

LUIZ EDUARDO SAPORI GONÇALVES

**EFICÊNCIA DO SISTEMA DE DRENAGEM ADOTADO NA REGIÃO DE  
MINERAÇÃO DE BAUXITA, NA ZONA DA MATA DE MINAS GERAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal para obtenção do título *Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS-BRASIL  
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

G635e  
2018  
Gonçalves, Luiz Eduardo Sapori, 1989-  
Eficiência do sistema de drenagem adotado na região de  
mineração de bauxita, na Zona da Mata de Minas Gerais / Luiz  
Eduardo Sapori Gonçalves. – Viçosa, MG, 2018.  
xv, 77f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexo.

Orientador: Herly Carlos Teixeira Dias.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Drenagem. 2. Bauxita - Minas e mineração. 3. Solos -  
Permeabilidade. I. Universidade Federal de Viçosa.  
Departamento de Engenharia Florestal. Programa de  
Pós-Graduação em Ciência Florestal. II. Título.

CDO adapt CDD 22. ed. 634.9114123

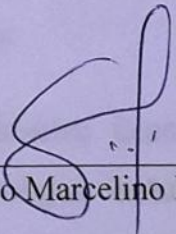
LUIZ EDUARDO SAPORI GONÇALVES

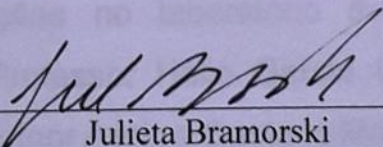
EFICÊNCIA DO SISTEMA DE DRENAGEM ADOTADO NA REGIÃO DE  
MINERAÇÃO DE BAUXITA, NA ZONA DA MATA DE MINAS GERAIS

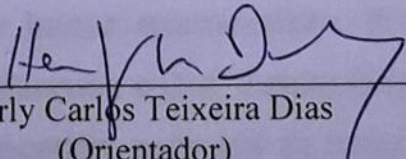
Dissertação apresentada à Universidade Federal de  
Viçosa, como parte das exigências do programa de  
Pós-Graduação em Ciência Florestal, para  
obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 27 de fevereiro de 2018

  
\_\_\_\_\_  
Kelly Cristina Tonello

  
\_\_\_\_\_  
Glaucio Marcelino Marques

  
\_\_\_\_\_  
Julieta Bramorski

  
\_\_\_\_\_  
Herly Carlos Teixeira Dias  
(Orientador)

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, por me iluminar, por me dar forças para sempre seguir lutando e por me mostrar pessoas que fazem meus dias melhores.

A minha família, em especial meu saudoso pai Renato (*in memoriam*), a minha querida mãe Sílvia e minha amável irmã Lívia. Aos meus avós maternos, Seu Zico e Dona Dorinha, a minha avó paterna Dona Naná, a minha querida Nilséia, meu irmão Thiago, meu cunhado João Paulo e meu pequeno e amado afilhado João Renato. A toda minha família Saporì e Gonçalves, pelo carinho, apoio e paciência. A vocês tudo devo, vocês são a base da minha vida.

A minha namorada Camila Machado por estar ao meu lado, com apoio e ternura, nos momentos mais difíceis.

A Universidade Federal de Viçosa, a qual faço parte a 9 anos e pude usufruir da sua infraestrutura, de seus professores e técnicos, proporcionando a mim o melhor do conhecimento e os meus melhores anos de vida já vividos.

Ao Departamento de Engenharia Florestal, o qual me graduei e tenho muito orgulho em pertencer e me capacitar a Engenheiro Florestal.

Ao Laboratório de Hidrologia Florestal pela concessão de equipamentos e pelo ambiente amigável e tranquilo de estudos.

Ao professor Dr. Herly Carlos Teixeira Dias, pelos ensinamentos, pela orientação e por me dar oportunidade de seguir estudando e aperfeiçoando. Ao professor Paulo Sergio de Almeida Barbosa e o professor Marcio Sampaio Sarmet Moreira pelas orientações no laboratório de Geotecnia do departamento de Engenharia Civil. Ao Professor Hélio Garcia Leite pelos ensinamentos desde da graduação. Ao professor Igor Assis e Caetano Marciano de Souza pelo tempo dedicado e instruções que proporcionaram o enriquecimento do trabalho.

Aos membros da banca examinadora, Prof<sup>a</sup>. Dra. Kelly Cristina Tonello, Prof.Dr. Glaucio Marcelino Marques e Dra. Julieta Bramorski, por fazerem parte desse trabalho, avaliando e enriquecendo, para que se concretize com sucesso.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de mestrado, proporcionando o meu sustento digno e dedicação exclusiva ao meu trabalho.

Aos meus queridos amigos da República V8 Magno, Jonathas, Abel, Heraldo, Ricardo, Arthur, Lucas, Felype, Vinicius, Henrique, Erick, Rodrigo, Thiago, João Vitor e a tantos outros amigos queridos que fiz nessa casa.

Aos meus amigos do Departamento de Engenharia Florestal, em especial meus queridos Vicente, Amana, Cássio e Pedro Motta pela paciência, compreensão e instruções.

Aos meus amigos de Belo horizonte, em especial meus primos Alexandre e Guilherme, pela companhia, parceria e amizade.

A equipe do Laboratório de Hidrologia Florestal João Paulo, Lucas, Edna, Aline, Machado, Yuji, Sérgio, Túlio, Rodolpho e estagiários pela prestatividade e saberes

A Companhia Brasileira de Alumínio – Miraí pelo apoio técnico, financeiro e por disponibilizar sua área para realização do trabalho.

A toda equipe da Companhia Brasileira de Alumínio – Miraí, em especial Sergio Werneck, Cristian Andrade, Aldo Lopes, Wellington Alexandre, Ademir, Marcio Greik, André Andrade, Rodrigo Cruzué, Thyago Silva e Bruno Mendes, pela parceria, disponibilidade e cooperação irrestrita.

A todos que de alguma forma participaram desse projeto a minha eterna gratidão.

## **BIOGRAFIA**

Luiz Eduardo Sapori Gonçalves, filho de Renato César Oliveira Gonçalves e de Silvia Maria de Oliveira Sapori, nasceu em 10 de fevereiro de 1989, em Belo Horizonte, Minas Gerais.

Em 2007, concluiu o 2o grau no Instituto Itapoã, em Belo Horizonte, Minas Gerais.

Em 2009, iniciou o curso de Engenharia Florestal, na universidade Federal de Viçosa, concluindo-o em janeiro de 2015.

Em julho de 2015, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal na Universidade Federal de Viçosa, defendendo sua dissertação em fevereiro de 2018.

“Se você não aceita o conselho, te respeito  
Resolveu seguir, ir atrás, cara e coragem  
Só que você sai em desvantagem se você não tem fé  
Se você não tem fé  
Te mostro um trecho, uma passagem de um livro antigo  
Pra te provar e mostrar que a vida é linda.  
Dura, sofrida, carente em qualquer continente  
Mas boa de se viver em qualquer lugar, é  
Volte a brilhar, volte a brilhar  
Um vinho, um pão e uma reza  
Uma lua e um sol, sua vida, portas abertas  
Em algum lugar, pra relaxar  
Eu vou pedir pros anjos cantarem por mim  
Pra quem tem fé  
A vida nunca tem fim  
Não tem fim  
Em algum lugar, pra relaxar  
Eu vou pedir pros anjos cantarem por mim  
Pra quem tem fé  
A vida nunca tem fim...”

O Rappa, “Pra quem tem fé”

## ÍNDICE

	<b>Página</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	viii
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xi
<b>RESUMO</b> .....	xii
<b>ABSTRACT</b> .....	xiv
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	3
<b>2.1 Mineração de bauxita</b> .....	3
<b>2.2 Drenagem superficial em minas de bauxita</b> .....	5
<b>2.3 Permeabilidade</b> .....	8
<b>2.3.1 Determinação da permeabilidade</b> .....	10
<b>2.4 Resistência Mecânica do Solo a Penetração</b> .....	12
<b>2.5 Sedimentologia</b> .....	14
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	18
<b>3.1 Localização e Caracterização da Área de Estudo</b> .....	18
<b>3.1.1 Mineração de Bauxita</b> .....	25
<b>3.2 Precipitação em Aberto</b> .....	27
<b>3.3 Mensuração dos poços de decantação</b> .....	28
<b>3.4 Permeabilidade</b> .....	30
<b>3.4.1 Coleta e preparação do solo</b> .....	30
<b>3.4.2 Ensaios de permeabilidade</b> .....	31
<b>3.5 Caracterização Física do Solo</b> .....	34
<b>3.5.1 Resistência do Solo a Penetração</b> .....	34
<b>3.5.2 Granulometria</b> .....	36
<b>3.6 Levantamento Topográfico</b> .....	36
<b>3.7 Ajuste dos modelos para estimativa dos volumes retidos e transbordados nos poços de decantação</b> .....	37
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	40
<b>4.1 Caracterização Física do Sedimento</b> .....	40



4.1.1	Permeabilidade.....	40
4.1.2	Porosidade e Resistência Mecânica do Solo à Penetração .....	44
4.2	Ajuste dos modelos .....	49
4.3	Eficiência.....	57
4.4	Diagnósticos influentes na eficiência do sistema de drenagem .....	59
4.5	Proposições técnicas para melhoria da eficiência.....	62
5	Considerações Finais .....	66
	Bibliografía.....	68
	ANEXO .....	77

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Página</b>
1	Exemplo de tanque de sedimentação atuando por gravimetria. ....6
2	Água percolando em um permeâmetro. ....9
3	Modelo de água percolando em um permeâmetro de carga variável. ....11
4	Modelo de água percolando em um permeâmetro de carga constante. ....11
5	Diagrama - triangular de Folk para classificaçãodos sedimentos grosseiros. ....16
6	Diagrama - triangular de Folk para classificação dos sedimentos. ....17
7	Destaque para localização da área de estudo, município de São Sebastião da Vargem Alegre, MG. ....18
8	Caracterização da área de estudo com resíduo de braquiária, estrada, terraço e seus respectivos poços de decantação e fragmentos remanescentes de vegetação nativa.....19
9	Resíduo de braquiária com a presença animal no corpo de mineração no município de São Sebastião da Vargem Alegre, MG. ....20
10	Área onde foi onde conduzido o estudo e sua estrada de acesso, ao fundo, com sua respectiva paisagem ondulada e montanhosa (morros em meia-laranja). ....20
11	(a,b) Afloramento do material rochoso Charnockito na base do corpo de mineração, no município de São Sebastião da Vargem Alegre, MG. ....21
12	Croqui de área de exploração de extração de bauxita evidenciando os horizontes superficiais O e A e a camada de bauxita (SILVA, 2015). ....21
13	Poços de decantação 1.3, 1.2 e 1.1 respectivamente em sequência, pertencentes a bateia de poços de decantação 1 da área de estudo, retendo o escoamento superficial proveniente da Mina. ....22
14	Uso e ocupação da área de mineração com seus respectivos poços de decantação no município de São Sebastião da Vargem Alegre, MG. ....24
15	Levantamento topográfico georreferenciado, com detalhamento das áreas de contribuição e seus respectivos poços, área de pastagem, área da mina, divisores topográficos, sulcos e delimitação do corpo de mineração de bauxita. ....25
16	Topsoil proveniente do decapeamento depositado no interior do corpo de mineração no município de São Sebastião da Vargem Alegre, MG. ....26
17	(a) Topsoil proveniente do decapeamento sendo utilizado como leira (fechada); e (b) topsoil na beira da estrada de acesso ao corpo de mineração no município de São Sebastião da Vargem Alegre, MG. ....27
18	Pluviógrafo modelo Rain Wise usado para medida da precipitação em aberto na área de mineração no município de São Sebastião da Vargem Alegre, MG. ....28

<b>19</b>	(a) Laser Scanner (RIEGL-400); e (b) GPS (GNSS RTK T10 TOPOMAP) utilizados na mensuração dos poços de decantação na estrada de acesso ao corpo de mineração no município de São Sebastião da Vargem Alegre, MG. ....	29
<b>20</b>	Remedição com o auxílio de uma fita métrica de 50 metros após a retirada do sedimento dos poços de decantação na estrada de acesso ao corpo de mineração no município de São Sebastião da Vargem Alegre, MG. ....	29
<b>21</b>	(a) Amostras retiradas dos poços através da escavadeira; e (b) uso da trena manual com fita de aço para verificar as profundidades 30 e 60 centímetros. ....	30
<b>22</b>	(a) Anel metálico com molde do solo; e (b) embalagens vedadas a serem levadas ao Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa (LMS-UFV). ....	31
<b>23</b>	Maquete do sistema de funcionamento dos ensaios de percolação em coluna: painel de controle para aplicação de pressão na interface; reservatório de armazenamento de água (interface); e conjunto do permeâmetro. ....	31
<b>24</b>	(a) Compressão estática realizada por prensa hidráulica; e (b) corpo de prova compactado em tubo de PVC de aproximados 12 e 10 centímetros de altura e circunferência respectivamente. ....	32
<b>25</b>	(a) Corpo de prova vedado nas faces superiores; e (b) inferiores e interface de armazenamento nas alturas 26,7, 65,9 e 81,1 centímetros alturas conectados na parte inferior ao corpo de prova através de tubos flexíveis de plástico. ....	33
<b>26</b>	Visão geral do equipamento utilizado para o ensaio de permeabilidade, Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa (LMS-UFV). ....	34
<b>27</b>	(a) Coleta de amostra de 0 -10 cm e 10-20 cm para determinação do teor de humidade; e (b) realização dos testes de compactação com o penetrômetro eletrônico em Maio 2017. ....	35
<b>28</b>	Coleta de sedimento dos poços de decantação na área de mineração de bauxita em Maio 2017. ....	36
<b>29</b>	(a,b) Equipamento GPS usado em campo para obtenção das coordenadas geográficas da área de mineração de bauxita em São Sebastião da Vargem Alegre, MG. ....	37
<b>30</b>	(a) Pontos de alagamento; e (b) formação de lama, no acesso aos poços de decantação da área de mineração de bauxita em São Sebastião da Vargem Alegre, MG. ....	38
<b>31</b>	(a) Trena manual com fita de aço cortada de zero a dois metros; e (b) fixa (rebitada) a uma régua de alumínio de pedreiro utilizados para a medidas das alturas da lâmina de água nos poços de decantação uma régua milimétrica. ....	38
<b>32</b>	Adaptação construída a partir de dois canos de PVC de 1,50 metros conectados por um joelho, formando uma haste em formato de L, medindo a parte central do poço de decantação. ....	39

<b>33</b>	(a) Contração com a formação de rachaduras; e (b) pegajosidade do solo umedecido dos solos presentes nos poços de na área de mineração de bauxita em Maio 2017.....	43
<b>34</b>	Resistência mecânica do solo a penetração resolução 5 centímetros realizados nos poços de decantação na área de mineração de bauxita em Maio de 2017, São Sebastião da Vargem Alegre, MG. ....	47
<b>35</b>	Gráfico de dispersão de precipitação e volume transbordado e retido para cada conjunto de poço de decantação do sistema de drenagem em uma área de mineração de bauxita em São Sebastião da Vargem Alegre, MG. ....	51
<b>36</b>	Relação entre precipitação e volume transbordado e retido com suas respectivas precipitações máximas para cada conjunto de poço de decantação do sistema de drenagem em uma área de mineração de bauxita em São Sebastião da Vargem Alegre, MG. ....	55
<b>37</b>	(a,b) Rebaixamento do solo devido a extração de bauxita na área de mineração em São Sebastião da Vargem Alegre, MG. ....	58
<b>38</b>	(a,b) Sinais de erosão laminar na saída da área de mineração de bauxita em São Sebastião da Vargem Alegre, MG. ....	59
<b>39</b>	Ponto de alagamento na estrada entre os sistemas 1 e 2 na área de mineração de bauxita em São Sebastião da Vargem Alegre, MG. ....	60
<b>40</b>	(a) Poços das baterias 1; e (b) poços da bateria 4, da área de mineração de bauxita, com pequena altura e formatos retangulares. ....	61
<b>41</b>	(a,b) comprimento e declividade da rampa determinantes a erosão pluvial na estrada e barrancos laterais a estrada descobertos de vegetação susceptíveis à perda por carreamento de partículas através do escoamento superficial, na área de mineração de bauxita em São Sebastião da Vargem Alegre, MG. ....	61
<b>42</b>	Terraços tipo banquetas individuais. ....	66

## LISTA DE TABELAS

### Página

1	Valores típicos de permeabilidade dos solos. ....	9
2	Limites de classes de resistência de solos à penetração e graus de limitação ao crescimento das raízes. ....	13
3	Propriedades físicas das principais classes texturais: cascalho, areia, silte e argila.....	15
4	Termos da classificação dos sedimentos grosseiros do Diagrama Triangular de Folk segundo versão portuguesa de Dias, 2004. ....	16
5	Termos da classificação dos sedimentos finos do Diagrama Triangular de Folk segundo versão portuguesa de Dias, 2004. ....	17
6	Esquema de divisão dos poços de decantação que compõe o sistema de drenagem da estrada de acesso a mina. ....	22
7	Profundidade de coleta, umidade e densidade dos moldes de anel metálico utilizados para o teste de percolação em coluna em Julho de 2017. ....	41
8	Coeficiente de permeabilidade médio e desvio padrão dos ensaios realizados em cada poço, entre setembro a novembro de 2018. ....	42
9	Classificação textural do solo contido nos poços de decantação em Maio de 2017.....	42
10	Porosidade total média e desvio padrão dos ensaios realizados em cada poço em novembro de 2018. ....	44
11	Umidade média de 0 – 20 centímetros dos testes de resistência do solo a penetração, na área de mineração de bauxita em Maio de 2017, São Sebastião da Vargem Alegre, MG. ....	45
12	Valores médios de área e volume dos poços de decantação, área de contribuição e declividade média obtidos em uma área de mineração de bauxita em São Sebastião da Vargem Alegre, MG. ....	50
13	Dados acumulados de precipitação, volume produzido, percolação, volume transbordado e retido mensurados entre Novembro de 2016 a Março de 2017. ....	53
14	Rendimento médio dos poços de decantação poço de decantação do sistema de drenagem em uma área de mineração de bauxita em São Sebastião da Vargem Alegre, MG. ....	57
15	Dimensões dos terraços de base estreita encontrada na pastagem da área de mineração de bauxita e as respectivas declividades do terreno. ....	62
16	Determinação da distância entre as bacias em função da variação do declive e da largura da estrada. ....	65

## RESUMO

GONÇALVES, Luiz Eduardo Sapori, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2018. **Eficiência do Sistema de Drenagem Adotado na Região de Mineração de Bauxita, na Zona da Mata de Minas Gerais.** Orientador: Herly Carlos Teixeira Dias.

A exploração da bauxita é uma importante atividade econômica para o Brasil e para o Estado de Minas Gerais, segundo no estoque nacional com 16% das reservas, cerca 560 milhões de toneladas, onde as principais áreas de extração concentram-se na Zona da Mata, inserida num cinturão aluminoso com reservas superiores a 100 milhões de toneladas. Apesar da abundância e da intensa exploração, os sistemas de drenagem dessas minerações são concebidos de maneira empírica, sendo o seu sucesso dependente, em grande parte, da resolução adequada de suas interações com a água. Inserido nesse contexto, esse trabalho objetivou avaliar a eficiência do sistema de drenagem adotado na região de mineração de bauxita, na zona da mata mineira e propor adequações técnicas visando sua melhoria e a criação de projetos de drenagem pré-concebidos. O estudo foi conduzido no período de Outubro de 2016 a Julho de 2017, em uma área de exploração de bauxita, localizada no município de São Sebastião da Vargem Alegre, Zona da Mata de Minas Gerais, onde a precipitação diária foi medida por um pluviógrafo. Realizou-se o levantamento topográfico e a mensuração dos poços de decantação, objeto de estudo, divididos em 8 baterias num total de 23 poços, os quais tiveram seus volumes monitorados de novembro de 2016 a março de 2017. A resistência mecânica a penetração nos poços de decantação feita com auxílio de um penetrômetro digital, onde também realizou-se coleta de solos pra análise de granulometria. Para os testes de permeabilidade, coletou-se solos dos poços e em laboratório determinou a permeabilidade através do ensaio de percolação em coluna, empregando-se os menores valores de densidade encontrados em campo, sendo em seguida feita a porosidade pelo teste do picnômetro. De posse dos dados de precipitação, área de contribuição, permeabilidade e volumes coletados, foram ajustados a partir do software Statistica versão 13.0, regressão piecewise para a justaposição de modelos lineares, visando descrever a evolução do volume transbordado e do volume retido em função da

precipitação. Os resultados foram submetidos às avaliações de coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e avaliação gráfica, com determinação da eficiência de cada bateria do sistema. A permeabilidade apresentou-se muito baixa com valor máximo de  $5,77 \times 10^{-5} \text{ cm.s}^{-1}$  para a bateria de poços 3. O material coletado apresentou uma média de 64,18% de argila, 22,09 % silte e 13,73% de areia, caracterizando-se muito argiloso, com a presença de argilominerais 2:1 detectados através do teste de consistência em campo. A porosidade média de 57,35%, os quais obtiveram maior resistência média de 588,9 KPa na bateria de poços 1, avaliado como muito baixo. A eficiência média dos poços foi de 90,44%, no entanto diagnósticos influentes na eficiência foram levantados, sugerindo-se proposições técnicas para readequação e elaboração de projetos pré-concebidos integrados a atividade de mineração. Ao fim, considera-se que o presente trabalho abre discussão para projeção de um modelo de drenagem ideal para as minas de bauxita, recomendando a realização de estudos contínuos ao trabalho realizado.

## ABSTRACT

GONÇALVES, Luiz Eduardo Sapori, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2018. **Efficiency of the Drainage System Adopted in the Region of Bauxite Mining in the Zona da Mata of Minas Gerais.** Adviser: Herly Carlos Teixeira Dias.

The exploitation of bauxite is an important economic activity for Brazil and for the State of Minas Gerais, second in the national stock with 16% of the reserves, about 560 million tons, where the main extraction areas are concentrated in the Zona da Mata, inserted in an aluminous belt with reserves of more than 100 million tons. In spite of the abundance and the intense exploration, the drainage systems of these mining are empirically conceived, being their success dependent, to a great extent, of the adequate resolution of its interactions with the water. In this context, this work aimed to evaluate the efficiency of the drainage system adopted in the bauxite mining region, in the area of the forest and propose technical adjustments aimed at its improvement and the creation of pre-designed drainage projects. The study was conducted from October 2016 to July 2017 in a bauxite exploration area located in the municipality of São Sebastião da Vargem Alegre, Minas Gerais State, Brazil, where daily rainfall was measured by a pluviograph. A topographic survey and the measurement of the settling wells, object of study, were carried out, divided in 8 batteries in a total of 23 wells, which had their volumes monitored from November 2016 to March 2017. The mechanical resistance to the penetration in the decanting wells was made with the aid of a digital penetrometer, where soil sampling was also carried out for granulometry analysis. For the permeability tests, soils were collected from the wells and in the laboratory the permeability was determined through the column percolation test, using the lowest values of density found in the field, and then the porosity was done by the pycnometer test. The data of precipitation, area of contribution, permeability and volumes collected were adjusted from the software Statistica version 13.0, piecewise regression for the juxtaposition of linear models, in order to describe the evolution of the transhipped volume and the volume retained as a function of precipitation. The results were submitted to coefficient of determination ( $R^2$ ) and graphical evaluation, with determination of the efficiency of the system batteries wells.



The permeability was very low with a maximum value of  $5.77 \times 10^{-5} \text{ cm.s}^{-1}$  for the well bore 3. The collected material presented a mean of 64.18% of clay, 22.09% of silt and 13.73% sand, being very clayey, with the presence of 2:1 clay minerals detected by field consistency test. The average porosity of 57.35%, which obtained a higher average resistance of 588.9 KPa in wells 1, evaluated as very low. The average efficiency of the wells was of 90.44%, however, influential diagnoses in the efficiency were raised, suggesting technical propositions for readjustment and elaboration of pre-conceived projects integrated to the mining activity. At the end, it is considered that the present work opens a discussion for the projection of an ideal drainage model for the bauxite mines, recommending that continuous studies be carried out.

## 1. INTRODUÇÃO

A bauxita, principal fonte de alumínio, é o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre. O Brasil possui um estoque de 3,6 bilhões de toneladas, cerca de 10% das reservas mundiais, ocupando em 2015 o terceiro lugar na produção mundial com 36,7 milhões de toneladas e faturamento aproximado de R\$ 67,5 bilhões (ABAL,2016).

Os depósitos de bauxita da Zona da Mata Mineira constituem um importante cinturão aluminoso que se estende de São João Nepomuceno até os municípios de Miraf e Muriaé no Estado de Minas Gerais, prolongando-se até o Estado do Espírito Santo, com reservas superiores a 100 milhões de toneladas (ROMANO e CASTAÑEDA, 2006). Só em 2015, as empresas que atuam em Minas Gerais comercializaram mais de 2,5 milhões de toneladas de bauxita extraídas no estado (ABAL,2016), onde as principais áreas de extração concentram-se na Zona da Mata.

Do montante de recursos produzidos parte é arrecadado por municípios mineradores através da Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CEFEM) e impostos, proporcionando aumento da receita municipal e desenvolvimento da infraestrutura regional. O aumento das oportunidades locais, principalmente naquelas em que a ausência da mineração dificultaria o emprego, é proporcionado através dos pagamentos dos royalties e arrendamento a proprietários rurais, além dos empregos diretos e indiretos fixando a comunidade do entorno.

Por outro lado, similarmente as demais atividades de exploração mineral a lavra da bauxita resulta em diversos impactos ambientais como: poluição visual, redução da camada fértil, redução da biodiversidade, alteração da topografia, compactação do terreno, alteração da infiltração de água, aumento do escoamento superficial e dos processos erosivos, redução da recarga do lençol freático e assoreamento de mananciais.

Atualmente, além da viabilidade técnica e econômica para a exploração mineral, existe também o aspecto da conservação ambiental no planejamento. Então, independentemente do porte de cada mineração, o planejamento dos trabalhos de prospecção, pesquisa mineral, lavra e beneficiamento, é essencial para o melhor resultado, tanto do aproveitamento racional de recursos não renováveis, como do

resultado financeiro para a empresa e a satisfação das demandas da sociedade, via empregos, impostos e responsabilidade social (PiIRES,2000).

São muitos os empreendimentos sem, ou com precário, controle ambiental, que comprometem diariamente os recursos naturais de nosso país (CASTRO et al., 2009). Contudo, a exploração de bauxita quando comparada principalmente com a agricultura e pecuária, geralmente produz impactos que se concentram em áreas restritas (BARROS et al., 2012) nas quais existem soluções para reduzir as perdas ambientais relacionadas com a água, principal agente impactante.

Para Domingues (2006), a viabilidade técnica e econômica de uma lavra está condicionada, com muita frequência, ao adequado conhecimento do contexto hidrológico no qual se localiza e ao subsequente desenho das atuações hidrológico-mineiras, que será tanto mais eficiente e de menor custo quanto antes sejam iniciadas. As técnicas para o controle das águas superficiais devem proporcionar um sistema que não seja antieconômico e que ao mesmo tempo não prejudique à natureza (JÚNIOR, 2014).

O sucesso de uma operação em mineração depende, em grande parte, da resolução adequada de suas interações com a água. Porém, comumente o controle das águas superficiais na exploração de bauxita é feito de forma empírica, ou seja, através do conhecimento obtido por meio da prática cotidiana baseada em um sistema rudimentar de tentativas, erros e acertos.

Assim, o presente trabalho teve por objetivo avaliar a eficiência do sistema de drenagem adotado na região de mineração de bauxita, na zona da mata mineira e propor adequações técnicas que visem sua melhoria, de modo a criar projetos de drenagem pré-concebidos conforme as características da área de exploração.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Mineração de bauxita

A rocha bauxita é de textura magmática e estrutura densa, sendo os principais minerais constituintes: a gibbsita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), a bohemita ( $\gamma\text{-AlOOH}$ ) e a diásporo ( $\alpha\text{-AlO}(\text{OH})$ ), misturados com hidróxidos de ferro, goethita ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ) e hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), além de caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), argila mineral e pequenas quantidades de  $\text{TiO}_2$  anatase (MACHADO et al, 2016). Segundo Melfi (1997), estudos até agora efetuados revelam que todas as bauxitas brasileiras são de origem laterítica, geologicamente mais novas, e constituídas essencialmente por gibbsita.

Os depósitos são amplamente distribuídos no território brasileiro, com o Estado do Pará com 2,7 bilhões detém quase 75% das reservas totais brasileiras, o Estado de Minas Gerais com 16% com 560 milhões de toneladas sendo o restante distribuído por ordem de importância nos Estados do Maranhão, Amapá, Santa Catarina, São Paulo, Rio de Janeiro, Amazonas e Goiás (MME,2010).

As jazidas de bauxita localizadas em Minas Gerais ocorrem normalmente em topografias acidentadas, em relevos no formato em meia laranja, os quais caracterizam-se por apresentar minério aflorando à superfície do terreno e concentrado em bolsões que se estendem por pequenas áreas (BARROS et al., 2012). Por outro, as minas localizadas ao Norte do país são planas, localizadas no topo dos platôs amazônicos ou terra firme, as quais apresentam um capeamento superficial de material estéril com cerca de 10 metros de espessura e se estendem por centenas de hectares (GUIMARÃES et al,2012).

Estima-se que a maioria das jazidas de bauxita laterítica (comum em regiões tropicais) são lavradas pelo método a céu aberto segundo o método por tiras ou strip mining (RÖHRLICH et al., 2001), sendo menos de 20% da produção de bauxita no mundo é obtida por métodos de lavra subterrânea (SAMPAIO et.al, 2009). Segundo Silva (2015), exploração a céu aberto consiste na extração de minério que se encontra em contato com o ar livre, através de sucessivos desmontes em áreas abrangendo o filão (intrusão de rochas eruptivas em fendas) e demais massa sólida circundante.

Para Guimarães et al (2012, p.4), as principais etapas comuns à maioria das situações de lavra de bauxita a céu aberto no Sul de Minas Gerais são: “Abertura de acessos, permite interligação da frente de lavra a estradas e rodovias já existentes; decapeamento da frente de lavra, atividade que tem relação direta com o processo de revegetação ao término da lavra, uma vez que o topsoil removido possui grande importância para o estabelecimento da vegetação, especialmente pelos elevados teores de matéria orgânica e nutricional, fauna edáfica e banco de sementes; abertura de bancadas que se faz fundamental nas minas localizadas em relevo mais acidentado, onde as bancadas geram condição adequada e segura para as operações de carregamento através de caminhões e escavadeiras; lavra, que corresponde a etapa em que o minério é explorado da mina; “transporte do minério”, que corresponde aos trajetos percorridos por caminhões da mina até a unidade de beneficiamento, ou até algum pátio intermediário de estocagem; acondicionamento da topografia, primeira etapa que ocorre após a exaustão da mina, sendo responsável pela conformação do terreno com retorno do topsoil para uma feição topográfica similar ao relevo natural; revegetação, atividade que apresentará variações em função do objetivo final ser o uso econômico da área ou a restauração de ecossistemas nativos”.

A bauxita após o processo de lavra, é beneficiada após passar em Usina Tratamento de Minério (UTM), por britagem, lavagem e secagem, resultando na bauxita comercial ou em bruto, a qual tem como principal destino de utilização as usinas de refino para a produção de alumina e usos não metalúrgicos como cimento, abrasivos, produtos químicos (DNPM, 2008).

No entanto, a produção de bauxitas não metalúrgicas emprega as mesmas técnicas de beneficiamento usadas para a bauxita de grau metalúrgico (SAMPAIO et.al, 2009). A alumina, produto originado da bauxita em bruto, pode ser obtida principalmente, pelo processo Bayer, em que quatro a sete toneladas de bauxita, produzirá duas toneladas métricas de alumina que resultará em uma tonelada métrica de alumínio primário (SILVA FILHO et al., 2007).

## 2.2 Drenagem superficial em minas de bauxita

Drenagem superficial é o ato de escoar as águas superficiais, provindas principalmente de precipitações, por meio de estruturas e instalações naturais ou artificiais, que possuem objetivo de facilitar o escoamento das águas de forma a manter ao máximo o seu caminho natural (SILVEIRA, 2014).

Segundo Bastos (2000), a função do sistema de drenagem em uma mineração é evitar danos internos, isolar a exploração e remover a água do interior da mina, sendo dividida respectivamente em três principais sistemas: escoamento e acumulação, isolamento e remoção.

Alguns dispositivos que constituem o processo de drenagem como: valetas, diques de amortecimento, áreas de amortecimento, canaletas, bueiros, descida d'água, corta rios, reservatórios de detenção e retenção, poços de decantação e talude, podem assim serem definidos:

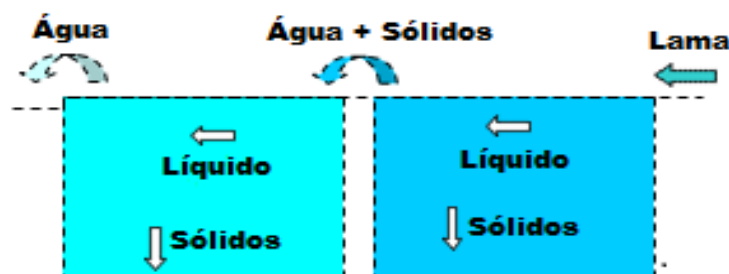
- Valetas (valas): constituem-se em dispositivos de drenagem localizados nas cristas de cortes ou pés de aterro, afastadas das vias de tráfego em que geralmente apresentam formato trapezoidal ou triangular, podendo ser revestidas ou não (DNIT, 2006).
- Diques de Amortecimento: são pequenas barragens, executadas dentro das valetas, com a finalidade de reduzir a velocidade d'água em terrenos muito inclinados (DNIT, 2006).
- Área de Amortecimento: pequeno reservatório que armazena o excesso de vazão pluvial a fim de dissipar a energia das águas provenientes das descidas d'água, evitando a conseqüente erosão do terreno (MORALES, 2003)
- Canaleta: estrutura utilizada para conduzir o escoamento das águas pluviais, com sedimentos para os poço de decantação, reduzindo o processo de a erosão do solo (GOMES; WERNECK, 2017).
- Bueiros: são estruturas instaladas no fundo de talvegues ou em locais de deságue de sistemas de drenagem, ou transversalmente sob o leito de estradas e ferrovias, destinados a conduzir as águas de pluviosidade, córregos, açudes ou bacias por elas cortados (MORALES, 2003).
- Descidas D'água: constituem-se em dispositivos de drenagem construídos, de forma a promover o escoamento das águas, provenientes de áreas ou talvegues interceptados pela terraplanagem, de maneira que elas vertam sobre

os taludes de corte ou aterros, de forma favorável e ordenada, sem provocar erosões, até o ponto de deságue (DNIT,2006).

- Corta Rios: são canais de desvio abertos utilizados para desviar pequenos cursos d'água com potencial de interferir na diretriz de uma estrada ou rodovia (DNIT,2006).
- Poços de detenção e retenção: são dispositivos utilizados para armazenar águas pluviais por um período tempo, reduzindo os problemas de enchentes durante as chuvas e não apresentam a função de reter resíduos sólidos e sedimentos presentes na bacia, sendo o acúmulo desses, um problema em chuvas intensas (SIVEIRA,2014).
- Talude: superfície inclinada de origem natural, quando se dá pela ação geológica e das intempéries (chuva, vento, entre outros), ou artificial, surge das interferências humanas no meio, sendo talude de corte quando é através da retirada de material e talude de aterro quando ocorre por deposição, terraplenagem ou bota-fora (SANTOS, 2014).

Para Paiva (2008), frequentemente os termos “bacias de decantação” e “bacias de sedimentação” empregados em estações de tratamento de água e em várias outras áreas afins, confundem-se por suas funções, diferenciando-se da seguinte maneira:

- Bacia de sedimentação: É o local onde a água fica em repouso por algum tempo para que ocorra a sedimentação dos sólidos em suspensão somente por processo gravimétrico (Figura 1).
- Bacia de decantação: É aquela onde se dá a decantação dos sólidos em suspensão por injeção de reagentes coagulantes ou flocculantes.



**Figura 1** – Exemplo de tanque de sedimentação atuando por gravimetria.  
Fonte: Adaptado de Bastos, 2000.

A prática mecânica do terraceamento, constantemente utilizada em plantios e pastagens comerciais, pode ser uma técnica usual nesses sistemas circundantes a área de mineração de bauxita, sendo parte complementar e importante do sistema de drenagem, cujo segundo Pires e Souza (2013) o princípio constitui no parcelamento da declividade proporcionando a diminuição da velocidade da enxurrada, facilitando a absorção da chuva pelo solo, ou a drenagem lenta e segura do excesso de água.

É uma prática conservacionista de caráter mecânico formado pela associação de um canal (valeta) com um camalhão (monte de terra ou dique) no sentido transversal ao declive do terreno, em intervalos dimensionados, no qual o seu funcionamento pleno está condicionado principalmente a declividade em que é planejado e executado e a sua conservação de custo relativamente alto (LOURA, 2011).

Logo, na sua implantação deve-se fazer um levantamento das características da chuva, como quantidade, duração e intensidade, e da paisagem, comprimento da rampa, rugosidade do terreno, profundidade, permeabilidade e textura do solo, e práticas de manejo agrícola, como plantio convencional, cultivo mínimo, plantio direto, para que se tenha segurança e eficiência no controle da erosão, pois o rompimento de um terraço pode levar à destruição de todos que estiverem abaixo deste, acarretando grandes prejuízos (MACHADO, 2016).

Segundo Paraná (1994), algumas causas do rompimento de terraço são: manejo inadequado do solo, mau dimensionamento dos terraços e espaçamento excessivo entre os terraços, má localização dos terraços, defeitos na construção, presença de extremidades abertas nos terraços, convergência para os terraços de águas vindas de fora da área terraceada, movimento de máquinas e animais sobre o camalhão, falta de manutenção e limpeza no canal, ocorrência de chuvas de alta intensidade, construção de terraços em nível em solos de baixa permeabilidade.

Os terraços podem ser classificados quanto à função que exercem, à largura da base, ao processo de construção, à forma do perfil do terreno e ao alinhamento (PIRES e SOUZA, 2013). Solos pedregosos, muito rasos, com subsolo adensado ou com relevo muito íngreme, são situações que não favorecem a prática dos terraços, sendo potencializado quando associado com outras atividades conservacionistas (EMBRAPA, 2012).



## 2.3 Permeabilidade

A permeabilidade é a propriedade que o solo apresenta de permitir o escoamento da água através dele, sendo o seu grau de permeabilidade expresso numericamente pelo "coeficiente de permeabilidade" (CAPUTO,1996). Logo, será determinada em função da existência de vazios interconectados pelos quais a água pode fluir de pontos de alta energia para pontos de baixa energia (DAS, 2007).

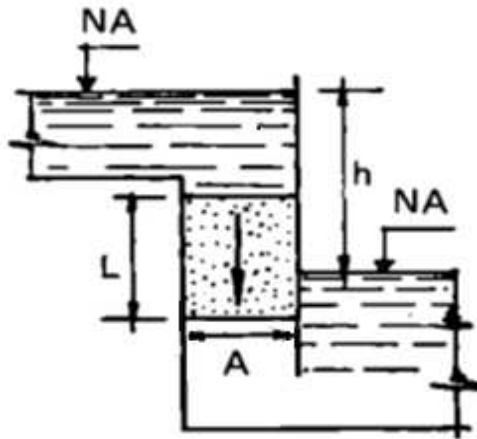
O conhecimento da permeabilidade, ou percolação, da água nos solos, reside no fato de que esta interfere num grande número de problemas práticos, tais como drenagem superficial, cálculo de vazões, análise de recalques, estudos de estabilidade de taludes e dentre outros (GOMES e DA COSTA, 2017).

A permeabilidade é uma das propriedades do solo com maior faixa de variação de valores (MACHADO, 1997), devido, segundo Alonso (2005), a presença de alguns fatores físicos responsáveis pela facilidade com que a percolação d'água ocorre, tais como: índice de vazios, granulometria, estrutura, arranjo das partículas, conectividade dos poros e grau de saturação. Já com relação aos fluidos, a viscosidade e a massa específica, são os principais determinantes da permeabilidade (MASSARANI,2002).

A determinação do coeficiente de permeabilidade é feita tendo em vista a lei experimental de Henry Darcy (1856), eficiente segundo Taylor (1948) em líquido não viscoso e fluxo laminar, sendo o último provocado por partículas com diâmetro menor que 0,5 mm ( $D_{10} < 0,5\text{mm}$ ), ou seja, na prática siltes, areias e argilas em geral satisfazem a lei de Darcy. Solos com partículas de diâmetro maior que 0,5 mm ( $D_{10} > 0,5\text{mm}$ ) geram fluxo turbulento.

Henry Darcy correlacionou a velocidade de percolação ou velocidade de descarga ( $V$ ) de um fluido através de um meio poroso com um gradiente hidráulico ( $i$ ), representado pela Equação (1). O gradiente hidráulico corresponde uma relação entre a perda de carga ( $h$ ) e a espessura da camada de solo medida na direção do escoamento ( $L$ ), conforme a Equação (2).

Na prática, ocorre um fluxo por meio de uma área  $A$ , onde  $Q$  representará a vazão e  $V$  a velocidade superficial de percolação, obtemos a Equação 3. Por fim, temos a Equação 4 que representará o coeficiente de permeabilidade ( $k$ ).



**Figura 2** – Água percolando em um permeâmetro.  
 Fonte: Adaptado de Caputo, 1996.

- $V = K \cdot I$  Equação 1
- $I = h/L$  Equação 2
- $Q = V \cdot A$  Equação 3
- $Q = K \cdot I \cdot A$  Equação 4

O valor do coeficiente de permeabilidade (K) é comumente expresso como um produto de um número por uma potência negativa de 10 (CAPUTO,1996). Na Tabela 1, segue os valores típicos de permeabilidade dos solos apresentados por Vargas (1977). Segundo o autor, solos com coeficiente de permeabilidade maior que  $10^{-5} \text{ cm.s}^{-1}$ , são classificados como permeáveis ou com drenagem livre e para valores menores são classificados como impermeáveis ou com drenagem impedida.

**Tabela 1-** valores típicos de permeabilidade dos solos.

Solos	Grau de Permeabilidade	Tipos de Solos	$k(\text{cm.s}^{-1})$
<b>Permeáveis</b>	Alta	Pedregulho	$>10^{-1}$
	Média	Areias	$10^{-1}$ a $10^{-3}$
	Baixa	Siltes e Argilas	$10^{-3}$ a $10^{-5}$
<b>Impermeáveis</b>	Muito Baixa	Argilas	$10^{-5}$ a $10^{-7}$
	Baixíssima	Argilas	$<10^{-7}$

Em geral, solos mais finos, argila principalmente, possuem índices de vazios geralmente superiores àqueles alcançados pelos solos grossos, contudo, apresentam valores de coeficientes de permeabilidade muito inferiores a estes (MARANGON, 2013).

Isso ocorre pois, os fenômenos de adesão (interação entre as moléculas de água) e coesão ou capilaridade (interação moléculas de água e parte sólida do solo) em solos argilosos são mais intensos, devido a sua estrutura em blocos e maior proporção de microporos (LEPSCH, 2002).

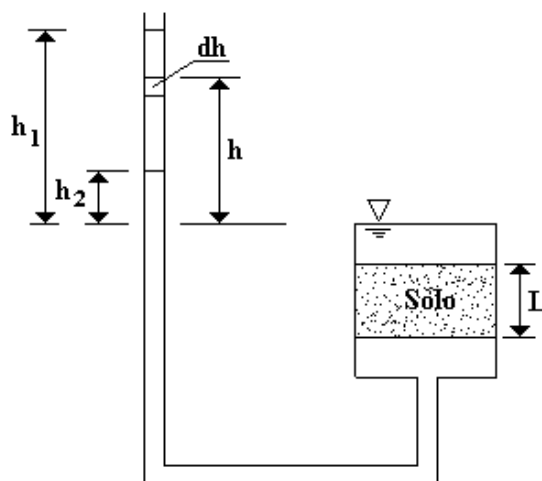
### **2.3.1 Determinação da permeabilidade**

Segundo Pinto (2006), a determinação do coeficiente de permeabilidade (K) pode ser feita por meio de métodos indiretos (fórmula de Hazen), no laboratório através dos permeâmetros e in loco pelos ensaios de bombeamento ou tubo aberto, sendo para as argilas, a partir do “ensaio de adensamento”.

Recomenda Gerscovich (2011), nos ensaios de laboratórios através dos permeâmetros, os de carga variável (nível variável) serão usados preferencialmente para solos finos, com predominância de silte e/ou argila de baixa permeabilidade. Os de carga constante (nível constante) serão utilizados para estruturas granulares, em geral solos mais permeáveis com quantidades razoáveis de areia e/ou pedregulho.

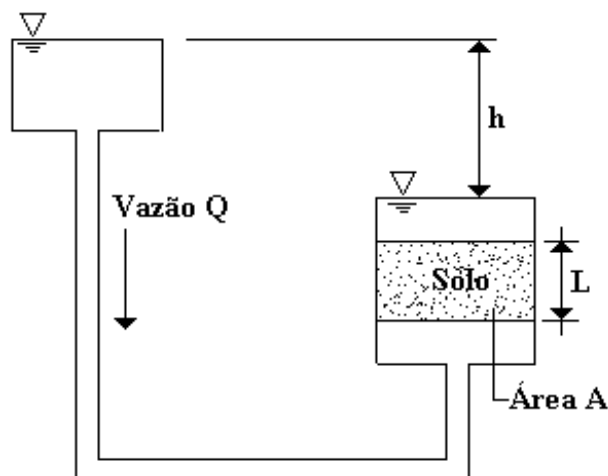
De maneira geral, pode-se observar que os ensaios de laboratório apresentam como grande vantagem ter por se controlar as condições de realização do ensaio: como saturação, carga hidráulica, nível de tensões efetivas, direção de fluxo, anisotropia hidráulica, tempo e custo dos ensaios. Por outro lado, as características dos corpos de prova nem sempre são mantidas durante a extração, transporte da amostra e moldagem do corpo de prova, além de se considerar um volume reduzido de solo (FANTINATTI et al., 2006).

Durante o ensaio de cargas variáveis, medem-se os valores  $h$  obtidos para diversos valores de tempo decorrido desde o início do ensaio, conforme a Figura 3. A cada medida, são anotados os valores da temperatura para correção da viscosidade do fluido. Por fim, aplica-se o coeficiente de permeabilidade dos solos através da Equação 5 (MARANGON, 2013).



**Figura 3**– Modelo de água percolando em um permeâmetro de carga variável.

Nos ensaios de carga variável, existem dois reservatórios, nos quais os níveis de água são mantidos constantes (Figura 4). Mantida a carga  $h$ , durante um certo tempo constante, a água percolada é colhida e o seu volume é medido (MARANGON,2013).



**Figura 4**– Modelo de água percolando em um permeâmetro de carga constante.

Conhecidas o comprimento  $L$  e a área da seção transversal  $A$ , para ambos os casos emprega-se a lei de Darcy, simplificada pela Equação 5.

$$Q = K \cdot \frac{h}{L} \cdot A \quad \text{Equação 5}$$

Pacheco e Silva (2005), caracteriza os ensaios de percolação de coluna semelhante aos ensaios de condutividade hidráulica de carga constante podendo ser usado para matérias que possuem grau de permeabilidade baixos, ou seja, pequenos valores de coeficientes de permeabilidade. O autor destaca que o objetivo do ensaio é

realizar a percolação de soluções representativas que contenham constituintes químicos através de um corpo de prova.

## **2.4 Resistência Mecânica do Solo a Penetração**

Resistência mecânica do solo é interligado ao grau de compactação do solo resultante de complexas reações químicas, físicas e biológicas influenciadas por fatores como: clima, tempo, topografia, seres vivos e manejo do solo. Tais reações estão ligadas a estrutura do solo e afetarão diretamente na infiltração de água, erosão hídrica, desenvolvimento de plantas, mudanças na distribuição e tamanhos dos poros, estabilidade dos agregados e densidade do solo (GOMES et al., 2015).

Estrutura do solo consiste no conjunto de partículas primárias do solo (areia, silte e argila) que por meio de processos físicos, físico-químicos e biológicos, agrupam-se em unidade compostas chamadas de agregados, elementos estruturais ou unidades estruturais, que diferenciaram entre si em forma tamanho, estabilidade e coerência (KIEHL, 1979).

A densidade do solo, macro e microporosidades, estabilidade de agregados, condutividade hidráulica, infiltração da água, resistência do solo a penetração dentre outros, são atributos físicos que avaliará a estrutura do solo. Estes atributos podem ser utilizados como indicadores de susceptibilidade à perda da produtividade, degradação ambiental, adensamento e compactação (GOMES et al., 2015).

Segundo Mantovani (1987), o desenvolvimento de camadas impermeáveis acontece quando ocorre uma pressão ao solo com a quebra dos agregados, destruindo os poros e a presença de ar e água reduz, aumentando a densidade global.

Em decorrência do aumento da atividade agrícola das últimas décadas, o tráfego de máquinas pesadas tem acelerado a compactação do solo tanto na camada arável quanto no subsolo (DUARTE, 2006). Contudo, em levantamento realizado por Melo et al. (2002), no estado de São Paulo, o principal fator de compactação tem sido a atividade pecuária intensiva

A Tabela 2 mostra os limites de resistência de solos à penetração e graus de limitação do crescimento segundo Canarache 1990 citado por Ribeiro et al.,2006.

**Tabela 2** - Limites de classes de resistência de solos à penetração e graus de limitação ao crescimento das raízes (CANARACHE, 1990).

Classes	Limites (Mpa)	Limitações ao crescimento da Raiz
Muito baixa	< 1,1	Sem limitação
Baixa	1,1 a 2,5	Pouca limitação
Média	2,6 a 5,0	Algumas limitações
Alta	5,1 a 10,0	Sérias limitações
Muito alta	10,1 a 15,0	Raízes praticamente não crescem
Extremamente alta	> 15,0	Raízes não crescem

Em geral, solos secos ou de maior densidade apresentam maiores resistência a penetração a um solo mais úmido ou de menor densidade. Para valores de umidades iguais, solo argiloso apresentam maior resistência que um solo arenoso. Segundo Busscher (1990), a resistência à penetração é diretamente dependente da densidade do solo, textura e umidade sendo que na avaliação com penetrômetros ou penetrógrafos, é sempre necessário o teste de teor de umidade do solo para se realizar a comparação dos resultados.

Molin et al. (2012) comparou para diagnóstico de compactação do solo através do Índice de Cone (IC) os seguintes equipamentos: penetrômetro de impacto, um penetrômetro de registro eletrônico de dados e de acionamento manual e um de acionamento hidráulico, em três ambientes. De maneira geral, os equipamentos não produziram resultados com diferenças relevantes para o diagnóstico de compactação do solo.

Um fator limitante é que a resistência à penetração não é capaz de identificar a presença de rachaduras e de poros biológicos existentes no solo podendo haver uma subestimação dos valores de compactação (SILVA et al., 2003). Apesar disso, os penetrômetros ainda oferecem boas estimativas da resistência do solo à penetração de raízes, sendo bastante utilizados para estudos do efeito de manejo sobre a compactação do solo (REICHERT et al., 2007).

## 2.5 Sedimentologia

Sedimentologia de maneira simples, pode ser definido como o estudo científico dos sedimentos (WADELL, 1932), ou seja, é o estudo das propriedades dos sedimentos (textura, dimensão, forma das partículas e etc), sendo que os processos de sua formação (remobilização, transporte e deposição de partículas) é denominado por Dinâmica Sedimentar (DIAS, 2004).

Todavia, como também reconhecido por McManus (1975), Carvalho (1994) e Oliveira (2002), não existe um consenso na definição do termo sedimento, sendo comumente usados ora referindo-se ao “material desagregado de rochas intemperizadas ou de material biológico”, ora ao “material sólido em suspensão na água ou depositado”.

Os parâmetros físicos determinantes nos estudos dos sedimentos são a densidade, o tamanho, a forma e a rugosidade da superfície das partículas, granulometria dos sedimentos, e a análise textural que provavelmente é a mais ressaltante das propriedades (OLIVEIRA,2002).

Nesse contexto, ocorre o dimensionamento das partículas do sedimento, onde são quantificadas em grandes classes dimensionais, ou seja, análise textural, na qual serão normalmente classificadas em 4 classes texturais (cascalho, areia, silte, argila), caracterizadas por propriedades físicas diferentes (Tabela 3).

**Tabela 3-** Propriedades físicas das principais classes texturais: cascalho, areia, silte e argila.

	Cascalho	Areia	Silte	Argila
Dimensões	superiores a 2mm	entre 2mm e 63 $\mu$	entre 63 $\mu$ e 4 $\mu$	inferiores a 4 $\mu$ (ou 2 $\mu$ )
Porosidade	grande	média a pequena, dependendo do arranjo, isto é, da forma como as partículas se dispõem umas relativamente às outras	muito pequena	extremamente reduzida; em geral existe impermeabilidade
Fenômenos de capilaridade	não propiciam, em geral, capilaridade significativa	existem fenômenos de capilaridade	intensos fenômenos de capilaridade	intensos fenômenos de capilaridade
Plasticidade	plasticidade nula	plasticidade nula	alguma plasticidade	elevada plasticidade
Fenômenos de adsorção	em geral nulos	geralmente nulos a pequenos	existência de fenômenos de adsorção	os fenômenos de adsorção e de absorção são frequentemente intensos

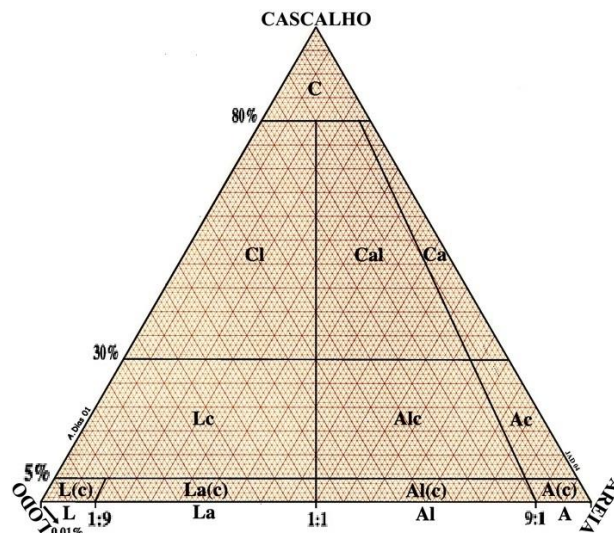
Fonte: Adaptado de Dias,2004.

Em geral, estão presentes nos sedimentos as quatro classes texturais em que normalmente uma será dominante. Logo, suas características físicas são heterogêneas, variando conforme a proporção de cada textura presente no sedimento (DIAS, 1987).

As classificações dos sedimentos é feita em geral por diagramas triangulares, sendo a mais comumente divulgada o Diagrama de Folk (1954). Essa classificação baseia-se em dois diagramas triangulares, um para sedimentos grosseiros (Figura 5) e outro para sedimentos finos (Figura 6), os quais se complementam correspondendo a uma representação bidimensional de um diagrama quaternário (DIAS,2004).



Os diagramas triangulares baseiam-se num triângulo, em que cada vértice corresponde a 100% (Figura 5 e 6) de uma classe textural (por exemplo, areia, silte e argila) e os lados opostos correspondem a 0%. As retas perpendiculares do triângulo, estão divididas em 100 partes, cada uma correspondendo a 1%. Assim, o triângulo base é dividido em pequenos triângulos com uma unidade de lado.

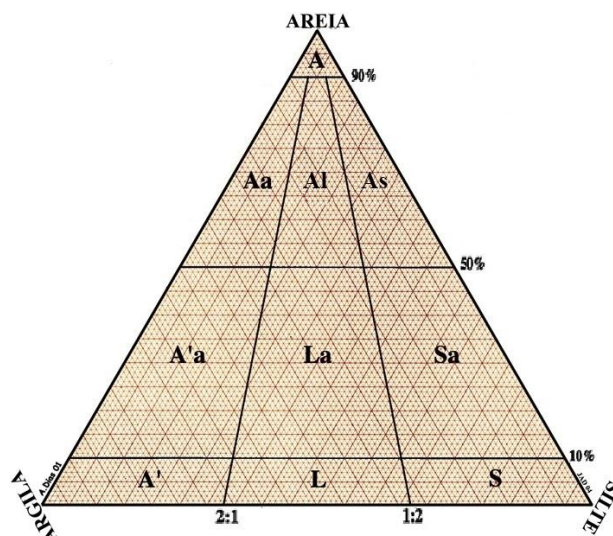


**Figura 5** - Diagrama - triangular de Folk para classificação dos sedimentos grosseiros. Fonte: Adaptado de Dias, 2004.

A classificação dos sedimentos grossos é constituída por 15 termos, na versão portuguesa, são os seguintes:

**Tabela 4-** Termos da classificação dos sedimentos grosseiros do Diagrama Triangular de Folk segundo versão portuguesa de Dias, 2004.

<b>C</b> - cascalho	<b>La</b> - lodo arenoso
<b>Ca</b> - cascalho arenoso	<b>A</b> - areia
<b>Cal</b> - cascalho areno-lodoso	<b>Al</b> - areia lodosa
<b>Cl</b> - cascalho lodoso	<b>Alc</b> - areia lodo-cascalhenta
<b>L</b> - lodo	<b>Al(c)</b> - areia lodosa ligeiramente cascalhenta
<b>Lc</b> - lodo cascalhento	<b>Ac</b> - Areia cascalhenta
<b>L(c)</b> - lodo ligeiramente cascalhento	<b>A(c)</b> - areia ligeiramente cascalhenta
<b>La(c)</b> - lodo arenoso ligeiramente cascalhento	



**Figura 6** - Diagrama - triangular de Folk para classificação dos sedimentos finos.  
 Fonte: Adaptado de Dias, 2004.

A classificação dos sedimentos finos é constituída por 10 termos, na versão portuguesa, são os seguintes:

**Tabela 5-** Termos da classificação dos sedimentos finos do Diagrama Triangular de Folk segundo versão portuguesa de Dias, 2004.

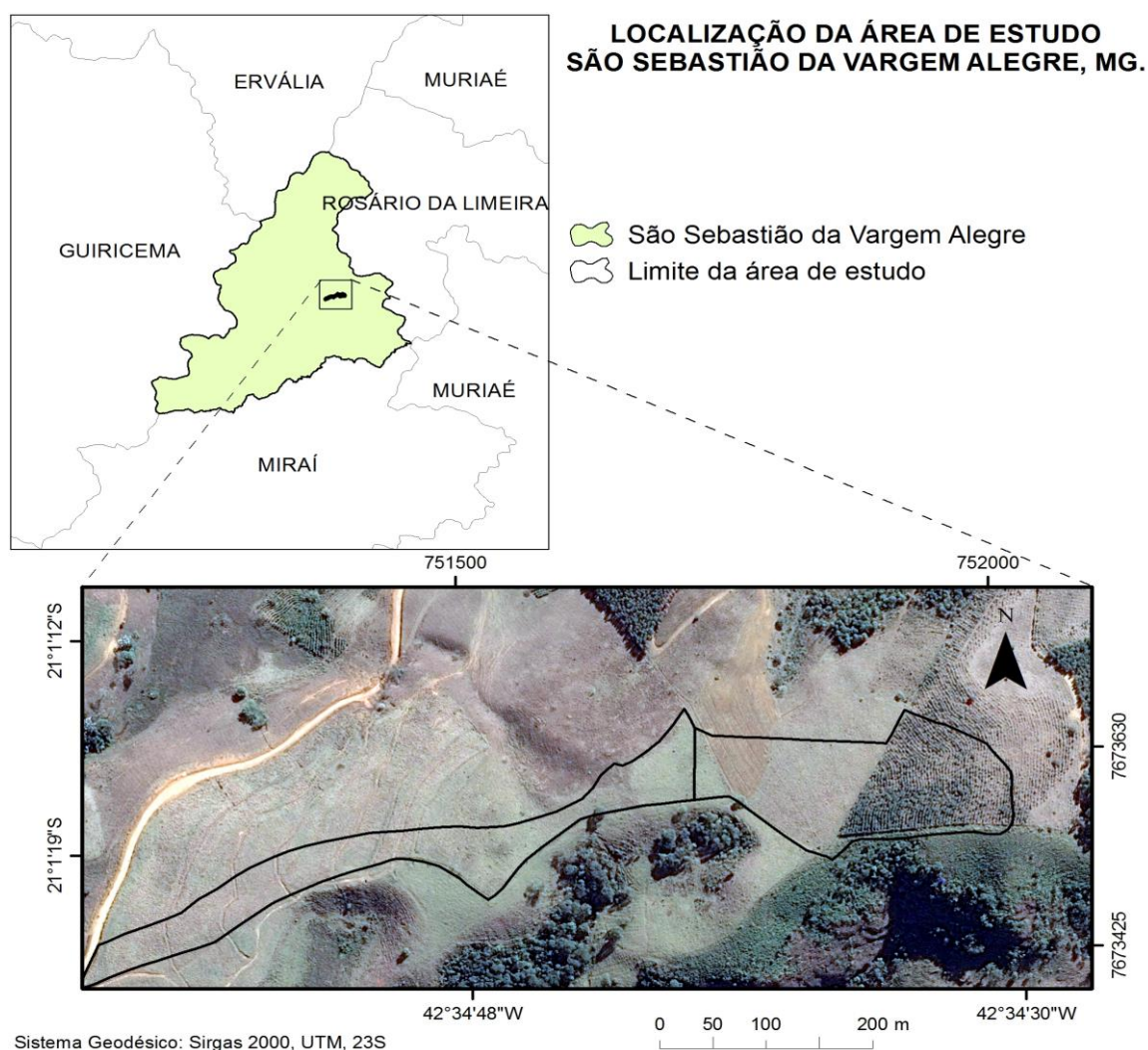
<b>A</b> - areia	<b>La</b> - lodo arenoso
<b>Aa</b> - areia argilosa	<b>Sa</b> - silte arenoso
<b>Al</b> - areia lodosa	<b>A'</b> - argila
<b>As</b> - areia siltosa	<b>L</b> - lodo
<b>A'a</b> - argila arenosa	<b>S</b> - silte

A sedimentologia usada em geral em estudos na oceanográficos a fim de elucidar o comportamento e composição dos sedimentos nos oceanos, foi utilizada e adaptada para a análise textural dos sedimentos acumulados em poços de decantação, por entender que esse influenciará diretamente na dinâmica de infiltração das águas nos poços e que essa ciência auxiliará na explicação dos eventos ocorridos.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Localização e Caracterização da Área de Estudo

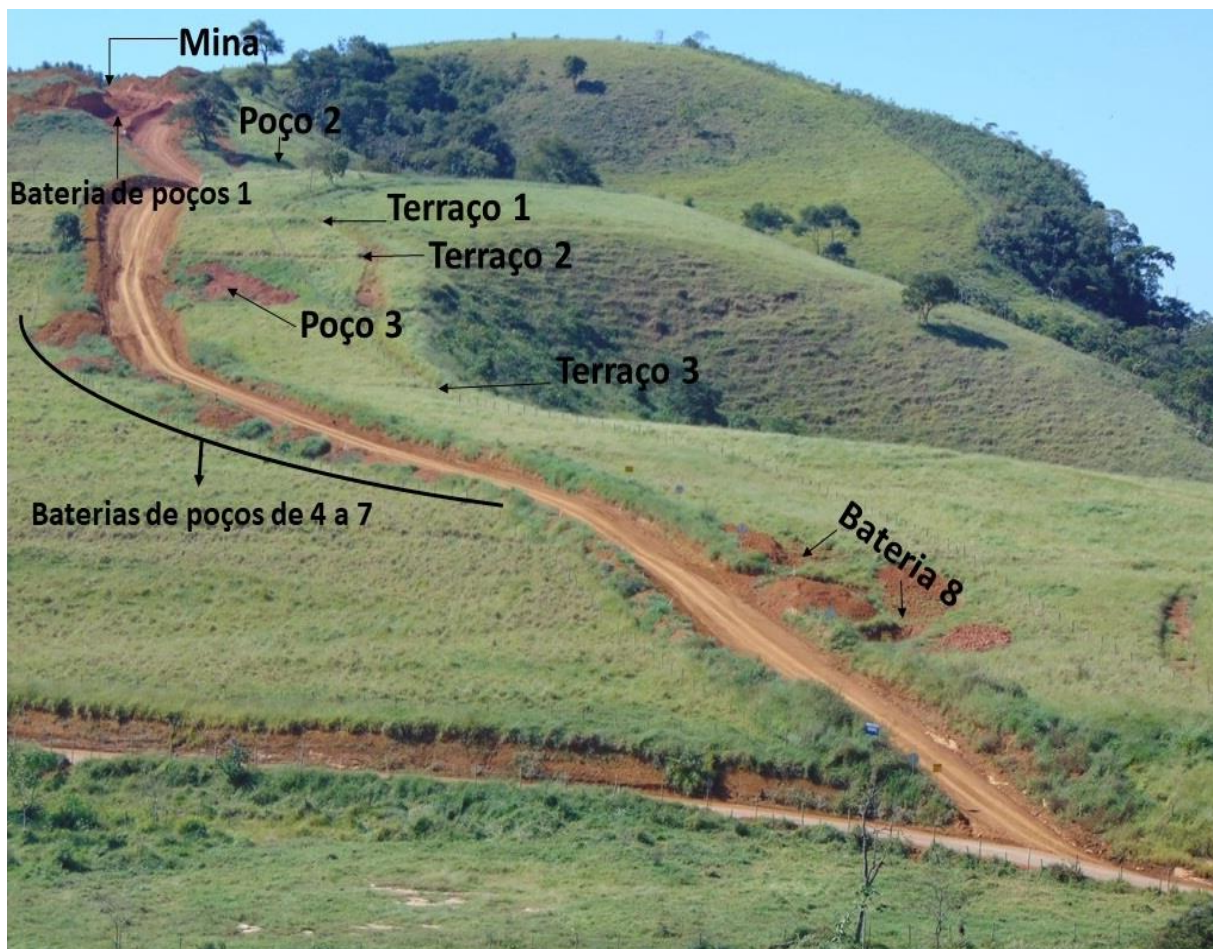
O estudo na área foi conduzido no período de Outubro de 2016 a Julho de 2017, em uma área de exploração de bauxita, localizada no município de São Sebastião da Vargem Alegre, Zona da Mata de Minas Gerais ( $21^{\circ}1'19''\text{S}$ ,  $42^{\circ}34'48''\text{W}$ ) sendo obtida por concessão pela Companhia Brasileira de Alumínio – Votorantim Metais (CBA-VM) no ano de 2015, por um período de 5 anos, onde iniciaram as atividades que permaneceram até o fim dos estudos (Figura 7).



**Figura 7** – Destaque para localização da área de estudo, município de São Sebastião da Vargem Alegre, MG.

Fonte: Adaptado do Google Earth, 2014.

O corpo de mineração de bauxita possui cerca de 5,49 hectares, com altitudes, máxima e mínima, de 906 e 795,31m respectivamente (Figura 7). A vegetação nativa é composta pelo domínio de Floresta Estacional Semidecidual Mata Atlântica, na qual foi substituída gradativamente por pastagens extensivas para bovinocultura (braquiária e capim gordura), café e eucaliptocultura, que constituem a base econômica do município.



**Figura 8** – Caracterização da área de estudo com resíduo de braquiária, estrada, terraços e seus respectivos poços de decantação e fragmentos remanescentes de vegetação nativa.

Anteriormente ao processo de exploração, a atividade predominante era a criação de bovinos com a presença de braquiária na totalidade do terreno. Com a abertura da lavra, houve a construção de estradas e poços de decantação, além da manutenção de um resíduo de braquiária (Figura 8), formada por solos argilosos, pouco profundos e subsolo adensado com a presença animal esporádica devido a invasões (Figura 9).



**Figura 9** – Resíduo de braquiária com a presença animal no corpo de mineração no município de São Sebastião da Vargem Alegre, MG.

Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é Cwa, caracterizado por ser temperado húmido, de invernos mais secos e verões quentes de maior pluviosidade. A temperatura média é cerca de 19.8 °C com a pluviosidade média anual de 1356 mm (LOPES et al., 1988).

O solo dominante na região é o Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico (BORGES, 2013), cujo destaca-se pela sua baixa fertilidade natural. A principal característica da paisagem (Figura 10), é a presença de um relevo fortemente ondulado e montanhoso, denominado morros em meia-laranja (NUNES et al.,2001).



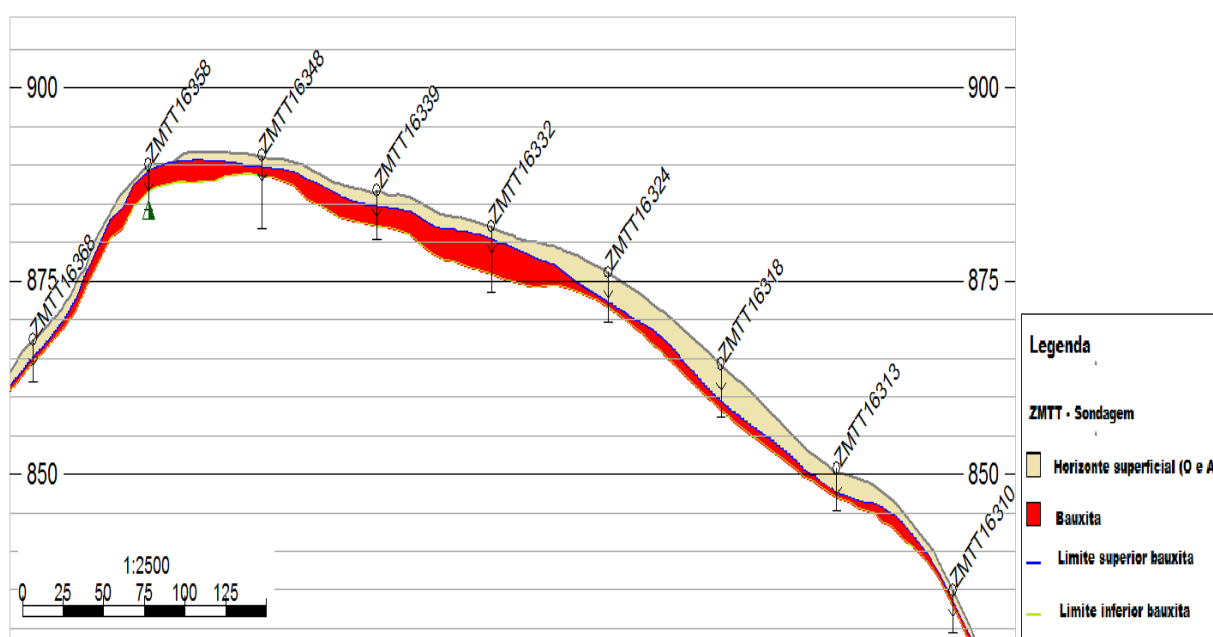
**Figura 10** – Área onde foi onde conduzido o estudo e sua estrada de acesso, ao fundo, com sua respectiva paisagem ondulada e montanhosa (morros em meia-laranja).

O material rochoso é denominado Charnockito, afloram nas bases dos morros (Figura 11), dando origem a um solo Saprolítico rico em silte e argila, de granulação grosseira.



**Figura 11** – (a,b) Afloramento do material rochoso Charnockito na base do corpo de mineração, no município de São Sebastião da Vargem Alegre, MG.

A bauxita é de origem laterítica e encontra-se superficialmente, logo abaixo do horizonte orgânico e argiloso, apresentando uma espessura variada entre uma fina camada próxima a 1 metro até 4,5 metros aproximadamente (Figura 12). O manto de alteração identificados, em geral, na mesorregião da zona da mata mineira é formado basicamente por 3 horizontes: i) horizonte argiloso caulínítico, ii) horizonte bauxítico e iii) sólum (SOARES,2013). O método de extração da bauxita é a céu aberto pelo sistema de bancadas.



**Figura 12** – Croqui de área de exploração de extração de bauxita evidenciando os horizontes superficiais O e A e a camada de bauxita (SILVA, 2015).

O objeto de estudo são os poços de decantação (Figura 13) que compõe o sistema de drenagem da estrada de acesso a mina submetida a extração de bauxita no período de estudo, onde foram monitorados 23 poços, divididos em 8 baterias. Na Tabela 6 contém o esquema de divisão dos poços.

**Tabela 6** – Esquema de divisão dos poços de decantação que compõe o sistema de drenagem da estrada de acesso a mina.

Bateria	Número de poços	Descrição
1	5	1 ; 1.1 ; 1.2 ; 1.3 ; 1.4
2	1	2
3	1	3
4	4	4 ; 4.1 ; 4.2 ; 4.3
5	4	5 ; 5.1 ; 5.2 ; 5.3
6	2	6 ; 6.1
7	4	7 ; 7.1 ; 7.2 ; 7.3
8	2	8 ; 8.1

Esses poços, que podem estar em sequência ou não, tem por função reter o restante do escoamento superficial da água de precipitações proveniente das áreas de contribuição dos poços, de modo a reduzir a energia cinética da água e proporcionar a deposição de sólidos em suspensão por processo gravimétrico.



**Figura 13** – Poços de decantação 1.3, 1.2 e 1.1 respectivamente em sequência, pertencentes a bateia de poços de decantação 1 da área de estudo, retendo o escoamento superficial proveniente da Mina.

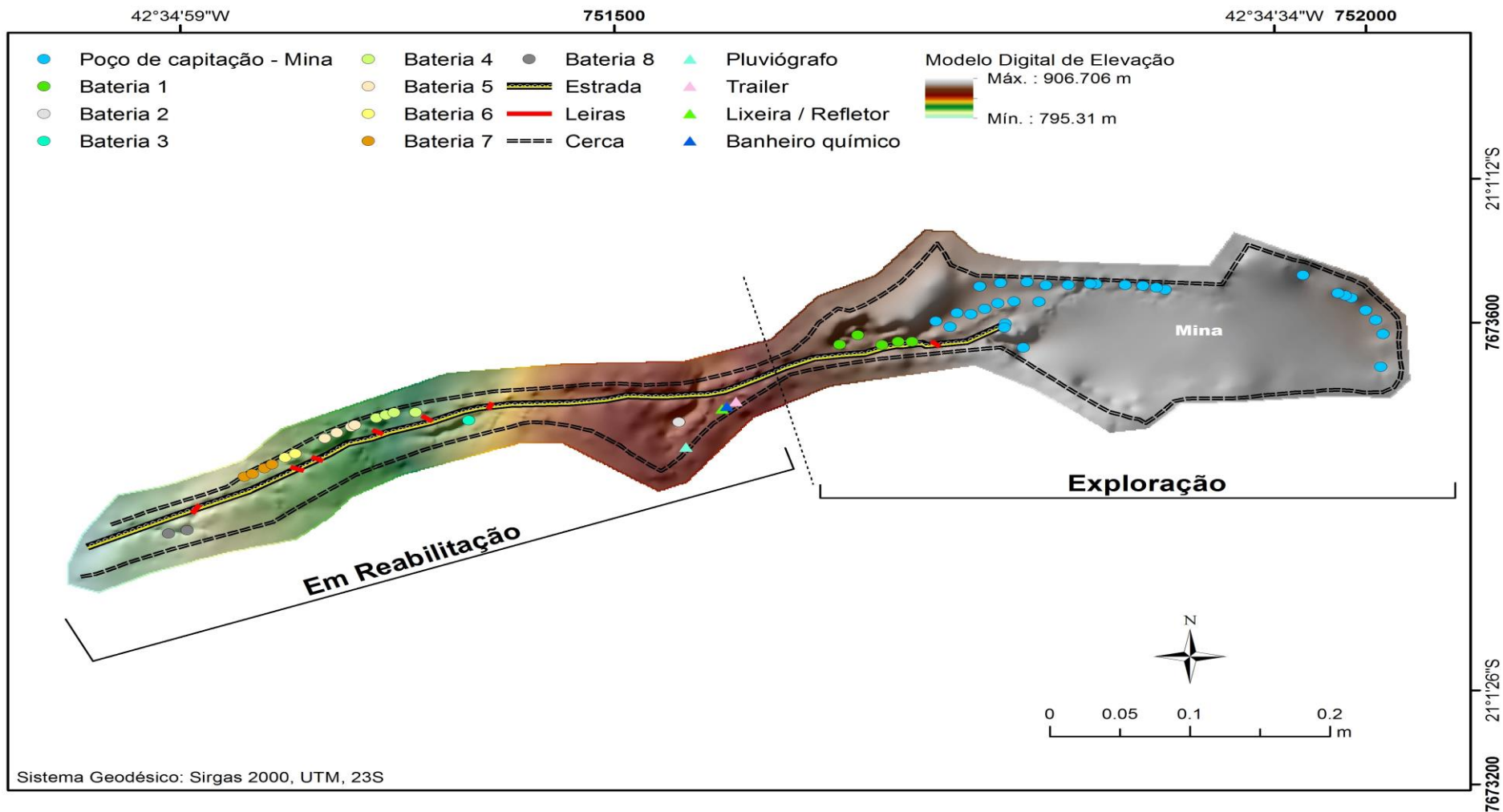
A área da mina possui um sistema de drenagem próprio contendo um talude que circunda a parte anterior da mina e as laterais havendo apenas uma saída que dará acesso a estrada (Figura 14). Internamente existe um conjunto de poços de decantação interligados, de modo a receber toda água gerada por precipitação no interior da mina. Externamente, existe uma área de amortecimento (Figura 15), responsáveis por possíveis escoamentos da mina para o exterior, evitando assim que a água chegue a estrada. A função do sistema apresentado, é conduzir a água para locais adequados, afastando-a do trabalho, evitando o seu acúmulo em locais que dificulte a mineração e coloque em risco a segurança dos operadores.

A área de estudo encontra-se em duas etapas de trabalho, onde um trecho foi lavrado inicialmente, sendo submetido ao processo de recuperação em que houve o plantio de braquiária e a construção dos poços de decantação com a manutenção da estrada, possibilitando o acesso a parte superior do corpo que encontra-se em processo de lavra. (Figura 14).

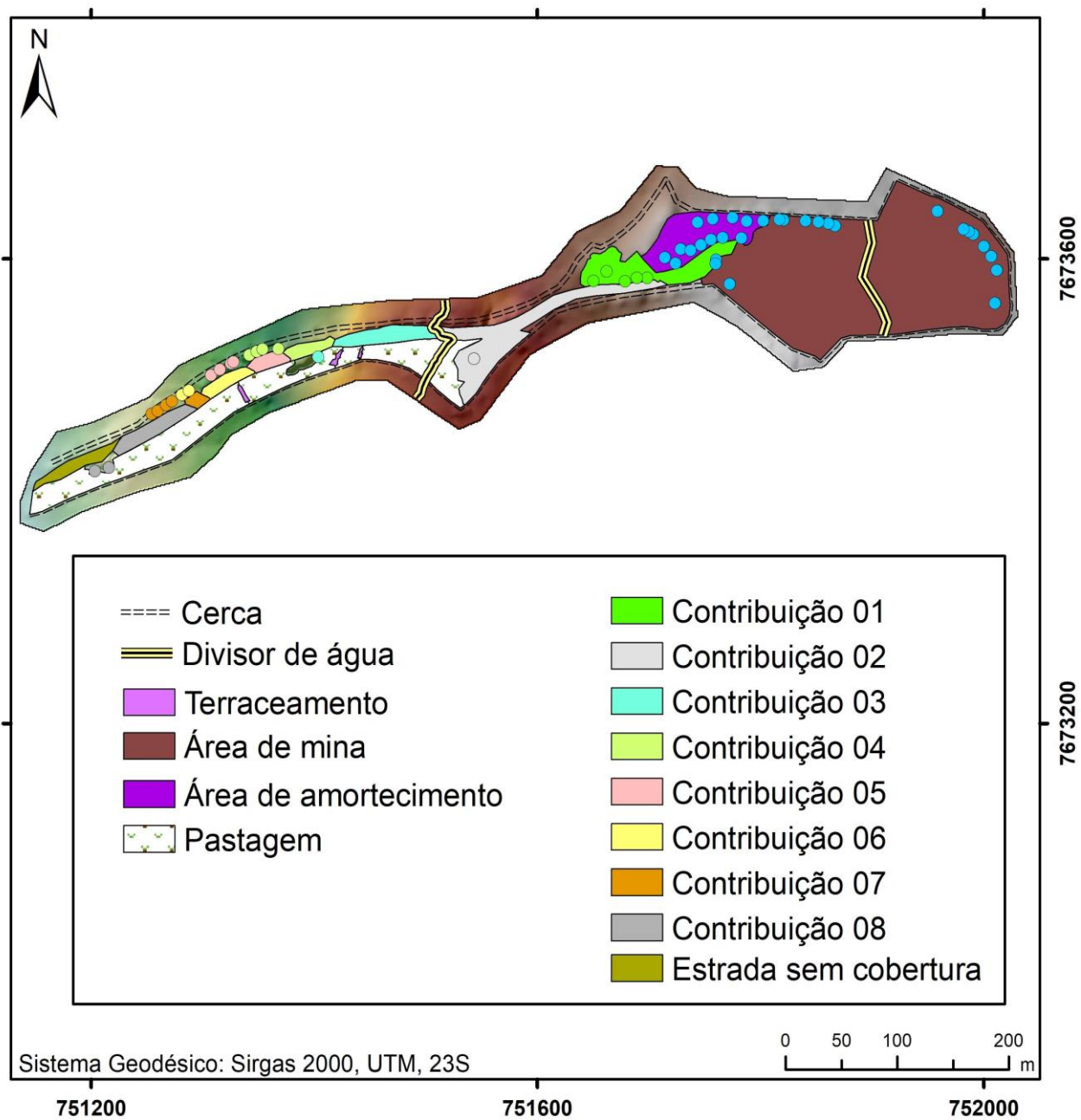
Com o levantamento georreferenciado (Figura 15), foi possível a identificação de dois divisores topográficos dividindo o sistema de drenagem da mina. A área de contribuição é formada pela estrada de acesso e por parte da área de mineração de bauxita (área de amortecimento). Contudo, essa contribuição não é contínua, ocorrendo em ocasiões de transbordo, onde a água atinge o acesso sendo retida pelos poços de decantação localizados mais abaixo.

Para o presente estudo (Figura 15), não foi considerado a água das pastagens, pois existem terraços, numerados de cima para baixo em 1,2 e 3 respectivamente com função de retenção da água na pastagem. Ao final do corpo, existe uma área em que não há presença de poços de decantação denominada Sem Cobertura.





**Figura 14** – Uso e ocupação da área de mineração com seus respectivos poços de decantação no município de São Sebastião da Vargem Alegre, MG.



**Figura 15** – Levantamento topográfico georreferenciado, com detalhamento das áreas de contribuição e seus respectivos poços, área de pastagem, área da mina, divisores topográficos, sulcos e delimitação do corpo de mineração de bauxita.

### 3.1.1 Mineração de Bauxita

A exploração da bauxita no corpo de mineração pode ser dividida em três etapas, abertura da mina, exploração e fechamento, onde diferentes pontos da mina encontram-se em etapas distintas.

A primeira etapa de abertura da mina, consistiu na preparação da área para lavra. Inicialmente foi feita a construção do acesso e seu respectivo sistema de drenagem com a execução de poços de decantação de particulados em suspensão, cujo o supervisor de mina, baseado em experiência própria, selecionou os locais onde foram construídos os poços de decantação. O decapeamento da área, retirada do solo superficial (topsoil) juntamente com sua vegetação, expondo o minério próximo a superfície possibilitando o início da lavra, foi feito simultaneamente à construção do sistema de drenagem interno da mina. O material proveniente do decapeamento foi depositado no interior do corpo de minério, estocando o topsoil (Figura 16).



**Figura 16** – Topsoil proveniente do decapeamento depositado no interior do corpo de mineração no município de São Sebastião da Vargem Alegre, MG.

Além disso, parte do material oriundo do decapeamento para formação da estrada é estocado na margem dela, sendo usado na formação das leiras (Figura.17), que funcionam como dispositivos de controle de drenagem direcionando a água para as margens da estrada a fim de evitar o escape da água do corpo de mineração, sendo aberta e fechada a cada evento chuvoso.

A fase de exploração é a fase da extração do mineral. A lavra da bauxita foi feita com auxílio das retroescavadeiras e transportada por caminhões até o estoque de bauxita (Rom's) para posterior beneficiamento. Concomitantemente, os sistemas de drenagem interno sofrem alteração ao longo do processo exploratório, conforme é feita a retirada da bauxita.



(a)

(b)

**Figura 17** – (a) Topsoil proveniente do decapeamento sendo utilizado como leira (fechada); e (b) topsoil na beira da estrada de acesso ao corpo de mineração no município de São Sebastião da Vargem Alegre, MG.

Após a bauxita exaurida foi iniciado o fechamento da mina, no qual foi realizada a reconformação topográfica. Na sequência o topsoil é espalhado (recapeamento) na área e feita uma escarificação cruzada com profundidade aproximada de 1 metros a fim de aumentar a infiltração. Ao final, os terraços, correção da acidez do solo (calagem), aumento da fertilidade (fosfatagem), plantio e adubação foram feitos a fim de possibilitar o plantio das mudas e sementes de gramíneas de modo à acelerar o estabelecimento dessas.

Os poços de decantação dos acessos foram reconformados (limpos) conforme o supervisor da mina julgar necessário. Em geral, os poços de decantação devem ser desassoreados sempre que for detectada a necessidade. No estudo, eles foram avaliados por meio de visitas periódicas ou após precipitações pluviométrica igual ou maior que 30mm, sendo removido o sedimento desde que dois terços da sua capacidade esteja comprometida e o local permita o acesso da escavadeira para execução do trabalho.

### 3.2 Precipitação em Aberto

A precipitação em aberto foi medida por meio de um pluviógrafo modelo Rain Wise de abertura receptora aproximada de 200 cm<sup>2</sup> (8" de diâmetro) e resolução de 0,25 milímetros (Figura 18), cujo os registros permitiram o estudo da relação intensidade-duração-frequência. Ele foi instalado aleatoriamente dentro do corpo de mineração, cercado por uma grade protetora, a fim de evitar furto do equipamento, erguido acima desta por uma base de sustentação, de modo que a grade não interfira

na precipitação direta sob a abertura receptora.

Os dados de precipitação foram coletados semanalmente sendo os registros por hora e por dia utilizados no presente trabalho.



**Figura 18** – Pluviógrafo modelo Rain Wise usado para medida da precipitação em aberto na área de mineração no município de São Sebastião da Vargem Alegre, MG.

### **3.3 Mensuração dos poços de decantação**

Inicialmente, em outubro de 2016, os poços de decantação foram medidos por um Laser Scanner modelo RIEGL-400 acompanhado por um par de GPS modelo GNSS RTK T10 TOPOMAP (Figura 19), no qual um deles serviu como base para coordenadas de referência, no qual transmitia correções de posicionamento geográfico para a base móvel acoplada ao scanner, que fazia o escaneamento dos poços de decantação no formato 3D em 360°. Os dados foram processados com auxílio do software RISCAN PRO versão 2.1.1, no Laboratório de Engenharia Agrimensura e Cartográfica da Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais (LEA-UFV/MG).



(a)



(b)

**Figura 19** – (a) Laser Scanner (RIEGL-400); e (b) GPS (GNSS RTK T10 TOPOMAP) utilizados na mensuração dos poços de decantação na estrada de acesso ao corpo de mineração no município de São Sebastião da Vargem Alegre, MG.

Quando os poços tinham dois terços ( $2/3$ ) do seu volume comprometido, em janeiro de 2017, foi feita a retirada do sedimento por uma escavadeira, de modo a conservar o seu formato original, sendo suas medidas refeitas com o auxílio de uma trena (Figura 20). Salienta-se que qualquer intervenção na área do projeto foi devidamente comunicada antecipadamente para o melhor andamento do projeto.



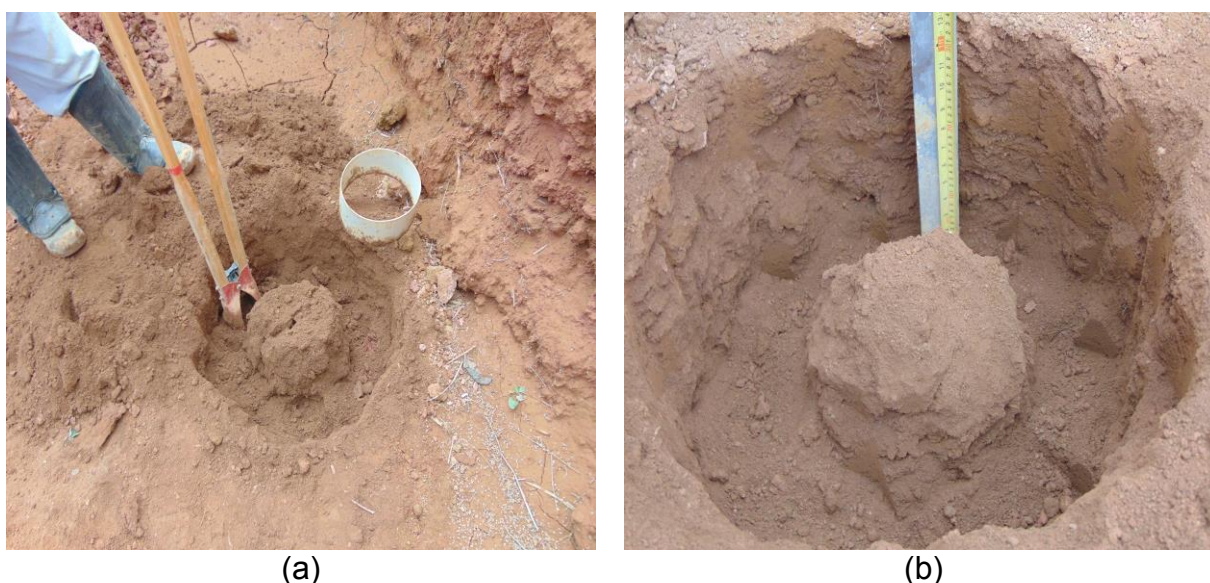
**Figura 20** – Remedição com o auxílio de uma fita métrica de 50 metros após a retirada do sedimento dos poços de decantação na estrada de acesso ao corpo de mineração no município de São Sebastião da Vargem Alegre, MG.

### 3.4 Permeabilidade

#### 3.4.1 Coleta e preparação do solo

Foram coletadas 23 amostras deformadas representativas dos solos em estudo, sendo os primeiros poços de decantação de cada bateria selecionados para a retirada dos solos. Após a coleta, foram imediatamente colocados em sacos de silos transparente e armazenadas em ambiente de umidade e temperatura controlados no Laboratório de Mecânica dos solos (Geotecnia) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa (LMS-UFV). As amostras foram secas ao ar, destorroadas, passadas na peneira de abertura nominal de 2 mm e guardadas para uso futuro nos ensaios de permeabilidade, em obediência à NBR 6457 (ABNT, 1986a).

De cada poço, com auxílio de uma escavadeira articulada e um cano PVC de 25 cm de diâmetro usado para proteger a parte central do buraco, foram retiradas três repetições de peso variado, até uma profundidade aproximada de 60 centímetros.



**Figura 21** – (a) Amostras retiradas dos poços através da escavadeira; e (b) uso da trena manual com fita de aço para verificar as profundidades 30 e 60 centímetros.

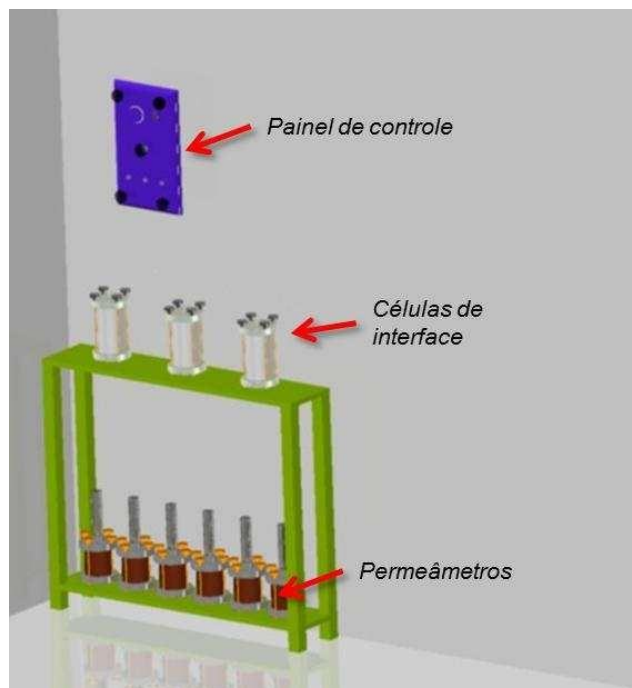
Determinadas a partir de uma trena manual com fita de aço (Figura 21) as alturas 0, 30 e 60 centímetros da parte central de cada amostra, foram retiradas um molde de anel metálico de volume  $239,44 \text{ cm}^3$  auxiliado por uma “enxadinha de jardim” e lajota de cerâmica (Figura 22a). Essas amostras foram separadas e armazenadas em embalagens plásticas vedadas (Figura 22b), onde suas densidades e porosidade do solo pelo método picnôométrico foram determinados no Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa.



**Figura 22** – (a) Anel metálico com molde do solo; e (b) embalagens vedadas a serem levadas ao Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa (LMS-UFV).

### 3.4.2 Ensaios de permeabilidade

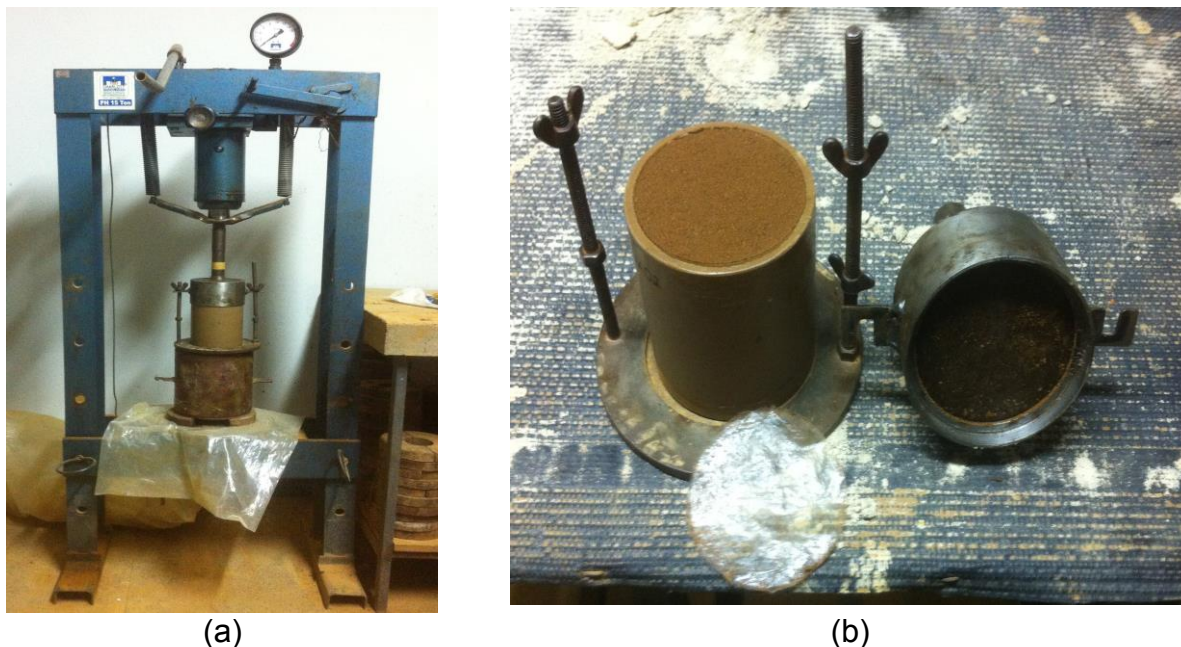
Os ensaios foram feitos a partir do equipamento de percolação em coluna desenvolvido por Caneschi (2012), sendo este similar ao sistema desenvolvido por Leite et al. (1998) no Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos-USP e também utilizado por Pacheco e Silva (2005) e Costa (2016). A Figura 23, representa o sistema desenvolvido por Caneshi (2012).



**Figura 23** - Maquete do sistema de funcionamento dos ensaios de percolação em coluna: painel de controle para aplicação de pressão na interface; reservatório de armazenamento de água (interface); e conjunto do permeâmetro. Fonte: Adaptado de Caneschi, 2012.



Os corpos de prova no estudo foram compactados segundo a orientação definida pela NBR 7182 (ABNT, 1986b), na energia compressão estática em tubos de PVC de aproximados 12 e 10 centímetros de altura e circunferência respectivamente (Figura 24), utilizando-se a densidade e a umidade encontrada em campo.



**Figura 24** – (a) Compressão estática realizada por prensa hidráulica; e (b) corpo de prova compactado em tubo de PVC de aproximados 12 e 10 centímetros de altura e circunferência respectivamente.

Compactados, os corpos de prova foram vedados na parte superior e na parte inferior (Figura 25), possibilitando o fluxo ascendente da água destilada proveniente da interface de armazenamento, conectada ao corpo de prova na parte inferior através de tubos flexíveis de plástico

Nesse trabalho, não houve a utilização de pressão artificial no sistema, regulada pelo painel de controle conectado a interface de armazenamento. Nos ensaios, o cilindro de armazenamento foi submetido a pressão atmosférica em que as alturas, pré-determinadas conforme a dificuldade de saturação dos corpos de prova, variaram em 26,7, 65,9 e 81,1 centímetros (Figura 25), resultando em gradientes hidráulicos aproximados de 2,22, 5,48 e 6,73 respectivamente, aplicados de maneira constante.



(a)



(b)

**Figura 25-** (a) Corpo de prova vedado nas faces superiores; e (b) inferiores e interface de armazenamento nas alturas 26,7, 65,9 e 81,1 centímetros alturas conectados na parte inferior ao corpo de prova através de tubos flexíveis de plástico.

Para a percolação, as interfaces de armazenamento preenchidas com água destilada, foram conectadas aos corpos de prova nas alturas 26,7, 65,9 e 81,1 centímetros (Figura 25) e submetidas a pressão atmosféricas. Montado o sistema, inicia-se o fluxo de água até que as amostras saturam-se, ou seja, os vazios são preenchidos, ocasionando o seu transbordo através de uma saída superior, preenchendo um cilindro graduado de 27 milímetros (ml), ou seja, 27 centímetros cúbicos (cm<sup>3</sup>).

Quatro dias foram gastos até que os corpos de provas saturassem sendo nesse momento o fluxo de água ascendente constante. Em seguida, foram realizadas as leituras da lâmina d'água no cilindro graduado em intervalos de tempos pré-estabelecidos, de 5,10 e 20 minutos, conforme a velocidade de ascensão, sendo tempos menores para maiores velocidades. Na determinação do coeficiente de permeabilidade, empregou-se Lei de Darcy, sendo ao final de cada ensaio a temperatura da água medida por um termômetro de mercúrio, para correção de viscosidade da água destilada.

A Figura 26, representa a visão geral do ensaio permeabilidade, executado no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), em sala com temperatura controlada em 21 °C ± 1 °C.



**Figura 26** - Visão geral do equipamento utilizado para o ensaio de permeabilidade, Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa (LMS-UFV).

Destaca-se que o desenvolvimento do sistema de percolação em coluna desenvolvido por Caneshi (2012), teve seus fundamentos alicerçados nos sistemas convencionais de percolação empregados nos ensaios de laboratório para a determinação da condutividade hidráulica, ou seja, o recomendado pela NBR 14545 (ABNT, 2000) e pela NBR 13292 (ABNT, 1995), e englobou quatro etapas, como segue: (i) inventário; (ii) projeto básico; (iii) construção do sistema; e (iv) teste do sistema.

Foram realizados ensaios de determinação de massa específica dos grãos, método picnométrico ou balão volumétrico, segundo a orientação NBR 6508 (ABNT, 1984) em corpos de prova obtidos via anel metálico, após a definição das densidades ( $\rho$ ), de modo a se analisar a porosidade média total existente nos solos dos poços investigados. A coleta e os ensaios foram realizados entre os meses de Junho a Dezembro de 2017.

### **3.5 Caracterização Física do Solo**

#### **3.5.1 Resistência do Solo a Penetração**

A avaliação da resistência mecânica do solo à penetração, foi medida no interior dos primeiros poços de decantação com apenas uma repetição para cada, em

Maio de 2017, onde utilizou-se o penetrômetro eletrônico (Figura 27), de 60 centímetros de profundidade e resolução de 1 centímetro, denominado PenetroLOG® PLG1020 - Medidor Eletrônico de Compactação do Solo (FALKER, 2009).



**Figura 27**– (a) Coleta de amostra de 0 -10 cm e 10-20 cm para determinação do teor de umidade; e (b) realização dos testes de compactação com o penetrômetro eletrônico em Maio 2017.

Os dados obtidos foram analisados no Laboratório de Hidrologia Florestal da Universidade Federal de Viçosa (LHF/UFV) através do software penetroLog. O penetrômetro eletrônico PenetroLOG PLG1020, segue as recomendações da norma internacional ASAE S.313.3 (ASAE, 1999).

Para caracterização da umidade do solo, foram retirados juntamente com os testes de resistência do solo a penetração, amostras de solo 0 -10 cm e 10-20 (Figura 27a) de cada poço utilizando um trado mecânico. Após a coleta elas foram imediatamente colocadas em um recipiente metálico, previamente pesado ( $M_{(R)}$ ), com tampa e vedada com fita adesiva, a fim de reduzir a perda da umidade original. No laboratório da Votorantim Metais pesou-se o conjunto recipiente, solo e água ( $M_{(R+solo+água)}$ ) em uma balança de precisão e levadas à uma estufa na temperatura de 105° por 24 horas até que o peso das amostras permanecesse constante, sendo pesada novamente na mesma balança de precisão ( $M_{(R+solo)}$ ). O teor de umidade foi calculado pela Equação 5:

$$U\% = \frac{M_{(R+solo+água)} - M_{(R+solo)}}{M_{(R+solo)} - M_{(R)}} \times 100 \quad \text{Equação 5}$$

### 3.5.2 Granulometria

Para realizar o teste de granulometria nos poços de decantação, por meio de um trado (Figura 28) coletou-se amostras de 0-10 cm de profundidade, de sedimento no interior de todos os poços em Maio de 2017. As amostras coletadas foram colocadas, cada uma, separadamente dentro de sacos plásticos e misturadas, sendo encaminhadas ao Laboratório de Rotina do Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa, onde foram realizadas as análises de granulometria dos sedimentos e dos solos coletados.



**Figura 28** – Coleta de sedimento dos poços de decantação na área de mineração de bauxita em Maio 2017.

### 3.6 Levantamento Topográfico

Realizou-se, em novembro de 2016, com a utilização de um aparelho receptor de sinal GPS (Figura 29) e Laser Scanner modelo RIEGL-400, o levantamento topográfico com a coleta em campo das coordenadas geográficas.

Com a posse dessas coordenadas, os dados foram exportados para o *software* Google Earth a fim de localizar e identificar a mina no espaço gerando uma imagem de satélite de baixa resolução (Figura 7). Através do software de sistema de informação geográfica ARCGIS (10.1), foi possível elaborar mapa de uso e ocupação do solo, e mapa da área de drenagem (contribuição) dos poços de decantação com suas respectivas áreas e declividades.



(a)



(b)

**Figura 29** – (a,b) Equipamento GPS usado em campo para obtenção das coordenadas geográficas da área de mineração de bauxita em São Sebastião da Vargem Alegre, MG.

### **3.7 Ajuste dos modelos para estimativa dos volumes retidos e transbordados nos poços de decantação**

Os dados para o ajuste dos modelos de volume de chuva dos poços de decantação foram obtidos através de medições realizadas após cada período de precipitação, em que fosse permitido o acesso a área dos poços, devido à dificuldade de acesso, sempre no período inicial da manhã, entre novembro 2016 a março 2017

A Figura 30 mostra a dificuldade de acesso ao corpo de mineração após os períodos chuvosos. A impermeabilização da estrada forma pontos de alagamentos e lama dificultando e em muitos casos, impossibilitava o acesso do veículo 4X4 aos poços de decantação.



(a)



(b)

**Figura 30** – (a) Pontos de alagamento; e (b) formação de lama, no acesso aos poços de decantação da área de mineração de bauxita em São Sebastião da Vargem Alegre, MG.

Foram utilizados para a medidas das alturas da lâmina de água nos poços de decantação uma régua milimétrica, montada a partir de uma trena manual com fita de aço cortada, de zero a dois metros fixa (rebitada) a uma régua de alumínio de pedreiro com também dois metros (Figura 31). Além disso, auxiliando a régua, foi usada uma adaptação (Figura 32) construída a partir de dois canos de PVC de 1,50 metros, sendo um deles milímetrado e um joelho que os conectava, formando uma haste em formato de L.



(a)



(b)

**Figura 31** – (a) Trena manual com fita de aço cortada de zero a dois metros; e (b) fixa (rebitada) a uma régua de alumínio de pedreiro utilizados para a medidas das alturas da lâmina de água nos poços de decantação uma régua milimétrica.

A adaptação possibilitou melhor acesso as partes centrais dos poços (Figura 32) que tinham as alturas da lâmina d'água medidas em três pontos ( $h_1, h_2, h_3$ ), um em cada extremidade e um ao centro, sendo feito a altura média da lâmina d'água ( $H_m$ ) através da Equação 6.

$$H_m = \frac{(h_1+h_2+h_3)}{3}$$

Equação 6



**Figura 32** – Adaptação construída a partir de dois canos de PVC de 1,50 metros conectados por um joelho, formando uma haste em formato de L, medindo a parte central do poço de decantação.

Foram ajustados a partir do software Statistica 13.0, regressão piecewise para a justaposição de modelos lineares, visando descrever a evolução do volume transbordado e do volume retido em função da precipitação, oito funções de volume de água retido e oito de volume transbordado, para cada bateria de poços, sendo aqueles que se apresentaram em sequência, tiveram suas áreas somadas considerando-se como um único grande poço. Os resultados foram submetidos às análises estatísticas de coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e a distribuição dos dados em torno da regressão avaliadas graficamente.

A partir dos resultados de volume total produzido e volume transbordado, foi feita uma análise de rendimento (%) dos poços de decantação, a fim de avaliar o desempenho de sua construção feita de maneira empírica em relação a precipitação, área de contribuição e sua declividade, área dos poços e permeabilidade.



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização Física do Sedimento

#### 4.1.1 Permeabilidade

A Tabela 7, detalha a altura de coleta em Julho de 2017 do molde de anel metálico (Figura 22), a sua umidade, densidade real ( $D_p$ ) e aparente ( $D_s$ ), os quais em seguida foram usados para a montagem dos corpos de provas para realização dos testes de percolação em coluna, totalizando 23.

No intuito de aproximar das condições de campo, os valores utilizados para a montagem do ensaio de percolação em coluna (Tabela 7), foram os moldes que apresentaram menor densidade real ( $D_p$ ) de umidade e profundidade de coleta variáveis. Ao umedecê-los, conforme a umidade encontrada, os solos adquirem o valor de densidade aparente ( $D_s$ ) encontrada em campo, sendo compactada e realizados os ensaios de percolação.

A opção pelo menor  $D_p$ , e conseqüente menor  $D_s$ , para a montagem do corpo de prova, deve-se ao fato dos monitoramentos dos poços acontecerem em solos extremamente úmidos, havendo a formação ou não de lâminas d'água. Nessas circunstâncias, os solos argilosos se expandem, aumentando a porosidade e conseqüentemente reduzindo a sua densidade.

Ressalta-se que no poço 7 foram coletadas apenas duas amostras para o teste de permeabilidade devido ao soterramento de parte do poço, resultado das atividades com máquina para manutenção do processo de reabilitação local e expansão das atividades para áreas vizinhas. No entanto, nesse período os monitoramentos dos poços com a coleta de dados já haviam encerradas.

**Tabela 7** - Profundidade de coleta, umidade e densidade dos moldes de anel metálico utilizados para o teste de percolação em coluna em Julho de 2017.

Poço	Amostra	Profundidade de Coleta (cm)	Umidade (%)	Dp (g/cm <sup>3</sup> )	Ds (g/cm <sup>3</sup> )
1	1	60	27,26	1,18	1,51
	2	0	27,64	1,13	1,45
	3	0	27,77	1,15	1,48
2	1	60	23,81	1,05	1,31
	2	60	27,29	1,13	1,45
	3	30	38,18	1,03	1,42
3	1	60	19,31	1,06	1,27
	2	30	30,51	1,10	1,43
	3	30	27,23	1,19	1,52
4	1	30	26,88	0,99	1,26
	2	0	16,49	1,14	1,32
	3	30	26,79	1,11	1,41
5	1	30	16,49	1,11	1,29
	2	0	26,79	0,99	1,17
	3	30	16,09	1,26	1,67
6	1	60	17,37	1,03	1,24
	2	30	32,80	1,18	1,66
	3	0	20,47	1,19	1,40
7*	1	0	41,15	1,08	1,30
	2	30	18,40	1,17	1,65
8	1	0	17,28	1,12	1,32
	2	30	20,99	1,13	1,37
	3	0	38,30	1,15	1,59

A densidade é uma propriedade que relaciona a massa de solo seco (Dp) e massa de solo úmido (Ds) com o volume do solo. Os valores normais de Ds para solos arenosos variam entre 1,2 a 1,9 g.cm<sup>-3</sup>, enquanto solos argilosos apresentam valores mais baixos, entre 0,9 a 1,7 g.cm<sup>-3</sup>. Os valores de densidade estão associados ao nível de compactação dos solos, sendo valores próximos a 1,65 g.cm<sup>-3</sup> e 1,45 g.cm<sup>-3</sup>, solos arenosos e argilosos respectivamente, com alta probabilidade de oferecer riscos a restrição radicular (REINERT; REICHERT, 2006).

A média dos resultados dos ensaios de permeabilidade realizados no período de setembro a novembro de 2018, em três corpos de provas retirados dos primeiros poços de cada bateria, assim como seus respectivos desvios padrão estão apresentados na Tabela 8. Ressalta-se que os ensaios foram realizados em diferentes alturas sendo determinadas conforme a dificuldade de saturação do corpo de prova.

Os intervalos das leituras foram feitos conforme a velocidade constante de ascensão da água no cilindro graduado, sendo quanto mais rápida menor o intervalo. Dado três leituras com variação máxima de 10% determinou-se o coeficiente de permeabilidade, porém, as quantidades de leituras feitas foram maiores que o necessário na finalidade de melhor analisar a percolação em um período de tempo prolongado, estimando de maneira mais precisa o coeficiente de permeabilidade.

**Tabela 8** - Coeficiente de permeabilidade médio e desvio padrão dos ensaios realizados em cada poço, entre setembro a novembro de 2018.

Poços	Coeficiente de permeabilidade (cm.s <sup>-1</sup> )	Desvio Padrão
1	1,46 x 10 <sup>-6</sup>	4,14 x 10 <sup>-7</sup>
2	2,33 x 10 <sup>-5</sup>	2,20 x 10 <sup>-5</sup>
3	5,77 x 10 <sup>-5</sup>	2,96 x 10 <sup>-5</sup>
4	3,25 x 10 <sup>-5</sup>	1,25 x 10 <sup>-5</sup>
5	3,30 x 10 <sup>-5</sup>	2,87 x 10 <sup>-5</sup>
6	2,76 x 10 <sup>-5</sup>	2,64 x 10 <sup>-5</sup>
7	1,38 x 10 <sup>-5</sup>	2,81 x 10 <sup>-5</sup>
8	1,48 x 10 <sup>-5</sup>	9,59 x 10 <sup>-6</sup>

Os valores do coeficiente de permeabilidade (K) em 10<sup>-5</sup> e 10<sup>-6</sup> indicam a textura argilosa do solo contido nos poços de decantação, sendo confirmada na Tabela 9 de gradiente textural. Para tais valores, conforme Vargas (1977), podemos afirmar ainda, que são materiais com grau de permeabilidade muito baixa, portanto sendo praticamente impermeáveis.

**Tabela 9** - Classificação textural do solo contido nos poços de decantação em Maio de 2017.

Bateria de poços	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila	Classe Textural
	dag/Kg				
1	12,4	6,2	39,4	42	Argila
2	9	4,5	27	59,5	Muito Argiloso
3	9	8	14	69	Muito Argiloso
4	6,3	4	15,3	74,4	Muito Argiloso
5	5,85	4,05	17,55	72,55	Muito Argiloso
6	4	5	16,5	74,5	Muito Argiloso
7	5,75	3,75	27	63,5	Muito Argiloso
8	13,5	8,5	20	58	Argila
Média Geral	8,23	5,50	22,09	64,18	Muito Argiloso

Consistência é uma propriedade dos solos que reflete as forças de coesão e de aderência, presentes nos solos sob diferentes graus de umidade e depende de fatores como: textura mineralogia, teor de matéria orgânica e da agregação do solo. Sua descrição morfológica é feita em três classes de umidade, seco, úmido e molhado, manifestando respectivamente, dureza, friabilidade e plasticidade e pegajosidade, no qual a avaliação das amostras de solo é feita em estado úmido, molhado e seco (LEPSCH, 2010).

Por meio de uma avaliação manual e visual durante a coleta para análise textural, observou-se em campo que os solos contidos nos poços de decantação apresentaram-se muito plásticos e pegajosos quando úmidos e muito duros quando secos com contração e formação de rachaduras (Figura 33). Tal descrição, conforme Reinert e Reichert, (2006) caracteriza-se como um solo com o tipo de argilomineral 2:1 expansivas.



**Figura 33** – (a) Contração com a formação de rachaduras; e (b) pegajosidade do solo umedecido dos solos presentes nos poços de na área de mineração de bauxita em Maio 2017.

Argilomineral 2:1 apresentam CTC elevada, conferindo uma maior capacidade de interação com a água, fenômenos de capilaridade, (CHAGA; MANZI,1996), favorecendo o encrostamento da superfície e conseqüente menor permeabilidade da água (SIQUEIRA,2015).

Segundo Kampf e Curi (2003), os argilominerais podem ser oriundos da precipitação ou combinação de substâncias resultantes do intemperismo de outros minerais. Neste caso, são chamados de minerais neoformados ou de formação. Vale

ressaltar que as áreas em que os solos foram coletados estão sob a recepção de água de precipitação.

#### 4.1.2 Porosidade e Resistência Mecânica do Solo à Penetração

A porosidade é constituída pelo espaço poroso, após o arranjo dos componentes da parte sólida do solo e que, em condições naturais, é ocupada por água e ar (EMBRAPA,2003). Quando ocupada por água, essa interage com parte sólida (adesão ou adsorção) e entre moléculas de água (coesão), promovendo expansão e contração das partículas do solo, a aderência e a formação estrutural dos agregados (LACERDA,2007)

A porosidade total média dos solos contido dentro dos poços de decantação (Tabela 10), apresentaram-se elevadas apesar da baixa permeabilidade. Tal desconformidade, ocorre devido a predominância de silte e argila na composição (Tabela 7), sendo esses materiais de elevado poder de adsorção com água, retendo-a no ambiente (DIAS,2004).

**Tabela 10** - Porosidade total média e desvio padrão dos ensaios realizados em cada poço em novembro de 2018.

Poço	Porosidade (%)	Desvio Padrão
1	57,83	0,89
2	60,68	4,04
3	54,22	2,76
4	59,06	3,65
5	55,81	2,96
6	57,65	1,76
7	57,54	1,57
8	56,06	1,70
Média Geral	57,35	

Segundo IAEG (1979), porosidade acima de 50% é denominada como muito alta. Para tal, além da sua textura, resulta-se da recém formação desses solos, provenientes de erosão pluvial, eólica, deposição, provocada pela atividade humana adjacente aos poços, e revolvimento nos períodos de manutenção desses, que

ocorrem em períodos distintos em curto intervalo de tempo, impossibilitando acomodação e formação de uma estrutura compacta.

A porosidade total do solo é formada pela macroporosidade e microporosidade. Basicamente, o primeiro tem a função de movimentação de ar e água, o segundo, promove a retenção de água contra a gravidade, cujo é predominante em solos argilosos (TEIXEIRA et.al, 2009). A maior concentração, deve-se na formação dos solos argilosos, onde as partículas de argila se agregam (magroagregados) formando uma microporosidade intra-agregados, de modo a aumentar o volume dos espaços porosos, sendo o efeito ainda maior em poros com diâmetro reduzido (BRADY; WEILL 2008).

Os testes de resistência do solo à penetração (Figura 34) em Maio de 2017, nos poços 1,2,3,4,5,6,7,8 apresentaram valores de resistência mecânica do solo na profundidade de 0-60 compreendido entre 0 Mpa a 2,06 Mpa. O poço 2 apresentou a menor média de resistência mecânica (0,061 MPa ou 61KPa) e poço 1 apresentou a maior média de resistência mecânica (0,59 MPa ou 588 KPa) entre os poços.

A umidade média coletada de 0- 20 centímetros de profundidade (Tabela 11), apresentou-se abaixo de 25%, e segundo IAEG (1979) é classificada como naturalmente seca. Por outro lado, a medida que aprofunda o solo, essa umidade tenderá ao aumento (REICHARDT,2004).

**Tabela 11-** Umidade média de 0 – 20 centímetros dos testes de resistência do solo a penetração, na área de mineração de bauxita em Maio de 2017, São Sebastião da Vargem Alegre, MG.

Poço	Umidade (%)
1	23,18
2	20,04
3	18,74
4	16,24
5	21,52
6	21,36
7	18,86
8	17,08
Média Geral	19,63

Apesar de conter valores de densidade estarem dentro dos valores normais Tabela 7, a resistência média apresentou-se muito baixa em todos os poços segundo Canarache (1990), logo pode-se considerar que são solos predominantemente de baixa compactação, pois a resistência do solo à penetração é considerada a

propriedade mais adequada para expressar o grau de compactação (CERQUEIRA SILVEIRA,2010).

Para tais valores de resistência, quando comparados a solos produtivos, conforme Arshad et al. (1996), é restritiva ao crescimento radicular acima de valores que variam de 2,0 a 4,0 Mpa, e de 1,5 a 3,0 Mpa para Grant e Lanfond (1993).

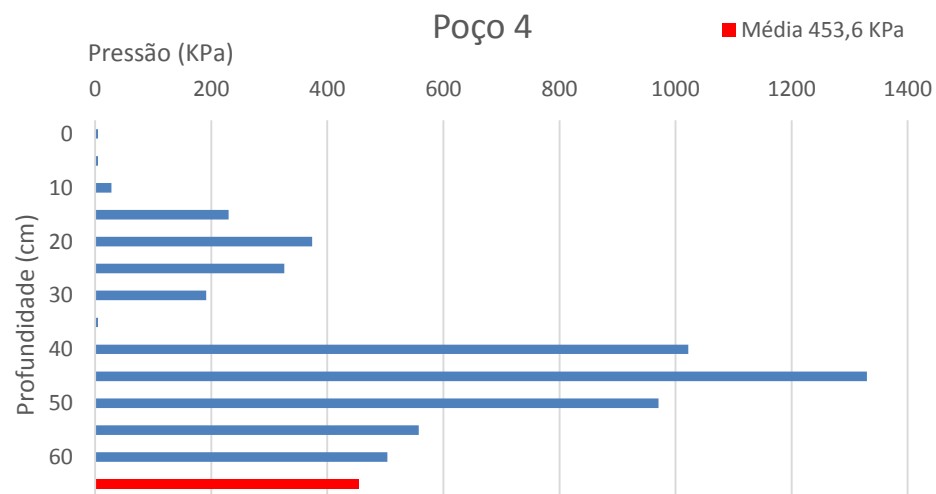
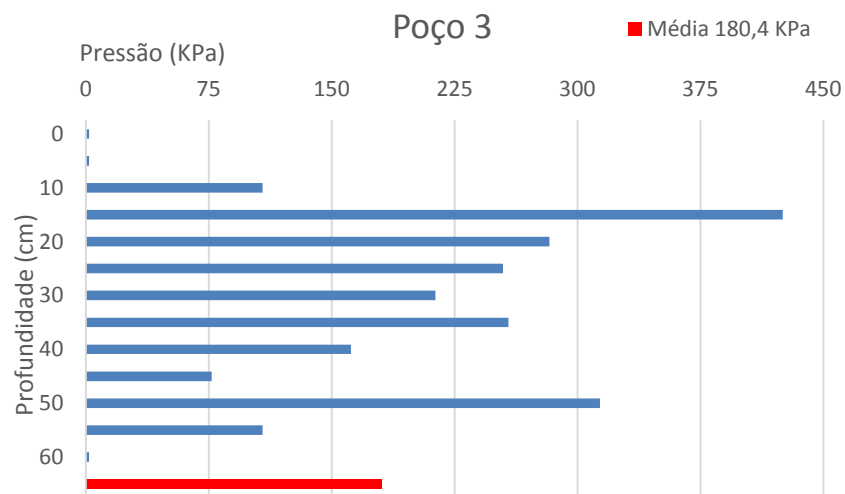
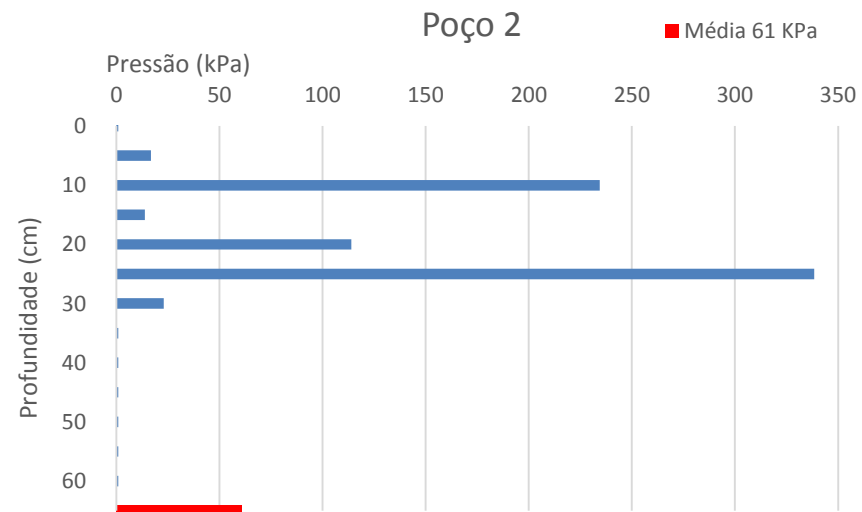
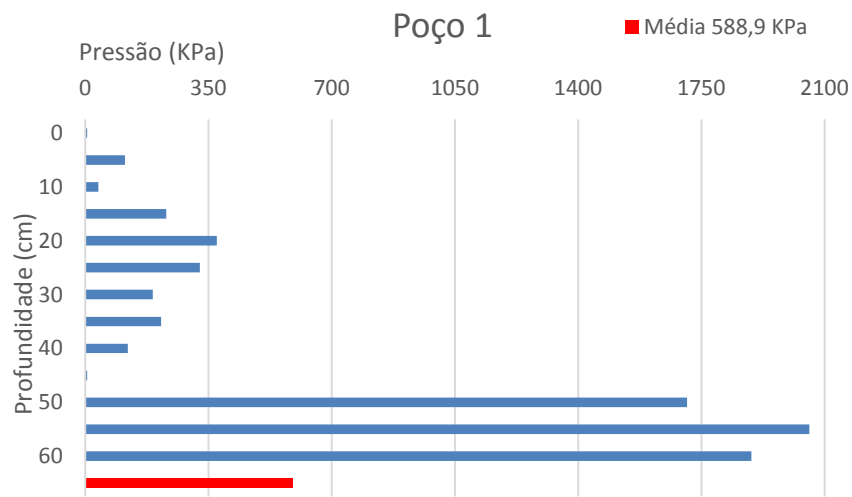
Miotti (2013) comparando a resistência mecânica em relação a profundidade entre um solo arenoso raso com um solo profundo argiloso, demonstrou um adensamento predominantemente crescente em ambos, bem como a umidade, no qual o adensamento foi maior no solo raso.

A área em que encontra-se os poços, são solos rasos devido principalmente a remoção da bauxita, agravada pela presença de solos naturalmente mais rasos a medida que se aproxima na base do morro. Logo, em geral, espera-se que com aumento da profundidade ocorra o adensamento do solo, e conseqüente maior resistência a penetração independente da sua textura.

No teste de resistência mecânica do solo (Figura 34), a compactação apresentou-se inusitada. Ao longo do perfil de 60 centímetros, a resistência observada, oscilou de forma abrupta, podendo aumentar ou diminuir independente da profundidade, sendo indicativo de aumento da umidade com a presença de grandes espaços vazios e de estruturas mais rígidas, como sólidos dispersos no sedimento depositado.

Logo, o ambiente de aluvião (úmido) é propício a formação de macroagregados argilosos, os quais são sensíveis à tensão mecânica, porém com alta capacidade de reter água por forças de coesão determinantes à condução hidráulica, sendo o resultado em acordo com o de Santo et al. (2012). Segundo Carvalho (2002), a condutividade hidráulica na condição saturada é mais dependente da estrutura do que da textura do solo, onde o aumento do grau de agregação proporciona menor condutividade hidráulica.

Os pontos de maior resistência aconteceram nas maiores profundidades acima de 20 cm para os poços, com destaque para o poço 1, com maior média e maior valor de resistência. Isso pode estar associado a redução do perfil do solo com a retirada da bauxita com a alocação dos poços encima do saprólito (Figura 34).



**Figura 34** – Resistência mecânica do solo a penetração resolução 5 centímetros realizados nos poços de decantação na área de mineração de bauxita em Maio de 2017, São Sebastião da Vargem Alegre, MG.



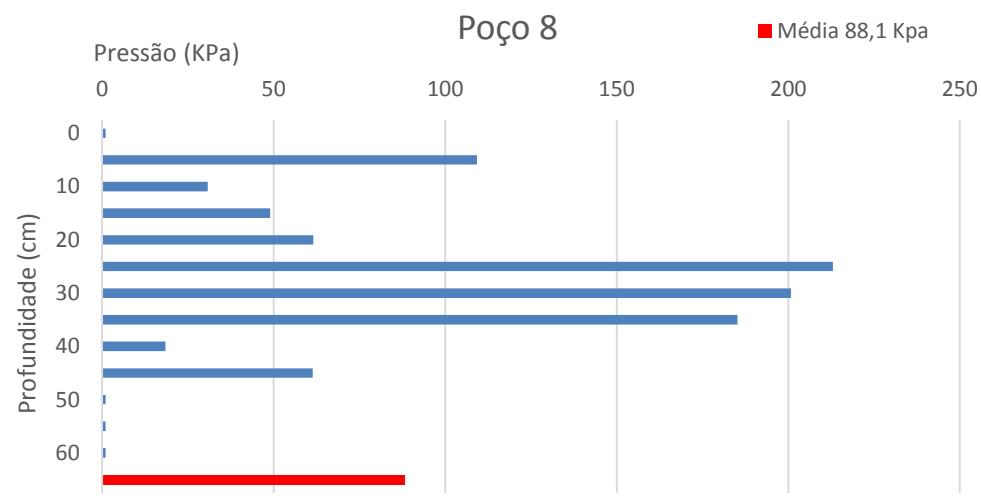
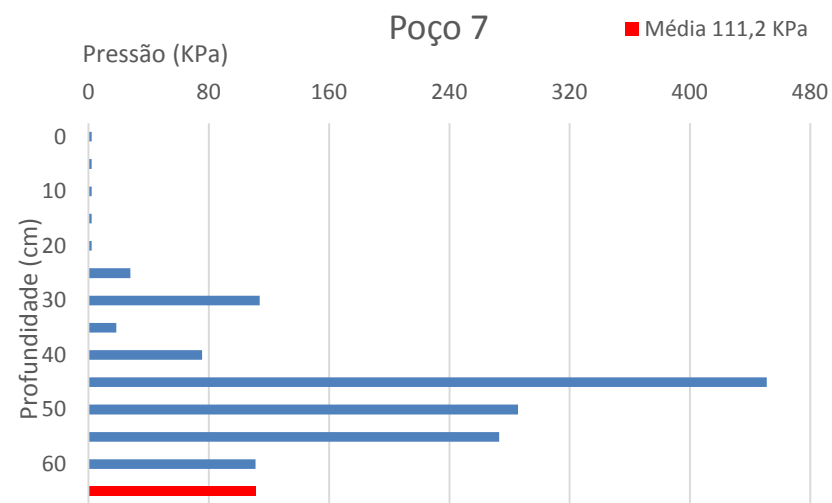
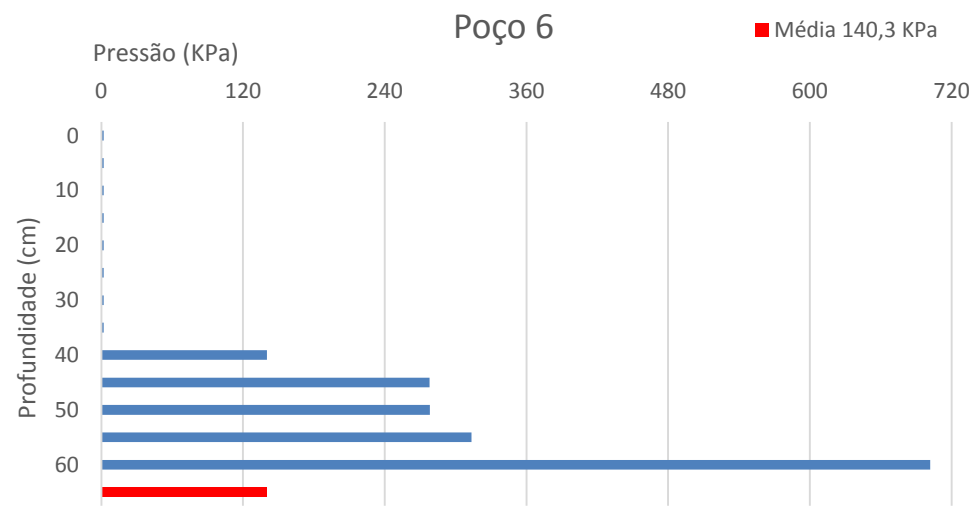
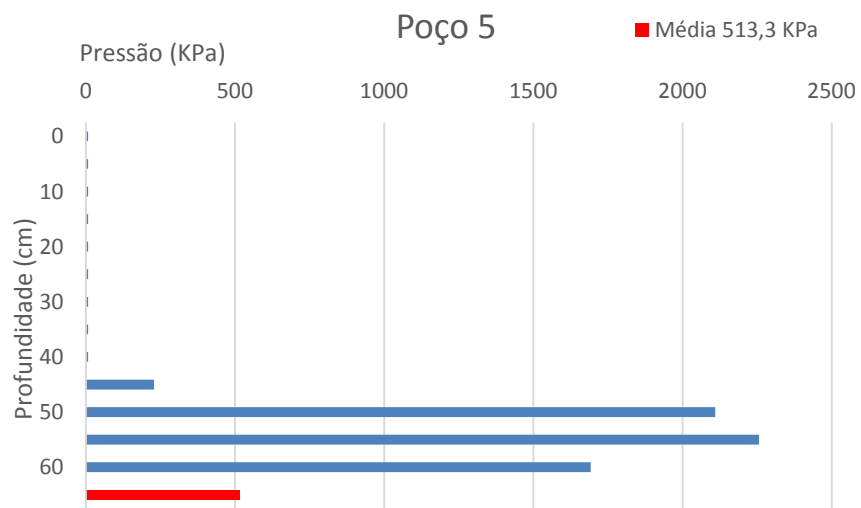


Figura 34 – Continuação

A ausência de pressão em pontos isolados ao longo do perfil, como visto nos poços 3, 4 e 8 nas profundidades 60,35 e 50 centímetros respectivamente, revela grandes espaços vazios, influenciando significativamente nas médias.

O poço 7 apresentou resistência nula até 20 centímetros, logo identifica-se maior umidade nas camadas superficiais. Já os poços 5 e 6 o valor foi nulo até 40 centímetros aproximadamente. Além da umidade, nesses poços acumularam-se menor quantidade de sedimentos, favorecendo a descida da água e a ocorrência de um saprolito encharcado com oscilações de resistência.

Ressalta-se que os valores de pressão foram coletados a cada 1 centímetro (resolução), porém, os valores médios apresentados (Figura 34) estão na resolução de 5 centímetros a fim de adequar a apresentação dos dados.

## **4.2 Ajuste dos modelos**

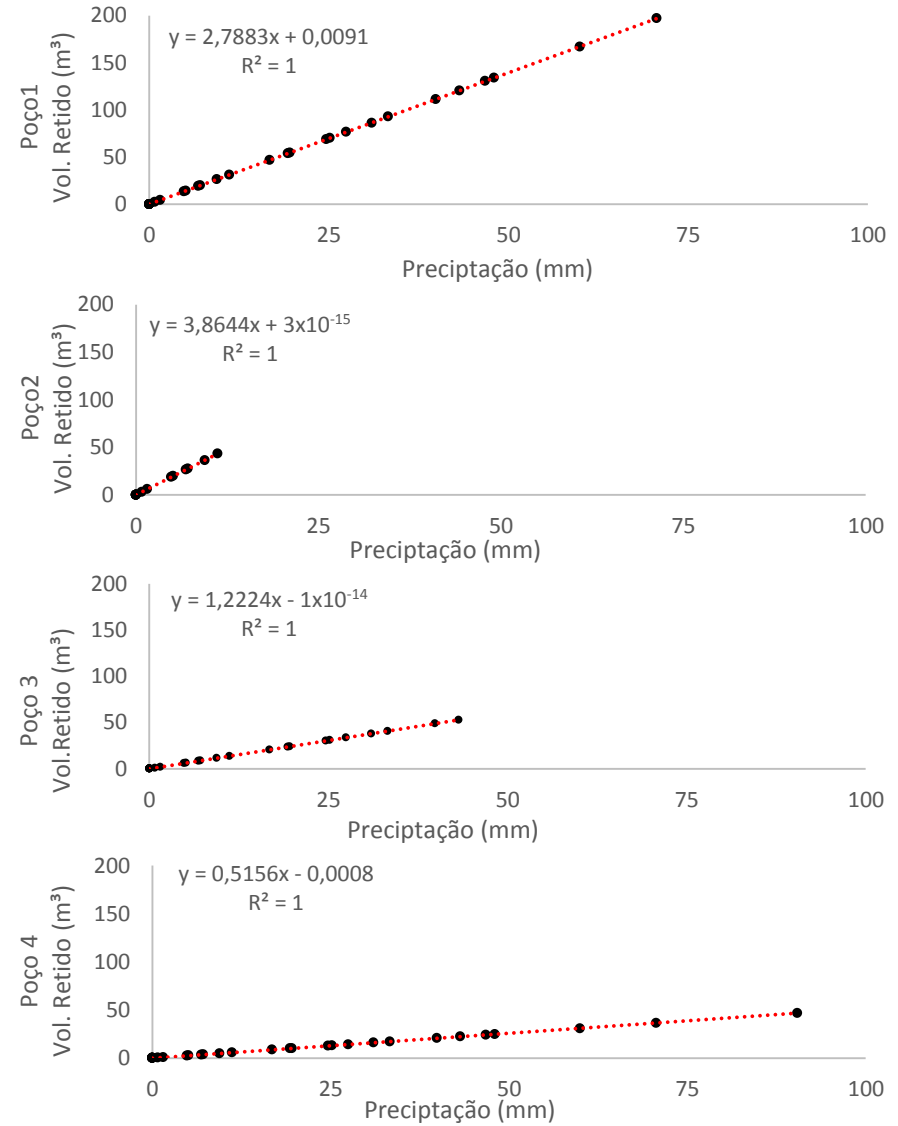
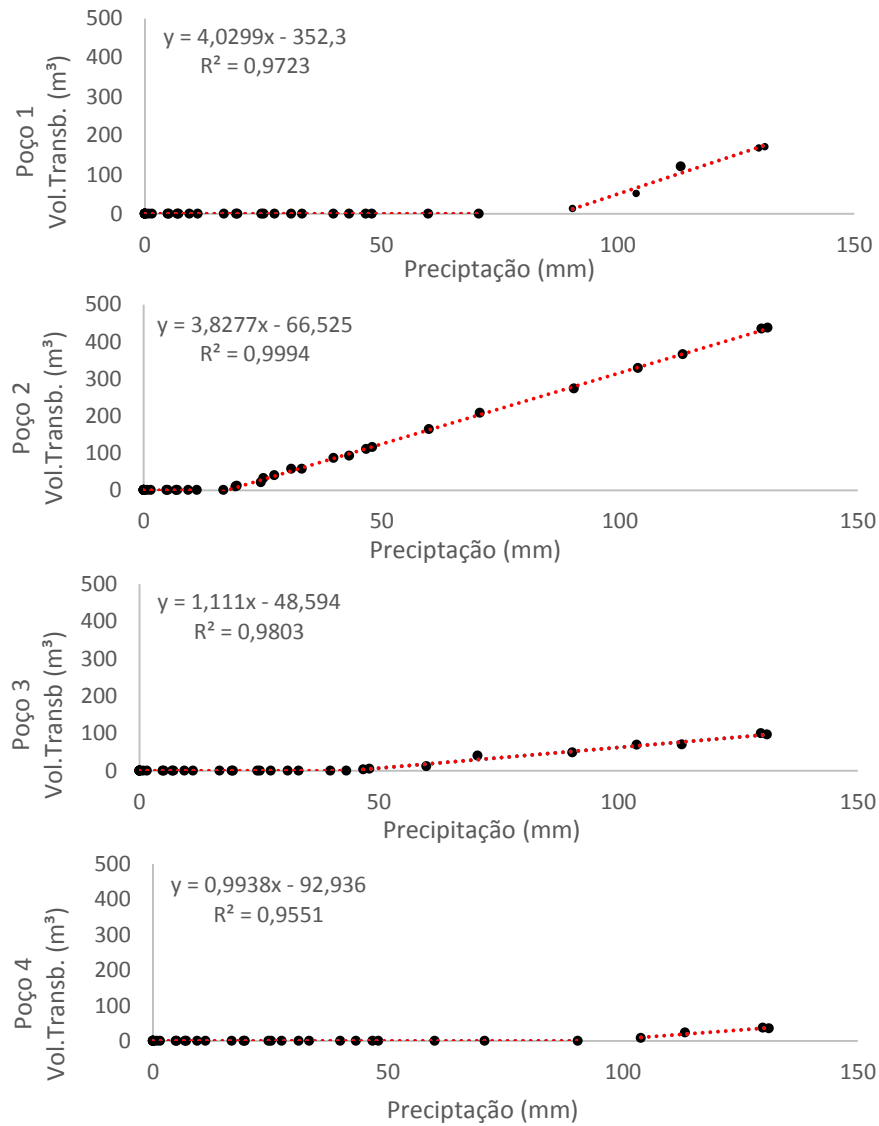
A remedição dos poços, ocorreram apenas uma única ocasião devido a questões de reforma, sendo modificado apenas os primeiros de cada sequência, com exceção do poço 7 (tabela 12). Este e os demais, não alterados, tiveram suas alturas remedidas, para aferir os valores calculando uma nova área e volume. No entanto, a área de contribuição e sua declividade não foram alterados ao longo do projeto.

A partir dos valores apresentados na Tabela 13 juntamente com a permeabilidade e precipitação, obteve-se por meio de regressão linear, os gráficos e funções de volume transbordado e volume retido nos poços de decantação, durante o período do projeto, e seus respectivos Coeficientes de Correlação (Figura 35).

**Tabela 12** - Valores médios de área e volume dos poços de decantação, área de contribuição e declividade média obtidos em uma área de mineração de bauxita em São Sebastião da Vargem Alegre, MG.

Bateria de Poços	Área Média (m <sup>2</sup> )	Volume Médio (m <sup>3</sup> )	Área de contribuição (m <sup>2</sup> )	Declividade Média (%)
1	171,87	190,64	2609,31	36,10
	181,37	236,40		
2	64,82	58,61	3797,10	23,48
	67,30	63,37		
3	45,64	45,28	1176,71	26,02
	39,59	43,74		
4	49,04	21,25	464,62	26,91
	51,31	35,56		
5	27,11	19,60	412,49	20,84
	31,03	27,02		
6	9,16	5,91	515,30	23,94
	14,23	16,14		
7	15,03	12,17	199,04	22,15
	15,03	11,40		
8	21,63	29,00	962,74	19,40
	10,93	14,70		
Estrada Sem cobertura (E.S.C)	748,61	—	—	26,14

Todas as equações proporcionaram ajuste satisfatório (Figura 35) de acordo com o Coeficiente de Correlação ( $R^2$ ) sendo que os valores variaram entre 0,9136 e 0,9794 para as variáveis de volume transbordado, e Coeficiente igual 1, ou seja, perfeita correlação, para todas as variáveis de volume retido. Porém, a presença de espaço vazio e a distância entre os pontos nos gráficos, principalmente de volume transbordado, indica a necessidade de um maior número de coletas com um período maior de observação.



**Figura 35** – Gráfico de dispersão de precipitação e volume transbordado e retido para cada conjunto de poço de decantação do sistema de drenagem em uma área de mineração de bauxita em São Sebastião da Vargem Alegre, MG.

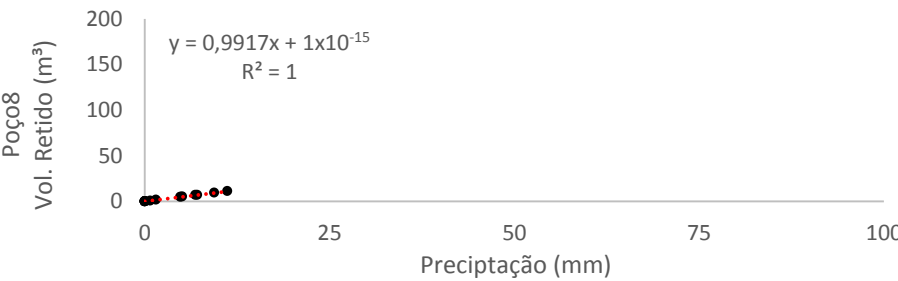
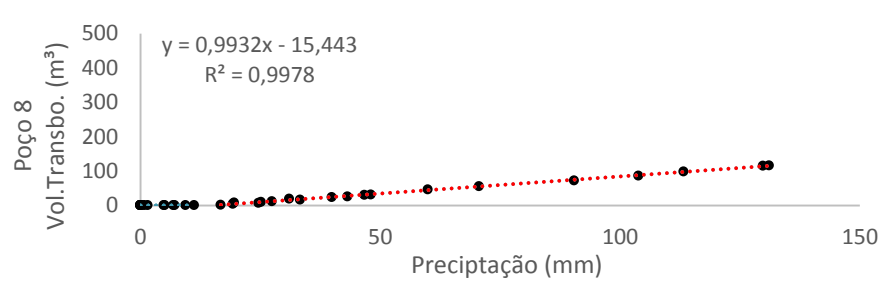
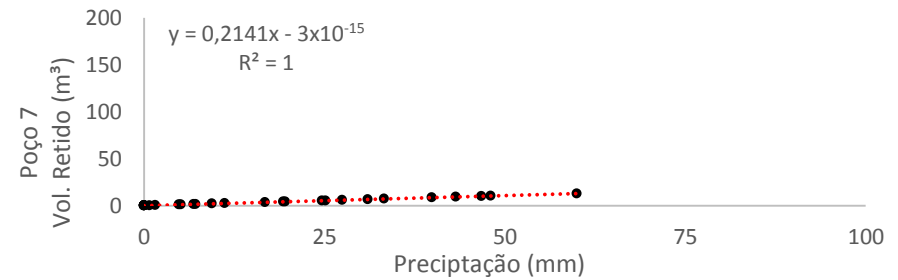
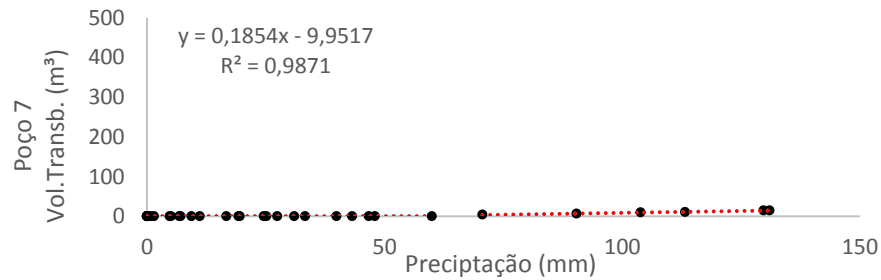
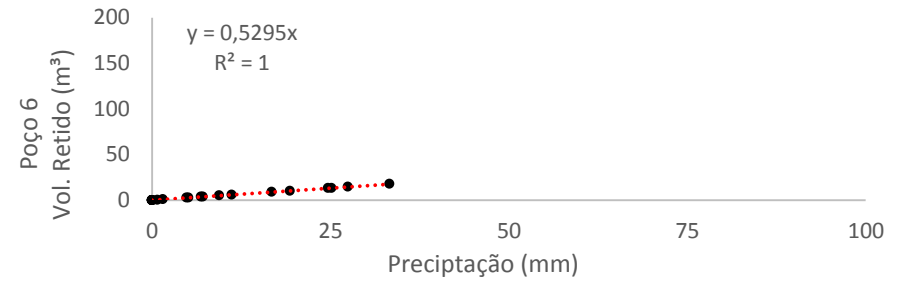
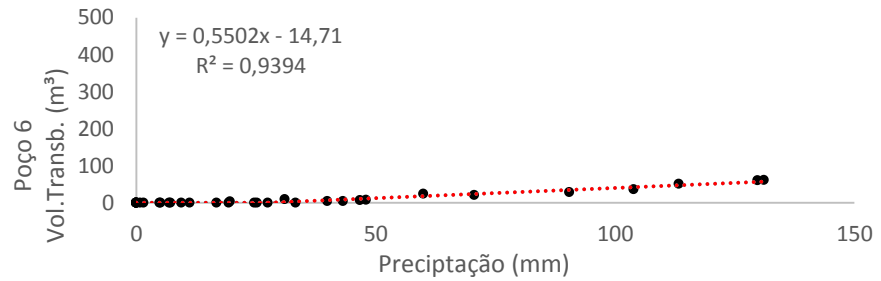
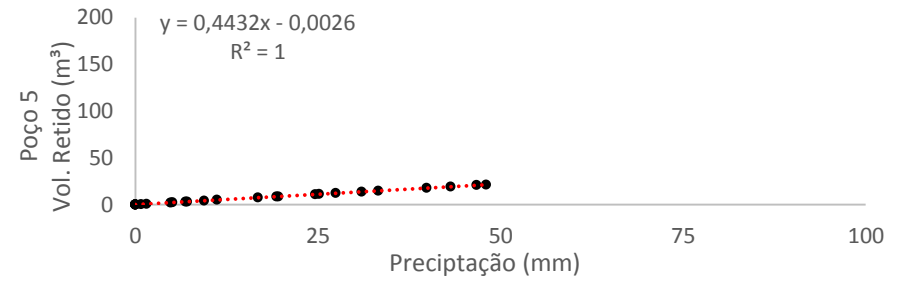
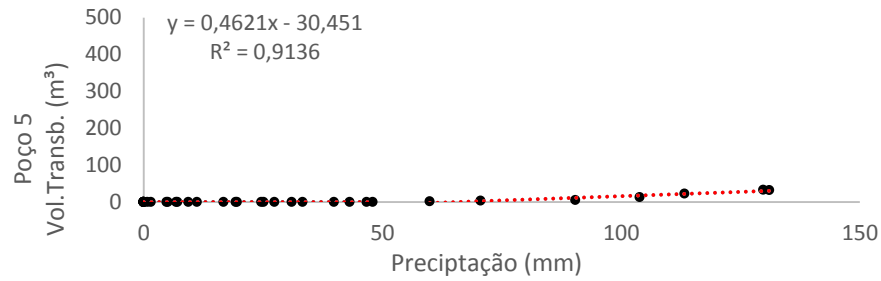


Figura 35 – Continuação.

Na Tabela 13 apresenta-se dados acumulados de precipitação, volume produzido, percolação, volume transbordado e retido mensurados entre Novembro de 2016 a Março de 2017.

**Tabela 13** - Dados acumulados de precipitação, volume produzido, percolação, volume transbordado e retido mensurados entre Novembro de 2016 a Março de 2017.

Bateria de Poços	Precipitação (mm)	Volume Produzido (m <sup>3</sup> )	Percolação (m <sup>3</sup> )	Volume transbordado (m <sup>3</sup> )	Volume retido (m <sup>3</sup> )
1	1120,58	3122,57	33,99	529,11	2593,46
2		4329,17	138,13	2846,35	1482,82
3		1365,90	309,30	444,43	921,47
4		577,04	215,28	103,28	473,76
5		495,10	129,36	109,83	385,27
6		590,92	46,56	319,00	271,92
7		239,89	27,07	58,75	181,14
8		1107,75	52,44	773,11	334,64
E.S.C		838,88	—	—	—
Total		12667,22	952,13	5183,86	6644,48

Para a estimativa do volume produzido, considerou além da área de contribuição, o volume de chuva incidente nos poços durante as precipitações. Todavia, Pires e Souza (2013), consideram o volume produzido apenas o volume de água na seção da estrada.

Na estimativa de percolação acumulada, levou-se em consideração a área do poço e a permeabilidade média diária em metros (m/dia). Na avaliação do sistema de drenagem considerou-se toda água que caiu na área de contribuição foi retida nos poços, percolado e/ou transbordada, rejeitando possíveis acúmulos em parte das estradas ou escoamentos para fora desse sistema (Figura 30).

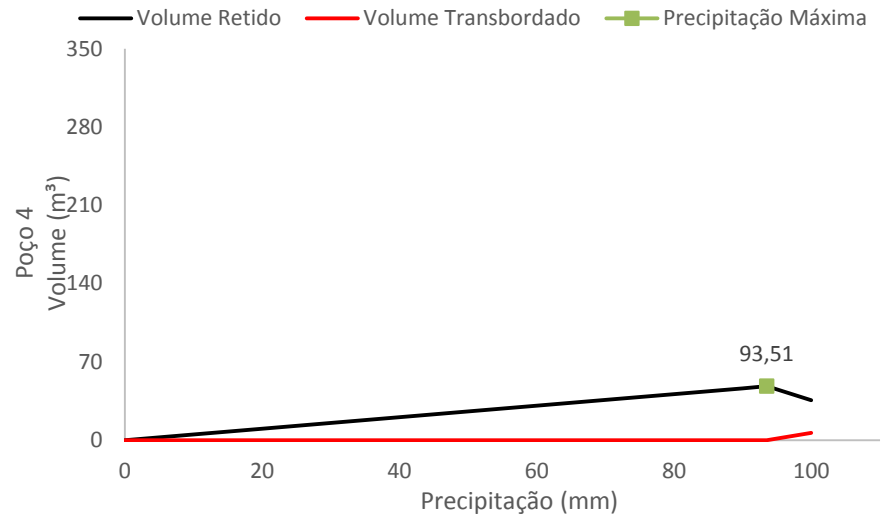
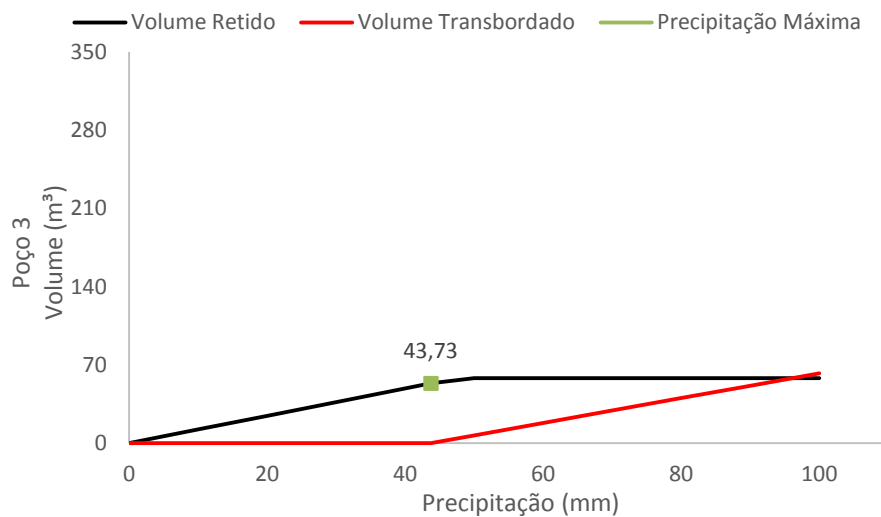
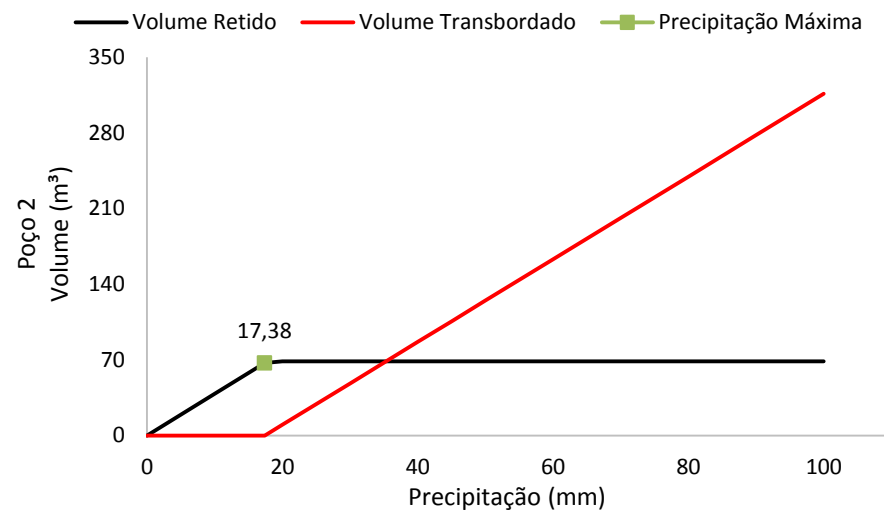
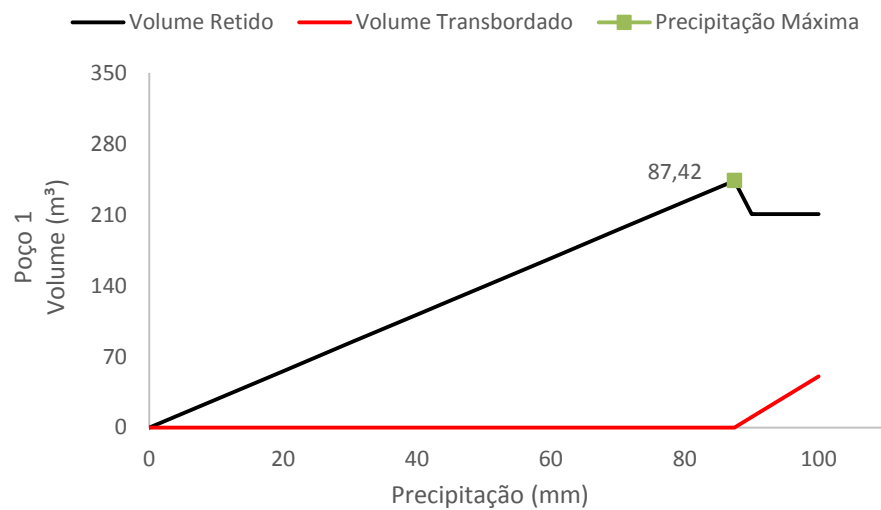
Logo, com o sistema fechado, é possível relacionar volume transbordado e retido (Figura 35). Observou-se que para o conjunto de poços de decantação, existe um valor de equilíbrio, que definiu-se como a máxima precipitação diária em que o sistema pode suportar sem que haja transbordamento de água.

Fazendo-se uma média ponderada, correlacionando Precipitações Máximas (Figura 36) dos poços de decantação com suas respectivas áreas de contribuição (Tabela 12), encontramos um valor estimado de 44,93 mm de precipitação máxima diária para toda a área de mineração. Portanto, espera-se que

em precipitações até a média apresentada, o sistema de drenagem da mina consiga absorver de maneira eficiente.

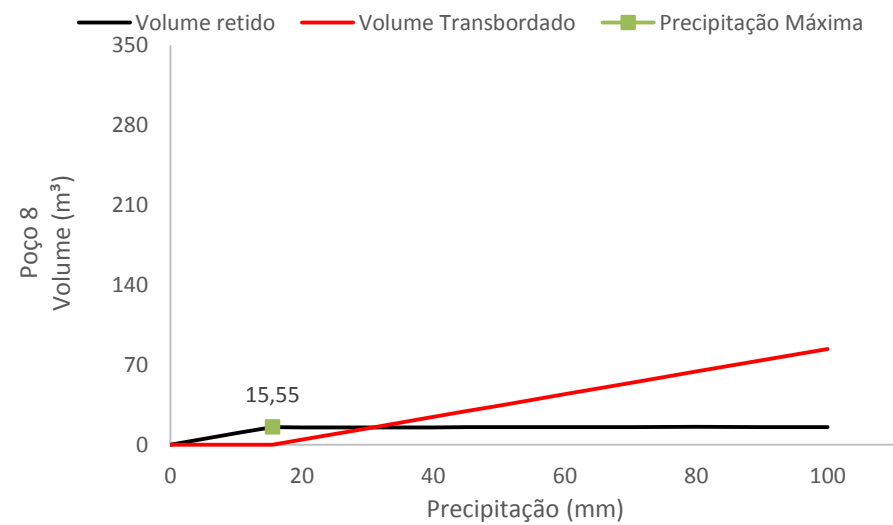
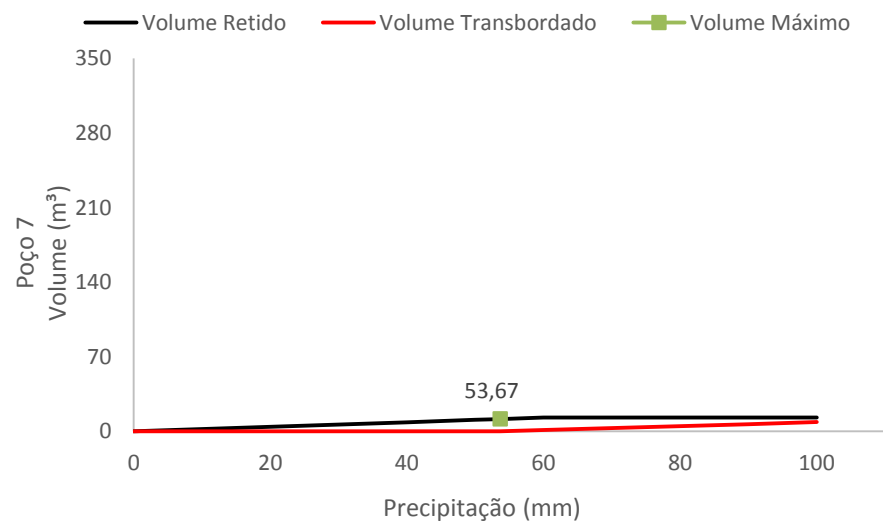
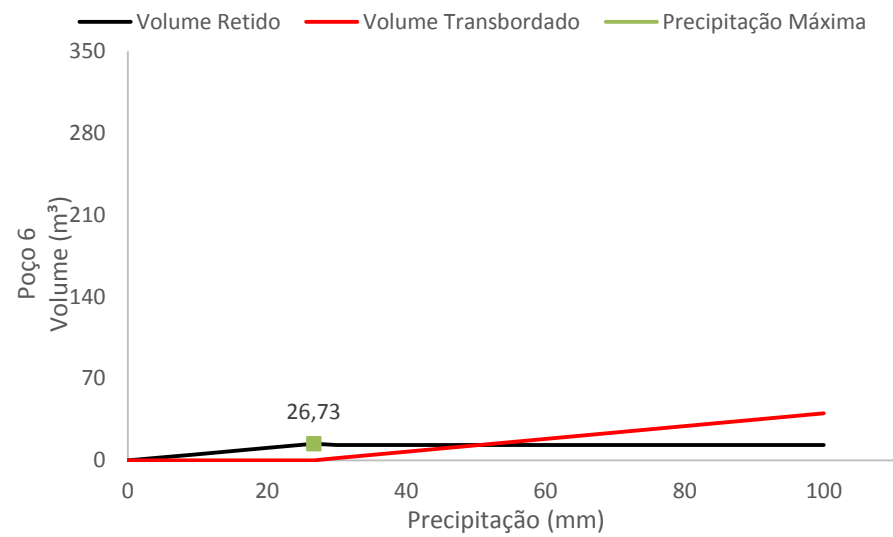
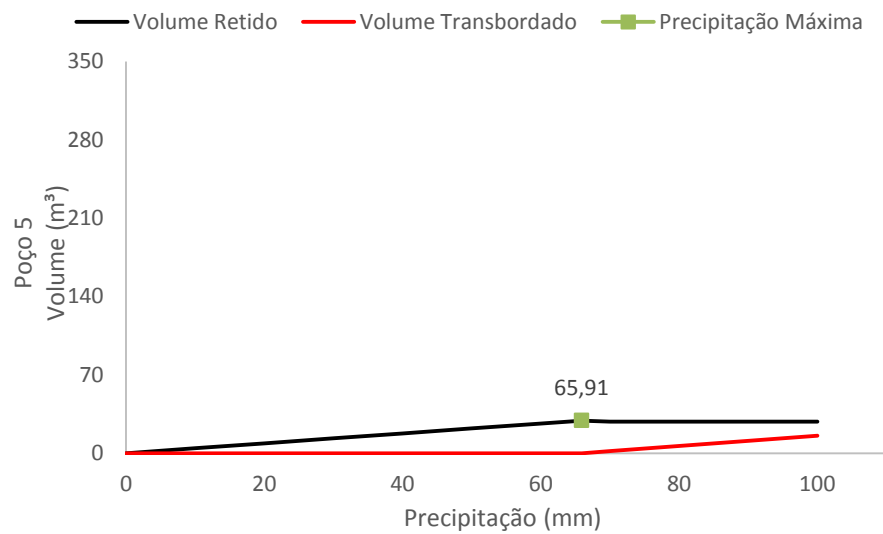
Suponhamos que durante um dia houvesse uma precipitação próxima àquela determinada como a precipitação máxima do sistema de drenagem da área de mineração de bauxita, apenas os poços das baterias 6 e 8 transbordariam. O sistema de contenção 2, mesmo havendo transbordo da maior parte do volume, o divisor de água (Figura 14) que divide o sistema, juntamente com o 1, dos demais, evitaria que a água seguisse morro abaixo, segurando-a ao entorno do poço de decantação (Figura 30).

Ressalta-se que o valor de precipitação máxima diária, 44,92 mm, para o sistema de drenagem da área de mineração de bauxita é consideravelmente maior que o valor de precipitação de 30 mm diário utilizado como referência para monitoramento e possível reconformação dos poços de decantação. Portanto, o monitoramento, para o presente sistema de drenagem estudado, torna-se adequado com margem expressiva.



**Figura 36** – Relação entre precipitação e volume transbordado e retido com suas respectivas precipitações máximas para cada conjunto de poço de decantação do sistema de drenagem em uma área de mineração de bauxita em São Sebastião da Vargem Alegre, MG





**Figura 36–** Continuação.

### 4.3 Eficiência

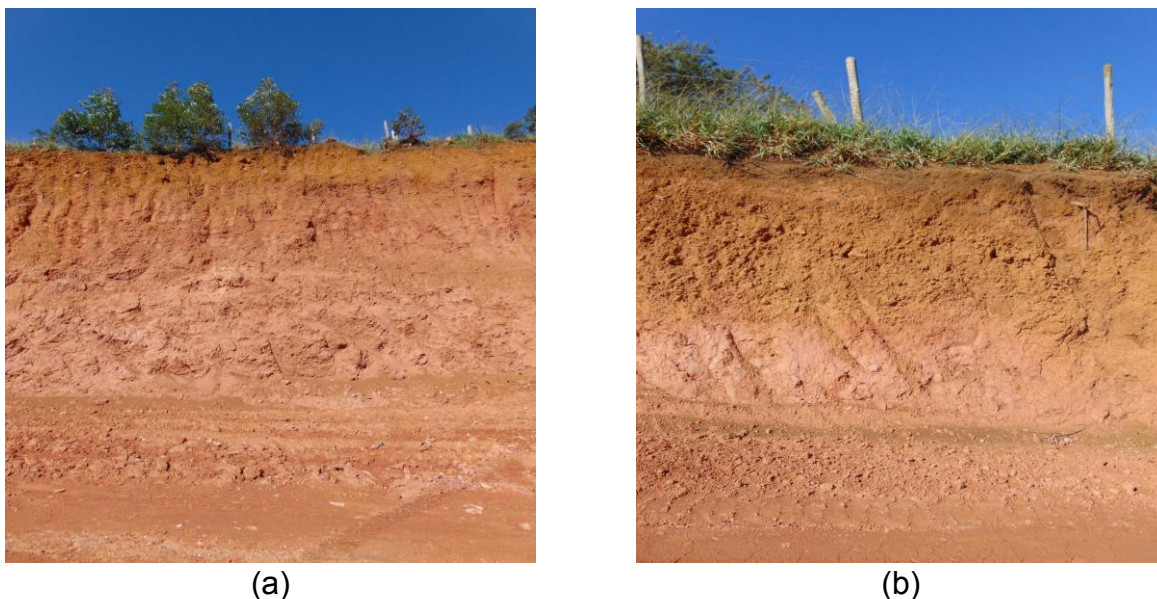
A Tabela 14 a seguir, mostra o rendimento médio dos poços de decantação do sistema de drenagem da área de mineração de bauxita. Com um rendimento geral médio de 90,44%, o sistema mostra-se com uma eficiência satisfatória principalmente por ter sido feito de maneira aleatória, sendo possível que um projeto de drenagem pré-concebido impacte positivamente o ambiente.

Logo, a média indica que para a maior parte dos eventos chuvosos o sistema conseguiu suportar a demanda evitando que as partículas carregadas saiam da área do perímetro de influência da mina, além de reduzir a velocidade da água proporcionando maior infiltração.

**Tabela 14**– Rendimento médio dos poços de decantação poço de decantação do sistema de drenagem em uma área de mineração de bauxita em São Sebastião da Vargem Alegre, MG.

Bateria de Poços	Rendimento médio (%)
1	96,59
2	81,34
3	92,85
4	96,61
5	95,32
6	86,53
7	94,55
8	79,75
Média Geral	90,44

Importante destacar que fatores como evaporação, umidade relativa, infiltração lateral nos poços de decantação, entre outros, não foram levados em consideração, podendo portanto afetar o rendimento. A exemplo bastante comum na mineração em geral, é o rebaixamento do solo com a retirada do mineral (Figura 37) e a compactação ocasionada pelo trânsito de caminhões, impactando a drenagem natural da área, tornando-se mais propensas a formação de enxurradas.



**Figura 37** – (a,b) Rebaixamento do solo devido a extração de bauxita na área de mineração em São Sebastião da Vargem Alegre, MG.

Foram identificados dois divisores topográficos (Figura 15), onde um deles localiza-se entre os poços 2 e 3, dividindo o sistema em duas partes. A primeira parte, formada pela bateria de poços 1 e 2, possui uma perda média de água de 3,41% e 18,66 % respectivamente. Contudo, devido ao divisor de água, esse volume fica retido na área, fora dos poços de decantação, acumulando-se na estrada (Figura 30).

A segunda parte, formada pelo conjunto 3 a 8 (Figura 15), apresentam perdas médias de 7,15%,3,39%,4,68%,13,47%, 5,45% e 20,25% respectivamente, além de possuir uma parte da estrada, ao final da mina, sem cobertura de poços de decantação, que produziu cerca de 838,88 m<sup>3</sup> durante o período de estudo. A consequência é escoamento da água para fora do sistema de drenagem da área de mineração ocasionando erosões.

A Figura 38 evidencia a presença de erosões laminares decorrente da chuva na saída da área de estudo. Contudo, é importante ressaltar, que tais sinais não são em decorrência somente do sistema em análise. Há no local duas outras estradas, não pertencentes a mineração, que contribuem para o processo erosivo, sem qualquer auxílio de técnicas mecânicas para conservação de solo e água.



(a)



(b)

**Figura 38** – (a,b) Sinais de erosão laminar na saída da área de mineração de bauxita em São Sebastião da Vargem Alegre, MG.

#### **4.4 Diagnósticos influentes na eficiência do sistema de drenagem**

Inicialmente, vale evidenciar, que o controle das águas superficiais na exploração de bauxita é feito através do conhecimento obtido por meio da prática cotidiana dos operadores que atuam na região, os quais se baseiam em um sistema de experiência coletiva de tentativas, erros e acertos, sem os aparatos técnicos necessários para melhor emprego das práticas de conservação de solo e água.

Para tal, deve-se ao fato do processo de exploração ser dinâmico feito em um curto espaço de tempo. O levantamento dos diagnósticos aconteceu durante o período de Novembro de 2016 a Julho de 2017.

Observou-se no período do presente trabalho, possíveis escoamentos pluviais da área de amortecimento (Figura 15) para o sistema de captação 1, principalmente em precipitações de maior volume e intensidade. O ocorrido deve-se a redução do perfil com a retirada da bauxita (Figura 37), reduzindo o poder de infiltração do solo.

O transbordo do sistema 1, ocasionava sobrecarga ao sistema 2, cuja a consequência é o acúmulo do excedente na estrada, ocorrendo em pontos de alagamentos não desejáveis. A Figura 39 mostra um evento da limpeza na estrada entre o sistema 1 e 2 devido o transbordo da água da área de captação 1 para o 2.



**Figura 39** – Ponto de alagamento na estrada entre os sistemas 1 e 2 na área de mineração de bauxita em São Sebastião da Vargem Alegre, MG.

Nota-se, que uma área de contribuição maior não resultará necessariamente em um poço de decantação com área e volume maiores (Tabela 12), pois a construção destes, feitos de maneira aleatória, ocorre sem o conhecimento prévio do levantamento topográfico, tamanho da área de contribuição, declividade e principalmente a permeabilidade das estruturas de retenção.

Os distanciamentos entre os pontos de retenção ocorrem de maneira arbitrária. Conforme a Acra (1984), esse ordenamento se dará conforme a largura da estrada e a declividade do terreno. Portanto, na área de estudo ocorre uma distribuição desigual dos poços (área e volume) em relação as áreas de contribuição, bem como o distanciamento entre eles.

Segundo as recomendações de Gomes e Werneck (2017), os poços de decantação utilizados para conduzir a drenagem em áreas de mineração de bauxita devem apresentar altura mínima de 2,5 metros, com formato trapezoidal, cuja as faces maiores estão preferencialmente inclinadas e uma de menor inclinação, formando uma rampa, de modo a facilitar, a retirada de um animal do poço e possíveis intervenções. Para Acra (1984) altura máxima é de 2 metros com o formato circular.

A Figura 40 é uma representação da predominância de poços retangulares com alturas próximas a 1 metro, sendo eles pertencentes as baterias de poços 1 e 4 respectivamente.



(a)



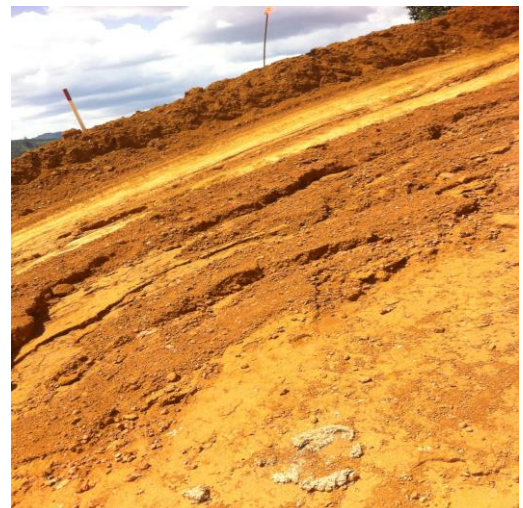
(b)

**Figura 40** – (a) Poços das baterias 1; e (b) poços da bateria 4, da área de mineração de bauxita, com pequena altura e formatos retangulares.

Tendo em vista a redução do deslocamento dos veículos, com a consequente redução de custos operacionais, e a maior facilidade no transporte do minério, é compreensível a construção da estrada no corpo de mineração em linha reta, ou seja, não em nível (Figura 8). Por outro lado, sob o ponto de vista da conservação do solo e água, Bertoni e Lombardi Neto (1999) destacam o comprimento da rampa e declividade os principais determinantes da energia cinética da água, logo, determinantes na erosão pluvial nas estradas (Figura 41).



(a)



(b)

**Figura 41** – (a,b) comprimento e declividade da rampa determinantes a erosão pluvial na estrada e barrancos laterais a estrada descobertos de vegetação susceptíveis à perda por carreamento de partículas através do escoamento superficial, na área de mineração de bauxita em São Sebastião da Vargem Alegre, MG.

Outro aspecto importante, são os barrancos laterais a estrada estarem descobertos de vegetação (Figura 41), logo, susceptíveis a perda por carreamento de partículas através do escoamento superficial. No entanto, as barraginhas amortecem os sedimentos gerados na erosão evitando a descida para a estrada de acesso à área e assoreamento dos cursos d'água.

Na pastagem (Figura 15) constatou-se conforme as dimensões apresentadas na Tabela 15, terraços de base estreita (largura entre 2 a 3 metros) dispostos em desnível, apresentando-se na forma de um patamar descontínuo, posicionados entre si de maneira aleatória, possuindo as extremidades abertas, não havendo área pra recepção do volume de água. De acordo com Pruski (2009), terraços fora do nível e de extremidades abertas tem por função escoar o volume excedente para fora do ambiente protegido, sendo recomendado para áreas impermeáveis. Contudo, o mesmo autor não recomenda o uso de terraços de base estreita em declividades superiores a 15%, sendo em situações adversas objeto de estudo criterioso.

Nesses pontos onde localizam-se os terraços, é comum a constante presença animal (Figura 9) provindos de proprietários de área vizinhas. O local é de recente reabilitação, cujo o solo realocado ainda encontra-se em estágio de consolidação.

**Tabela 15** – Dimensões dos terraços de base estreita encontrada na pastagem da área de mineração de bauxita e as respectivas declividades do terreno.

Terraço	Altura (m)	Largura (m)	Comprimento (m)	Declividade Média do Terreno
1	0,80	2,81	11,20	16,38%
2	0,70	2,62	14,90	36,57%
3	1,30	3,10	16,98	29,43%

#### 4.5 Proposições técnicas para melhoria da eficiência

O desenho e dimensionamento do sistema de drenagem das águas pluviais, desenvolvido por empresas mineradoras, deve ocorrer dentro de um sistema de gerenciamento integrado a atividade mineradora, considerando aspectos do uso e ocupação do solo, da infraestrutura da mineração, os aspectos físicos da micro bacia impactada, segurança da operação, proteção ambiental e aspectos econômicos e

sociais, de maneira a maximizar os benefícios das medidas adotadas (SALAZAR JÚNIOR,2004).

Na abertura da mina, após o levantamento topográfico, fazia-se necessário o planejamento das práticas de conservação de solos e água conforme a identificação das curvas de níveis e os divisores topográficos do terreno, com o objetivo de melhor empregar as práticas de conservação do solo e o estabelecimento das estradas.

Com os divisores de água detectados, constrói-se o sistema de drenagem de modo a direcionar a água da enxurrada para as bacias de retenção, nas quais, serão alocadas em função do declive e dimensionadas conforme o volume a ser armazenado. As curvas de níveis funcionam para posicionar estradas e terraços, além de guia nas operações de preparo do solo e plantio de culturas (PIRES e CAETANO, 2013).

Identificados as curvas de nível ou niveladas básicas a partir do topo do morro, posiciona-se a estrada no terreno. As estradas entre as curvas de níveis (estradas ascendentes ou pendentes) devem ser, sempre que possível, inclinadas (enviesadas) e desencontradas, apresentando uma ligeira inclinação de 0,05% no sentido do barranco de modo a encaminhar a água da chuva para as áreas de contenção ou terraços. As estradas em nível (niveladas), devem ser distribuídas em intervalos múltiplos das curvas de nível, ou seja, curvas marcadas a cada 30 m, resultaria estradas em nível a 60 m (MATIELLO,1991).

Para Camilo (2007), durante a construção da estrada faz-se o abaulamento do leito com uma declividade de 2 a 5%, para evitar o acúmulo de água no centro da pista de rolamento e permitir a condução das enxurradas para os pontos pré-estabelecidos.

Além disso, as rampas mais lisas e cumpridas podem ser pedregulhadas ou haver o parcelamento do seu comprimento (alteração da declividade) de modo a reduzir a energia cinética da água. Sempre que possível os barrancos laterais devem ser empregado gramíneas de modo a reduzir a perda de solo (DEMARCHI et al.,2003).

Em suma, deve-se evitar ao máximo baixadas sujeitas a alagamentos, rampas cumpridas e grandes declives (Figura 39, Figura 41), de modo a fazermos uma distribuição racional dos caminhos, ou seja, colocar as estradas mais próximas das curvas de nível.



A construção das bacias ocorre em função da área de exposição da seção trabalhada (áreas de geração de escoamento superficial ou áreas de contribuição) e a declividade, ao serem dimensionadas, faz-se o cálculo do volume de água a ser captado, considerando-se a área da estrada ou área de livre exposição e a precipitação pluviométrica média anual, adicionando 20% as dimensões relativas ao acamamento ocorrido pela terra movimentada. A sua locação será feita de um ângulo aproximado de 45 ° da estrada, onde os pontos internos da bacia terão um desnível de no máximo 2 metros ao ponto superior (entrada) da bacia de retenção (ACRA,1984).

Segundo o referido autor o dimensionamento e as distâncias entre as áreas de contenção se dará:

Considerando uma altura h, no qual será uma precipitação máxima de 100 milímetros por hora ou seja 0,1 metros, uma seção da bacia de comprimento C e largura L temos o volume de água a ser captada dada pela Equação 7.

$$V = 0,1xCxL \quad \text{Equação 7}$$

A bacia tem formato de semicírculo, com a finalidade prática teremos os valores de altura média (h), raio (r) e  $\pi$  igual a 1 metro, L e 3, logo obteremos o volume da bacia de retenção pela Equação 8:

$$V = \frac{\pi r^2}{2} \times h = 1,5L^2 \quad \text{Equação 8}$$

A bacia deverá ter, no mínimo, o volume necessário para a água caída, dada pela Equação 9:

$$0,1xCxL = 1,5L^2 \Rightarrow C = 15xL \quad \text{Equação 9}$$

Portanto, a partir das Equações 7 e 8, teremos o cálculo do volume da seção trabalhada e o volume do poço de decantação e suas respectivas distâncias, a qual por motivos de segurança, você poderá reduzir a distância C em 20% conforme demonstrado na Equação 10.

$$C = 12xL \quad \text{Equação 10}$$

A Tabela 16 mostra as correções do cálculo de distância conforme a declividade e largura da estrada, pois aumentando a declividade da estrada o volume mantem-se o mesmo porém a velocidade da água captada aumenta.

**Tabela 16** – Determinação da distância entre as bacias em função da variação do declive e da largura da estrada. Fonte: Adaptado Acra, 1984.

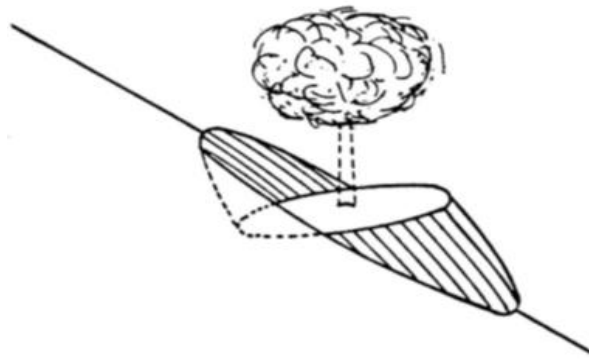
Declividade	Fórmula
$\leq 5\%$	$C = 12xL$
$> 5\%$ até $10\%$	$C = 6xL$
$> 10\%$ até $15\%$	$C = 4xL$
$> 15\%$ até $20\%$	$C = 3xL$

Segundo Pires e Caetano (2013), sempre que possível a construção das bacias de contenção ocorrerá nos dois lados da estrada, em declividades até 20%, em solos não argilosos e de boa permeabilidade. Para tanto, em situações contrárias, corrigi se a declividade utilizando a escarificação no fundo da bacia a fim de potencializar a permeabilidade de maneira a corrigir fatores adversos.

Conforme a declividade, acima de 10%, das áreas de contribuição apresentada pela Tabela 12, recomenda-se a utilização de pequenas bacias de retenção posicionadas em série nos pontos de alocação (CARVALHO; ROBERTO, 2006).

Nas regiões de pastagens em terrenos íngremes, com solos argilosos e subsolo adensado, faz-se o uso de terraços de base estreitas em desnível (gradientes) do tipo banquetas individuais, posicionados paralelamente e mais próximos um dos outros conforme a declividade. Logo, para essa situação faz-se necessário que tenham locais apropriados para a retenção da água, evitando assim o acúmulo em locais indesejados.

Na execução do terraceamento em banquetas (patamar descontínuo), devido à declividade, são empregadas ferramentas manuais para maior segurança dos operadores. Inicialmente, retira-se a camada superior mais fértil para a realização do corte no barranco. Feito o corte, a terra deslocada será usada para a construção do aterro, o qual apresentará uma ligeira declividade no sentido inverso a declividade original do terreno. Por fim, revegeta-se o aterro, com o incremento da camada superior fértil removida inicialmente, proporcionando-se melhor estabilidade ao terraço e conseqüentemente ao terreno (PRUSKI,2009).



**Figura 42** – Terraços tipo banquetas individuais. Fonte: Adaptado Bertolini et al., 1989.

O comprimento e gradiente de caimento para os lados se dará conforme as características relacionadas, a declividade do terreno e permeabilidade do solo (FERRAREZI, 2009). Em geral, para terraços com gradiente utiliza-se comprimento máximo de 500 a 600 metros e gradiente de caimento constante de 0,3%, até aproximados 5%.

O espaçamento vertical ou desnível (EV) e horizontal é (EH) para culturas permanentes é dado pela tabela 17, disposta em anexo, cuja representa a função de Bentley, a qual associará declividade, tipo de solo e cultura (PIRES; CAETANO, 2013).

Por fim, faz-se necessário o controle de bovinos junto aos proprietários da região. O efeito do pastoreio provoca o aumento da exportação de nutrientes e o aumento da erosão ocasionado pela compactação do solo (FAVERO et al., 2008), portanto, a reestruturação do solo com o aumento de matéria orgânica, microbiota e estabelecimento vegetativo é comprometida além de proporcionar a formação de sucros e voçorocas.

## 5 Considerações Finais

A eficiência do Sistema não se apresenta como um resultado conclusivo, pois o período de observação de Novembro de 2016 a Março de 2017 é curto, servindo prioritariamente para observar o funcionamento do sistema de drenagem empírico e avaliar a sua dinâmica no período de maior intensidade de precipitações. Por outro lado, pode-se considerar que um rendimento médio de 90,44% seja satisfatório para o tempo observado.

Faz-se necessário á elaboração de um projeto de sistema de drenagem, tendo em vista que os recursos necessários já existem nas empresas mineradoras, havendo portanto, apenas a iniciativa para elaboração e adequação da atividade na rotina do empreendimento.

Porém o espaço limitado, declividade, a dinâmica de exploração e o fato das terras exploradas serem arrendadas, são fatores limitantes para a elaboração de um sistema de drenagem pré-concebido.

O presente trabalho abre discussão para projeção de um modelo de drenagem ideal para as minas de bauxita e como esse sistema impactaria as mineradoras no ponto de vista ambiental, econômico e social. Logo, é recomendável a realização de estudos contínuos ao trabalho realizado, sendo a presente dissertação, apenas o início das discussões sobre o tema.

## Bibliografia

ALONSO, T. P. Condutividade hidráulica de solos compactados em ensaios com permeâmetro de parede flexível. **Dissertação**. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, São Paulo, 2005. 120 p.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS - **ASAE S313.3: soil cone penetrometer**. St. Joseph, 1999. 834p.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, **Fellows Collection**, 1929-1969. Disponível em: <<http://siris-archives.si.edu/>> Acesso em: 06 de maio de 2017.

ARSHAD, M.A.; LOWERY, B.;GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W.;ONES, A.J., Eds. Methods for assessing soilquality. **Soil Science Society of American Journal**, p.123-141, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo - ensaio de compactação: método de ensaio**. Rio de Janeiro-RJ: [s.n.], 1986 b. 10 p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14545: Solo-Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos: método de ensaio**. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13292, Solo -Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares a carga constante**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1995 b. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508: Massa específica dos sólidos**. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1984. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização: método de ensaio**. Rio de Janeiro-RJ: [s.n.], 1986 a. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO – ABAL. **Anuário Mineral Brasileiro: Principais substâncias metálicas**. São Paulo, 2016.

BARBOSA, A. R. J. **Elementos de Hidrologia Aplicados ao Estudo de Graduação**. Apostila de curso. Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2014.

BARROS, D. A. D.; GUIMARÃES, J. C. C.; PEREIRA, J. A. A.; BORGES, L. A. C.; SILVA, R. A.; PEREIRA, A. A. S.. Characterization of the bauxite mining of the Poços de Caldas alkaline massif and its socio-environmental impacts. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 65, n. 1, p. 127-133, 2012.

BASTOS, M. J. N. **Aspecto sobre sistema de drenagem em pedreiras a céu aberto**. Visa Consultores. Março, 2000.

BERTOLINI, D.; GALETTI, P. A.; DRUGOWICH, M. I. Tipos e formas de terracos. In: Simposio sobre terraceamento agrícola, 1989, Campinas. **Anais...** Campinas: Fundacao Cargill, p.79-98. 1989.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 4.ed. São Paulo: Ícone, 1999. 355p.

BORGES, S. R. **Tese** .Qualidade do solo em áreas em recuperação com forrageiras e cafeeiro pós-mineração de bauxita. Viçosa-MG, Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós Graduação em Solo e Planta, 2013, 124p.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. 14th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2008.

BRASIL, D.N.I.T. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Manual de drenagem de Rodovias**. 2 ed. Rio de Janeiro, Brasil, 2006.

BRASIL, D.N.P.M. Departamento Nacional de Produção Mineral **Anuário Mineral Brasileiro 2006**. 192 São Paulo, UNESP, Geociências, v. 27, n. 2, p. 171-192, 2008 Brasília: Departamento Nacional da Produção Mineral, 2006 (a). Disponível em: < [www.dnpm.gov.br](http://www.dnpm.gov.br) > Acesso em: 18 maio de 2017.

BRASIL, M.M.E. Ministério de Minas e Energia. **Contrato Nº 48000.003155/2007-17: Desenvolvimento de estudos para elaboração do plano duodecenal (2010-2030) de geologia, mineração e transformação mineral**.,v. 4, fev.2010.

BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of the ASAE**, v. 33, p. 519-524, 1990.

CAMILO, I. B. **Recomendações técnicas para adequação de estradas rurais**. EMPAER-MT, 2007.

CANARACHE, A. **Penetrometer - a generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration**. Soil and Tillage Research, Amsterdam, v.16, p.51-70, 1990.

CANESCHI, F. P. **Tese**. Estudos geoambientais em solos modificados quimicamente. Viçosa-MG, Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2012, 117 p.

CAPUTO, H.P. **Mecânica dos Solos e suas aplicações**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996. 248p.

CARVALHO DE, ALTAIR, R. Bacias de Captação de Enxurradas. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 1, n. 1, 2006.

CARRARO, J. **Permeabilidade de solo arenoso e argiloso em função da umidade de compactação para uso em aterro**. Clube de Autores, 2016. 100p.

CARTER, R. W.; WILLIAMS, M. R., LAMOREAUX, P. E.; HASTINGS, W. W. Water resources and hydrology of southeastern Alabama: Alabama Geol. **Survey Spec. Rept**, v. 20, p. 265, 1949.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. Rio de Janeiro: CPRM, p.372,1994.

CASTRO, L. M.; BARROS, D. A.; PEREIRA, A. A. S. Monitoramento de Águas Superficiais em Área de Exploração de Bauxita, no Planalto de Poços de Caldas, Minas Gerais. **Revista Científica Aprender**, 3ª edição, 2009.

CHAGAS, A. P.; MANZI, P. **Argilas, as essências da terra**. São Paulo: Moderna, 1996. 54 p.

COSTA, W. G. S. Efeito da variação do gradiente hidráulico na estrutura de um solo compactado. Viçosa –MG, Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, **Dissertação**,2016, 80p.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. São Paulo: Thomson, 2007. 561 p. il.

DEMARCHI, L.C.; Rabello, L.R.; Santos, N.B.; Franco, O. and Correa, R.O. (2003) - **Adequação de estradas rurais: Manual Técnico do ano de 2003**. Campinas: CATI, 2003. 64 p. *CATI. Manual Técnico*, 77.

DIAS, J. M. A. Dinâmica Sedimentar e Evolução Recente da Plataforma Continental Portuguesa Setentrional. **Dissertação**, Universidade de Lisboa, p.384, 1987.

DIAS, J. M. A. **A análise sedimentar e o conhecimento dos sistemas marinhos: Uma Introdução à Oceanografia Geológica**. Universidade do Algarve, Faro, Portugal, p. 84, 2004.

DNIT, DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 018/2006-ES: Drenagem – Sarjetas e Valetas-Especificação de serviços**. Rio de Janeiro, Departamento Nacional De Infra-Estrutura De Transportes, 2006. 7 p.

DNIT, DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES 2006. **Manual de drenagem de Rodovias**. Rio de Janeiro, 2. ed. 2006. 304p.

DOMINGUES, A. F.; BOSON, P. H. G.; ALÍPAZ, S. A gestão dos recursos hídricos e a mineração. **Brasília: Agencia Nacional de Água e Instituto Brasileiro de Mineração**, 2006.

DUARTE, R. M. R.; CASAGRANDE, J. C. A interação solo-vegetação na recuperação de áreas degradadas. **MANUAL PARA RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS DO ESTADO DE SÃO PAULO**, p. 52, 2006.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA – EMBRAPA. **Praticas de Conservacao de Solo e Agua**. Circular Tecnica, Campina Grande, PB. 2012. 24p.7

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA – EMBRAPA, ALGODÃO Cultivo do Algodão Irrigado. **Sistemas de Produção**, 2003.

FALKER. PenetroLOG PLG1020 - **Medidor Eletrônico de Compactação do Solo**. Disponível em: < <http://www.falker.com.br/download.php> > . Acesso em: 24 maio de 2017.

FANTINATTI, P. H. A.; NETO, F. P. F.; TIBANA, S.; de Almeida, F. T. **Ensaio de Permeabilidade In Situ em Solos Saturados**. Laboratório de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro, Brasil. 2006.5p.

FÁVERO, C.; LOVO, I. C.; SÁ MENDONÇA, Eduardo de. Recuperação de área degradada com sistema agroflorestal no Vale do Rio Doce, Minas Gerais. **Revista Árvore**, v. 32, n. 5, 2008.

FOLK, R. L. The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary-rock nomenclature. **The Journal of Geology**, v. 62, n. 4, p. 344-359, 1954.



GERSCOVICH, D.M.S. **Fluxo em solos saturados**. Rio de Janeiro, RJ. Departamento de Estrutura e fundações.Faculdade de Engenharia. Notas de Aula.169p, 2011.

GOMES, M. G.; WERNECK, G. S. S. **Padrão Operacional: Dispositivos De Drenagem – Execução De Bueiros e Passagens D'agua**. Miraf, MG. Votorantim Metais Alumínio Zona da Mata, Operação de Mina, v. 1.1, 4p., 2017.

GOMES, R. L. R.; da SILVA, M. C.; da COSTA, F. R.; de LIMA JUNIOR, A. F.; de OLIVEIRA, I. P.; da SILVA, D. B. Propriedades físicas e teor de matéria orgânica do solo sob diferentes coberturas vegetais. **Revista Eletrônica Faculdade Montes Belos**, v. 9, n. 1, 2015.

GOMES, T. A. T.; DA COSTA, K. S. Estudo do coeficiente de permeabilidade em ensaios de poço pelo padrão ABGE: Complexo Alcalino Carbonatítico do Barreiro (CACB), ARAXÁ-MG. **Águas Subterrâneas**, 2016.

GRANT, C. A.; LAFOND, G. P. The effects of tillage systems and crop sequences on soil bulk density and penetration resistance on a clay soil in Southern Saskatchewan. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 73, n. 2, p. 223-232. 1993.

GUIMARÃES, J.C.C.; CHAGAS, J. M.; CAMPOS, C.C.F.; ALECRIM, E.F.; MACHADO, F.S. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer, Goiânia, v.8, n.15; p. 2012 321

HYDRO, 2016. IAEG (International Association for Engineering Geology). Classification of rocks and soils for engineering geological mapping. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 19. n. 1, 1979.

JÚNIOR, E. do AMARAL, V. Modelagem numérica para avaliação do controle das águas na mineração. 2014. **Tese de Doutorado**. PUC-Rio.

JURY, W. A.; GARDNER, W. R.; GARDNER, W. H. **Soil physics**. New York, John Wiley&Sons. 1991.

KÄMPF, N.; CURI, N.; MARQUES, JJ; GUILHERME, LRG; LIMA, JM. **Argilominerais em solos brasileiros**. Embrapa Semiárido. Tópicos em Ciência do Solo, Viçosa, MG, v. 3, p. 1-54, 2003.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: Relação solo-água-plantas**. São Paulo, Editora agrônômica Ceres, 1979.262p.

LACERDA, C. F. **Relações solo - água - planta em ambientes naturais e agrícolas do nordeste brasileiro**. 1. ed. Recife, PE: UFRP, 2007. 78 p

LEITE, J. C.; PARAGUASSÚ, A. B.; ZUQUETTE, L. V. **An equipment for percolation test in soil columns**. In: International Congress on Environmental Geotechnics, 4th, Lisboa, Portugal, 1998. Anais, V.1, pp. 211-215.

LEPSCH, I, F; **Formação e Conservação dos Solos**. São Paulo, SP: Oficina de Texto, 2010. 2 ed. 216p.

LOPES, R. F.; BRANQUINHO, J. A. **Jazidas de bauxita da Zona da Mata de Minas Gerais**. Schobbenhaus C, Coelho CES, coordenadores. Principais depósitos minerais do Brasil. Brasília: Departamento Nacional da Produção Mineral, v. 3, 1988.

LOURA, D. S. **Levantamento e Conservação do Solo: práticas conservacionistas de solos e águas**. Terraceamento agrícola, UFLA, 2011.

MACHADO, F.B.; MOREIRA, C.A.; ZANARDO, A; ANDRE, A.C.;GODOY, A.M.; FERREIRA, J. A.; GALEMBECK, T.; NARDY, A.J.R.; ARTUR, A.C.; OLIVEIRA, M.A.F.de. **Atlas de Rochas**. [on-line]. ISBN: 85-89082-12-1. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/museudpm>>. Acesso em: 20 de Abril de 2017.

MACHADO, P.L.O.A.; WADT, P.G.S. **Boas práticas agrícolas: terraceamento**. Rio Branco: Embrapa, 1. Ed., 2016. 9p.

MACHADO, S. L.; MACHADO, M. F. C. **Mecânica dos Solos I - Conceitos Introdutórios**. Universidade Federal da Bahia – Escola Politécnica. Departamento de Ciências e Tecnologia dos Materiais – Setor de Geotecnia. 1997.167p.

MANTOVANI, E. C. Compactação do solo. **Informe Agropecuário, Belo Horizonte**, v. 13, n. 147, p. 52-55, 1987.

MARANGON, M. **Mecânica dos Solos II**. Universidade Federal de Juiz de Fora. Faculdade de Engenharia. Departamento de Transportes. 2013.

MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em Sistemas Particulados**, Rio de Janeiro: e-papers, 2002. 2 ed. 152p.

MATIELLO, J.B. **O café do cultivo ao consumo**. São Paulo, Globo, 1991.320p.

MCMANUS, D. A. Modern versus relict sediment on the continental shelf. **Geological Society of America Bulletin**, v. 86, n. 8, p. 1154-1160, 1975.

MELFI, A. J. Brazilian bauxite deposits: a review. **Brazilian Bauxites**, 1rd ed. **USP/FAPESP/ORSTOM, São Paulo**, p. 3-22, 1997.

MELO, A. C. G.; CONTIERI, W.; MARTINS, S. E.; ZACCONI, L. T.; BARBOSA, L. M.; POTOMATTI, A.; SILVA, P. M. S. Diagnóstico da recuperação de áreas degradadas no Estado de São Paulo: diretrizes e recomendações. **V simpósio Nacional sobre Recuperação de Áreas degradadas-água e Biodiversidade, Belo Horizonte**, p. 469-471, 2002.

MOLIN, J. P.; DIAS, C. T. D.S.; CARBONERA, L. Estudos com penetrometria: Novos equipamentos e amostragem correta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 584-590, 2012.

MORALES, P. R. D. **Manual Prático de Drenagem**. IME, Fundação Ricardo Franco, Rio de Janeiro, 2003, 160p.

NUNES, W. A. G. A.; KER, J. C.; SCHAEFER C. E. G. R.; FERNANDES FILHO. E. I.; GOMES, F. H. Relação solo-paisagem-material de origem e gênese de alguns solos no domínio do “Mar de Morros”, Minas Gerais. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 25, n. 2, 2001.

OLIVEIRA, J. S. de. Análise sedimentar em zonas costeiras: subsídio ao diagnóstico ambiental da Lagoa do Peri – Ilha de Santa Catarina-SC, Brasil. **Dissertação**, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2002, 154p.

PACHECO E SILVA, D. Influência da contaminação por cloreto de cobre na resistência ao cisalhamento de solos utilizados em liners. 2005. 136 f. **Dissertação**. (Mestre em Geotecnia) Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2005.

PAIVA, T. C.; CANÇADO, R. Z. L. Melhoria da qualidade da água em bacias de decantação localizadas em áreas de extração de areia. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 61, n. 3, 2008.

PARANÁ (Estado). Secretaria de Estado de Agricultura e do Abastecimento. **Manual técnico do subprograma de manejo e conservação do solo**. Curitiba, 1994. 306 p.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas/3a Edição**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 367 p.

PIRES, F.R. SOUZA, C.M. **Práticas mecânicas de conservação do solo e da água**. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2003. 176p.

PIRES, J. L. O Planejamento das Atividades de Mineração para a Área Conurbada de Florianópolis. **Dissertação**, Universidade Federal de Santa Catarina Florianópolis, 2000, 150p

PRUSKY, F. F. **Conservação de solo e água: Práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. Viçosa. Ed. UFV. 2009. 279p.

REICHARDT, K., TIMM, L.C. **Solo, Planta e atmosfera. Conceitos, Processos e Aplicações**. Barueri: Manole, 2004, 478p.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. **Tópicos em ciência do solo**, v. 5, p. 49-134, 2007.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. **Propriedades física do solo**. Universidade Federal de Santa Maria. Centro de Ciências Rurais. Santa Maria, 2006. 18p.

RIBEIRO, A. I.; LONGO, R. M.; TEIXEIRA FILHO, A.; MELO, W.J. Diagnóstico de uma área compactada por atividade minerária, na floresta amazônica, empregando métodos geoestatísticos à variável resistência mecânica à penetração do solo. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 36, n. 1, p. 83-90, 2006.

RÖHRLICH, M.; MISTRY, M.; RUHRBERG, M. e MARTENS, P. N. **Bauxite mining in Brazil, different viewpoints concerning environmental and sustainable development**. VI SMMT/XVIII ENTMM – Rio de Janeiro/Brasil, p.507-513, 2001.

ROMANO, A. W.; CASTAÑEDA, C. A tectônica distensiva pós-mesozóica no condicionamento dos depósitos de bauxita da Zona da Mata mineira. **Geonomos, IGC/UFMG**, v. 14, n. 1, p. 2, 2006.

SALAZAR JÚNIOR, O. **Plano Diretor de Mineração para Região Metropolitana de Curitiba**. Curitiba: MINEROPAR, 2004. 2V. 288 p. Disponível em: <<http://www.pr.gov.br/mineropar/publicacoes>>. Acesso em: 10 de dezembro de 2017.

SAMPAIO, J.A.; ANDRADE, M.C.; DUTRA A.J.B. "Bauxita", In: Luz, A.B. da., Lins, F.F (Eds.) **Rochas e Minerais Industriais**, 2 ed. Cap. 14, Rio de Janeiro, Brasil, Centro de Tecnologia Mineral, 2009.

SANTOS, K. S.; MONTENEGRO, A. A.; de AIMEIDA, B. G.; MONTENEGRO, S. M.; da S ANDRADE, T.; de P, F. J.; ROBERTSON, V. Variabilidade espacial de atributos físicos em solos de vale aluvial no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 16, n. 8, 2012.

SANTOS, L. M. dos. Erosão em taludes de corte: métodos de proteção e estabilização. **Trabalho de Graduação**, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, Brasil, p.75. 2014.

SILVA, A.; FIRMINA, M.; BASTOS, J.; SILVA, S. **Impacto ambiental das explorações mineiras**. Universidade do Porto. Projeto de Extensão, Porto, 2014/2015, 18p.

SILVA da, T. D.O. **Croqui de área de exploração de bauxita no corpo de mineração no município de São Sebastião da Vargem Alegre, MG**. Companhia Brasileira de Alumínio, Planejamento de Lavra e Geologia. Miraf, MG, 2015.

SILVA FILHO, E. B.; ALVES, M. C. M.; DA MOTTA, M. Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas. **Revista Matéria**, v. 12, n. 2, p. 322-338, 2007. Disponível em: <<http://www.hydro.com/pt-BR/a-hydro-no-brasil/Sobre-o-aluminio/Ciclo-de-vida-do-aluminio/Refino-da-alumina/>>. Acesso em: 19 de maio de 2017.

SILVA, R. B.; DIAS JUNIOR, M.S.; SILVA, F. A. M.; FOLE, S. M. O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um latossolo dos cerrados. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p.973-983, 2003.

SILVEIRA, L. M. Drenagem em minas de bauxita na região de poços de caldas. **Trabalho de Graduação**, Universidade Federal de Alfenas, Alfenas, Brasil, p.32, 2014.

SIQUEIRA, R. H. da Silva. Caracterização do encrostamento superficial do solo cultivado com cafeeiros submetido ao controle de plantas daninhas com herbicida de pré-emergência. **Tese**, Universidade Federal de Lavras, Brasil, 81p, 2015.

SOARES, C. C. V. Gênese e Evolução Mineralógica, Micromorfológica e Geoquímica da Bauxita de Espera Feliz, MG. **Dissertação**. Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2013, 82p.

TAYLOR, D.W. **Fundamentals of soil mechanics**. Chapman And Hall, Limited.; New York, 1948.700p.

WADELL, H. Volume, shape, and roundness of rock particles. **The Journal of Geology**, v. 40, n. 5, p. 443-451, 1932.

## ANEXO

**Tabela 17 – Espaçamento para terraços com gradiente em culturas permanente.**  
 Fonte: Adaptado Pires e Souza ,2013.

Declividade (%)	Tipo de solo					
	Argiloso		Médio		Arenoso	
	EV	EH	EV	EH	EV	EH
1	0,81	81,33	0,76	76,25	0,73	73,20
2	1,02	50,83	0,92	45,75	0,85	42,70
3	1,22	40,67	1,07	35,58	0,98	32,53
4	1,42	35,58	1,22	30,50	1,10	27,45
5	1,63	32,53	1,37	27,45	1,22	24,40
6	1,83	30,50	1,53	25,42	1,34	22,37
7	2,03	29,05	1,68	23,96	1,46	20,91
8	2,24	27,96	1,83	22,88	1,59	19,83
9	2,44	27,11	1,98	22,03	1,71	18,98
10	2,64	26,43	2,14	21,35	1,83	18,30
11	2,85	25,88	2,29	20,80	1,95	17,75
12	3,05	25,42	2,44	20,33	2,07	17,28
13	3,25	25,03	2,59	19,94	2,20	16,89
14	3,46	24,69	2,75	19,61	2,32	16,56
15	3,66	24,40	2,90	19,32	2,44	16,27
16	3,86	24,15	3,05	19,06	2,56	16,01
17	4,07	23,92	3,20	18,84	2,68	15,79
18	4,27	23,72	3,36	18,64	2,81	15,59
19	4,47	23,54	3,51	18,46	2,93	15,41
20	4,68	23,38	3,66	18,30	3,05	15,25
21	4,88	23,24	3,81	18,15	3,17	15,10
22	5,08	23,11	3,97	18,02	3,29	14,97
23	5,29	22,99	4,12	17,90	3,42	14,85
24	5,49	22,88	4,27	17,79	3,54	14,74
25	5,69	22,77	4,42	17,69	3,66	14,64
26	5,90	22,68	4,58	17,60	3,78	14,55
27	6,10	22,59	4,73	17,51	3,90	14,46
28	6,30	22,51	4,88	17,43	4,03	14,38
29	6,51	22,44	5,03	17,35	4,15	14,30
30	6,71	22,37	5,19	17,28	4,27	14,23