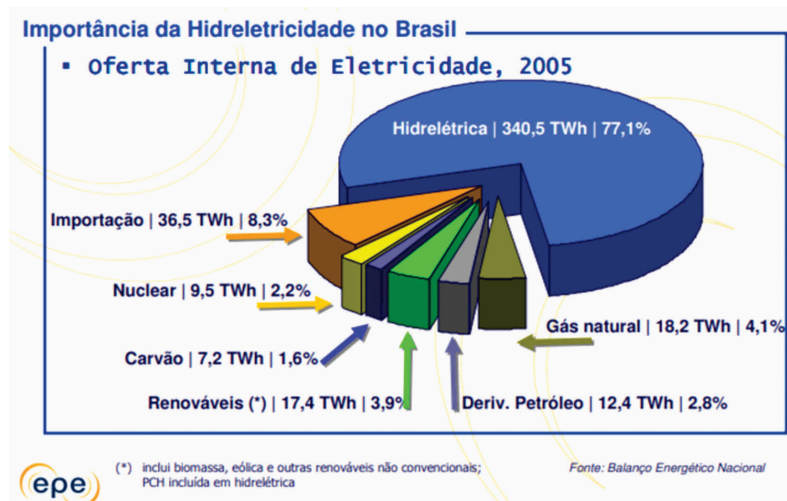


Figura 11. Participação da energia hidráulica no Brasil.

Fonte: PNE 2030.

6 <https://www.epe.gov.br/pt/resultado-de-busca?k=potencial%20hidrel%C3%A9trica%20brasileiro>

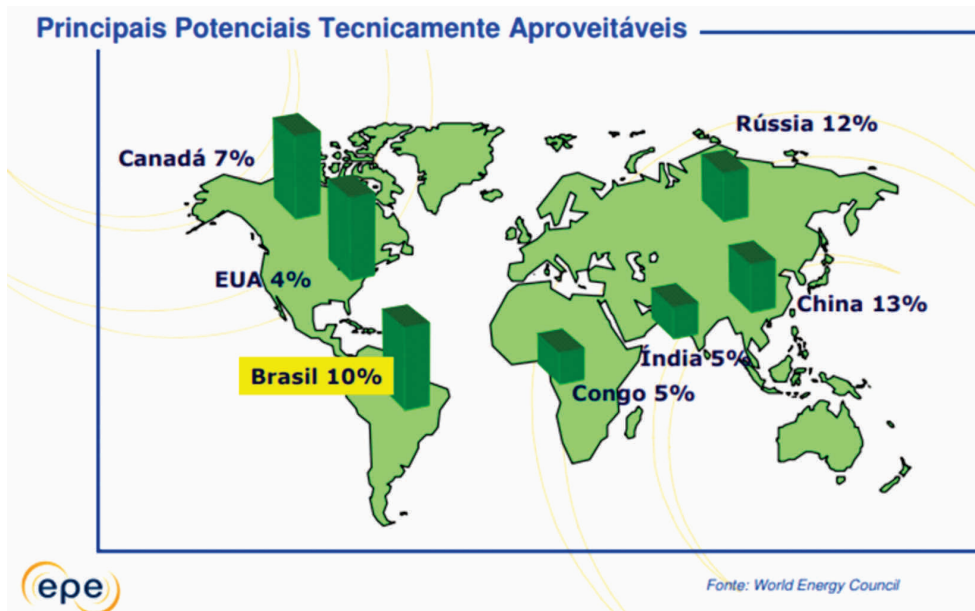


Figura 12. Potencial tecnicamente aproveitável no mundo em percentual no mapa.

Fonte: PNE 2030.

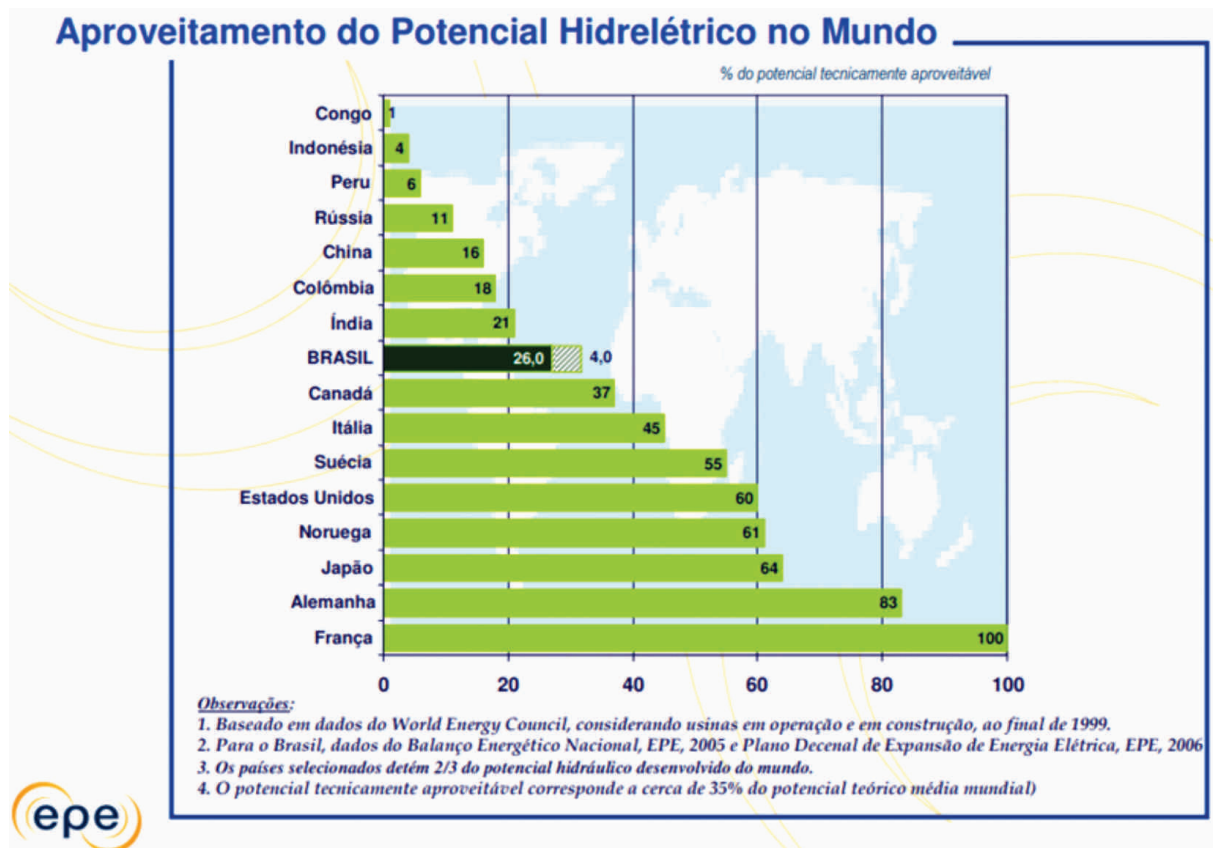


Figura 13. Percentual de aproveitamento hidrelétrico no mundo.

Fonte: PNE 2030.

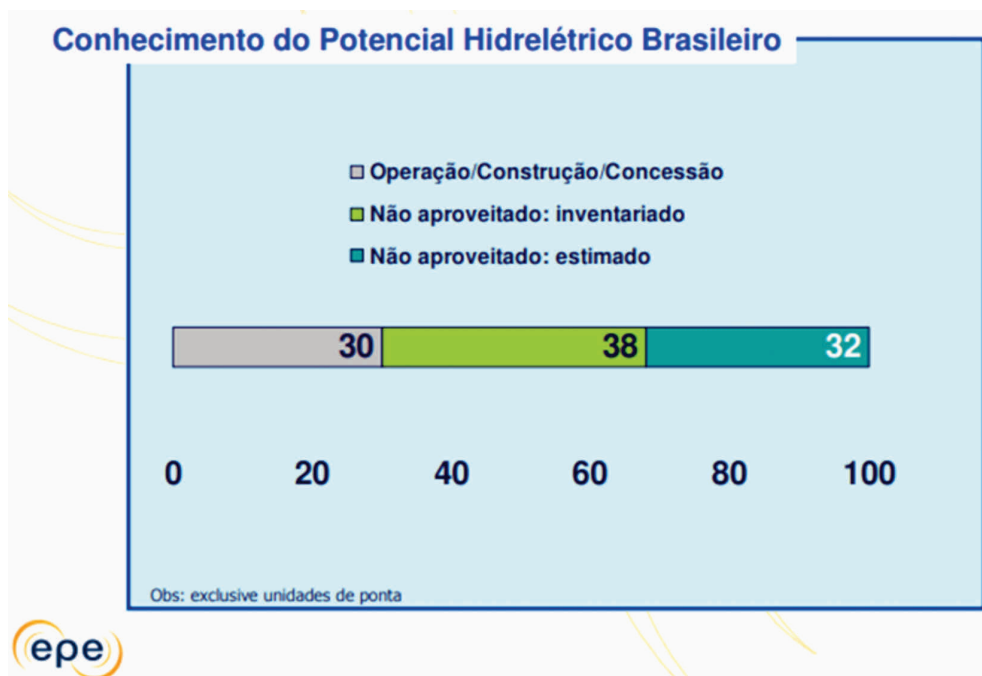


Figura 14. Nível de conhecimento do potencial hidrelétrico brasileiro.

Fonte: PNE 2030.

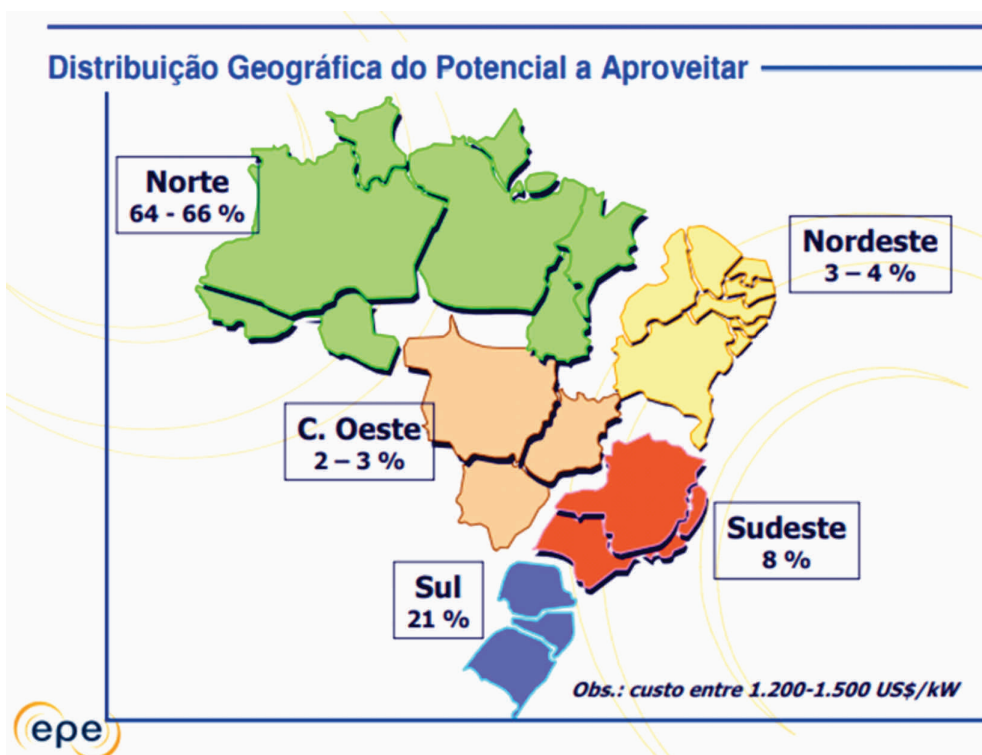


Figura 15. Distribuição nas regiões do Brasil do potencial hidrelétrico a ser aproveitado.

Fonte: PNE 2030.

O Plano Nacional de Energia – PNE 2030 registra que a energia elétrica associada à fonte hidráulica corresponde à mais de três quartos da energia gerada no Brasil e que ainda, o país permanece com apenas 26% de aproveitamento do potencial hidrelétrico tecnicamente viável, o que corresponde a 10% do potencial mundial.

Em termos de nosso conhecimento do nosso potencial em hidroenergia, dois terços permanecem inventariados ou apenas estimados, sendo a região norte do país a grande detentora de potenciais disponíveis ao aproveitamento.

Fica claro o extenso horizonte que ainda existe no desenvolvimento hidrelétrico nacional. Ao

mesmo tempo, não há dúvida que cada vez mais, a sociedade precisa buscar formas mais inteligentes e sustentáveis para o necessário uso dos recursos naturais.

É, portanto, justamente neste contexto que precisam atuar o CBDB e a ABGE enquanto associação técnico-científicas e os profissionais que aplicam seus conhecimento em Geologia de Engenharia e Ambiental às inúmeras formas de interação entre a humanidade e o espaço físico superficial e subterrâneo.

CONTRIBUIÇÕES E REFLEXÕES

A RBGEA abre esse espaço para que os membros de nossa comunidade tenham divulgados suas ideias, pensamentos e opiniões sobre temas e assuntos relacionados à Geologia de Engenharia e Ambiental.

Esperamos com estes textos iniciar debates e discussões e por isso questionamentos, perguntas, opiniões serão muito bem vindas.

■ O QUE ACONTECE QUANDO O ALUNO ■ DESCOBRE QUE NÃO APRENDEU TUDO ■ O QUE DEVERIA TER APRENDIDO NO CURSO?¹

LEANDRO CERRI
Consultor, lescerri@gmail.com

Aquela tarde parecia como todas as outras, mas só parecia. O professor estava em sua sala de trabalho, entretido em seus afazeres profissionais, que tanto prazer lhe proporcionavam. De repente, surgiu um aluno na porta, com ar de quem estava muito, mas muito preocupado. Perguntou se o professor poderia recebê-lo para **uma conversa um tanto urgente**, ao que o professor aceitou, por sentir que o momento era delicado.

O aluno, quase rompendo em prantos, disse que havia **descoberto algo terrível**. Faltando poucos meses para sua formatura e, somente agora, ele havia percebido que, apesar de ter passado mais de quatro anos na faculdade, **não se sentia capaz e seguro para encarar os desafios do mercado de trabalho**. E agora, o que iria fazer?

O professor, já mais aliviado por notar que o problema era menos grave do que havia suposto, disse para o aluno ficar calmo e esclareceu que, algumas vezes, em anos anteriores, outros formandos também o tinham procurado com a mesma preocupação. Salientou que esse sentimento era mais frequente em alunos que, durante o curso, **não tinham realizado atividades extracurriculares**, especialmente estágios em empresas.

Embora o aluno tivesse demonstrado certa surpresa, o professor mencionou que essa descoberta da falta de preparo para o mercado de trabalho era **relativamente comum**.

O aluno quis saber, então, como algo tão grave poderia ser considerado **normal**, sem que alguma **providência imediata** fosse tomada.

O professor chamou a atenção do aluno, pois ele havia dito que aquele fato era comum, mas não o considerava normal. **Deve-se cuidar para não confundir o significado dessas duas palavras**, explicou o professor.

O professor esclareceu que **poucos docentes tinham essa percepção de que os alunos acabavam tendo uma formação incompleta**, aquém da que poderiam ter, ante a carreira profissional a ser iniciada. Ponderou, ainda, que acreditava que uma das principais causas era que **a quase totalidade dos docentes do curso não conhecia bem o mercado corporativo**, pois só tinham atuado no meio acadêmico.

Explicou, também, que os concursos para ingresso no corpo docente das universidades solicitam **qualificações restritas ao universo acadêmico**, como titulações, publicações, orientações, experiência didática etc., não exigindo experiência no mercado corporativo, ainda que, em alguns casos, o docente esteja sendo contratado especificamente para ministrar disciplinas profissionalizantes.

Por todas essas razões, uma parcela dos alunos completava seus cursos com um **sentimento de insegurança**, de **ausência de confiança** e de **falta de prática** para atuar no mercado corporativo, pois tiveram formação predominantemente acadêmica.

1 trecho do Capítulo 6 do livro “**GUIA DO PROFISSIONAL ESSENCIAL: 5 passos para estruturar sua carreira no mercado pós-pandemia**”, de autoria de Leandro Cerri (leandrocerra.com)

O aluno, já um pouco mais calmo, mas ainda procurando enxergar alguma forma de resolver seu problema, quis saber como era estruturado o curso.

Diante dessa questão, o professor passou a explicar como era o **projeto didático-pedagógico** que, tradicionalmente, os cursos adotavam, desde algumas décadas, sem grandes processos de atualização. Tudo era baseado no acúmulo de informação, transmitida aos alunos quase exclusivamente por meio de **aulas expositivas**, de modo que o curso não preparava o aluno para trabalhar, **só proporcionava o acúmulo de um monte de conhecimento teórico**. E o pior, toda essa informação acumulada era **descontínua e desconexa**, sem uma organização para aplicação prática imediata no mercado de trabalho.

O professor prosseguiu dizendo que o docente de cada disciplina ia às aulas e apresentava seu conteúdo, mas **sempre cabia ao aluno integrar as informações novas ao todo já aprendido**. Só que o aluno, com toda sua imaturidade natural, era – e sempre será – **o agente mais despreparado para fazer essa importante integração**.

Para o professor, poucos docentes “traziam o mercado de trabalho para dentro da sala de aula”, criando oportunidades para que **os alunos realizassem atividades similares às que fariam em seu dia a dia profissional**, no mercado corporativo. Ou seja, o desenvolvimento de habilidades

– saber fazer – acabava não sendo prioritário na formação dos alunos.

Segundo o professor, quando o aluno faz estágio em alguma empresa, tem a **oportunidade de integrar parte desse conteúdo que havia acumulado**, aplicando-o ao trabalho que executa como aprendiz. As tarefas realizadas durante o estágio permitem ao aluno um maior contato com o tipo de atividade que um profissional realmente executa, **favorecendo o desenvolvimento de habilidades práticas**.

A essa altura, ao ouvir atentamente as explicações do professor, o aluno fez a pergunta inevitável:

– Então, **por que não mudam o jeito de dar as aulas do curso?**

– Simplesmente porque **a maioria dos docentes não entende que seja necessário** modernizar a estratégia didático-pedagógica do curso, respondeu o professor.

O aluno não se importou muito com essa resposta, pois sua preocupação maior era resolver seu problema. Para ele, não adiantaria mudar a estratégia didático-pedagógica do curso agora que ele já estava concluindo seus estudos. Finalmente, com ar de desânimo, **perguntou ao professor o que havia faltado em sua formação**.

ABGE JOVEM: A UNIÃO DE JOVENS PROFISSIONAIS EM TEMPOS DE DISTANCIAMENTO SOCIAL

MALENA D'ELIA OTERO

Aluna de Doutorado no Programa de Pós Graduação em Geociências do Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas (IG/UNICAMP), SP, Brasil. m211338@dac.unicamp.br

VICTOR ARROYO DA SILVA DO VALE

Geólogo do Departamento de Proteção e Defesa Civil da Prefeitura Municipal de Santos, SP, Brasil. victorarroyo@santos.sp.gov.br

O ano de 2020 foi um ano marcado pelas perdas, tanto materiais como aquelas em níveis mais sutis: perdemos o contato físico com as pessoas ao nosso redor, perdemos pessoas queridas, perdemos empregos e oportunidades de trabalho, perdemos parcialmente a esperança e perdemos a sensação de controle. Mas dentro desse ano atípico, nasceu a ABGE Jovem, o comitê de jovens da Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (ABGE).

A pandemia iniciada em 2020 nos trouxe muitos impedimentos e, se por um lado, nos vimos forçados a adotar práticas virtuais praticamente inéditas até então, por outro lado, isso nos permitiu nos aproximarmos de uma maneira que no mundo físico não teria sido possível. De fato, o comitê de jovens havia sido lançado em 2018, durante a última edição do XVI Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental (CBGE), mas as tentativas de tirá-lo do papel foram frustradas. A primeira reunião da ABGE Jovem, que até então não havia recebido tal denominação, ocorreu em modalidade virtual em julho de 2020 e contou com participantes de diversas cidades e regiões do Brasil, além de representantes de outros comitês de jovens dispostos a orientar o comitê recém criado da ABGE.

A partir da primeira reunião, começamos uma tarefa demandante, porém muito recompensadora, de buscar maneiras de aproximar os jovens profissionais da geologia de engenharia e ambiental (GEA) com a ABGE e com

profissionais mais experientes. De forma muito orgânica, o grupo se dividiu em subgrupos para organizar bate-papos ao vivo (em 2020, quinzenais e em 2021, mensais), concursos, cursos, materiais de divulgação de GEA para as redes sociais da ABGE Jovem e da ABGE Nacional, entre outros. Em números, contabilizamos até o momento onze bate-papos ao vivo, um concurso fotográfico, três cursos (AutoCad – duas edições e HEC-HMS – 1 edição), 38 postagens de Instagram, muitas horas de reuniões, além de alguns formulários de tomada de decisão em grupo. O canal de YouTube da ABGE, que no início contava com menos de 100 inscritos, hoje conta com mais de 1.500, em parte, graças à realização dos bate-papos ao vivo da ABGE Jovem, que foi a precursora dessa forma de atividade na ABGE.

A ABGE Jovem tem proporcionado um espaço de participação horizontal para os jovens profissionais. É um espaço de troca de conhecimento técnico, mas também de aprendizados que fogem à sala de aula, onde escutamos uns aos outros, respeitamos as opiniões diferentes, aprendemos a alcançar consensos e a tomar decisões como um grupo. Também saímos das nossas zonas de conforto, ao nos incentivarmos mutuamente a debater assuntos em público com especialistas da área e mediar bate-papos, além de aprendermos a fazer uso de tecnologias alheias à nossa área de atuação, como a transmissão ao vivo desses debates técnicos.

Os bate-papos ao vivo têm contribuído enormemente para a divulgação de conhecimento técnico. Este conhecimento, que muitas vezes parecia estar restrito a algumas “cabeças” e empresas e cujas oportunidades de compartilhamento ocorriam principalmente nos congressos e *workshops*, ganhou um novo veículo de difusão que alcança profissionais distribuídos em todo o país. Dessa forma, construímos um canal para mostrar também como as diversas áreas de GEA se inter-relacionam, o que, por sua vez, contribui na formação mais completa de todos os profissionais de GEA do país, jovens há mais ou menos tempo. Além disso, os bate-papos permitem o encontro de gerações diferentes e se constituem como um espaço de voz dos jovens profissionais. Acreditamos que esta modalidade de difusão permanecerá no pós pandemia, mesmo quando retornamos aos encontros e visitas técnicas presenciais.

As reuniões da ABGE Jovem ocorrem quinzenalmente, às quartas-feiras, no período

noturno e são abertas a todos os profissionais com menos de 40 anos de idade. Contamos com um grupo sólido de membros de todas as áreas de GEA que é movido pela vontade de proporcionar experiências de integração dos jovens profissionais e de difundir o conhecimento técnico que temos no país.

Se em 2020 muitos de nós perdemos as esperanças, a ABGE Jovem nasceu como uma janela para o mundo exterior em tempos de confinamento e nos trouxe ventos de renovação e de continuação do legado da ABGE. O grupo seguirá empenhado na sua missão de divulgar a GEA entre os jovens e atuar no desenvolvimento da nova geração de profissionais, tendo como visão ser a principal forma de integração desses jovens à comunidade brasileira de GEA e tendo como valores a ética, a cooperação, a renovação, a inovação, a multidisciplinaridade, a inclusão e a excelência.