

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**

LUCAS DE CASTRO MOREIRA DA SILVA

**ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO EM MARIANA-MG:
CARACTERIZAÇÃO E QUALIDADE FÍSICA DE TECNOSSOLO FORMADO
PELA DEPOSIÇÃO DOS REJEITOS**

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2017

LUCAS DE CASTRO MOREIRA DA SILVA

**ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO EM MARIANA-MG:
CARACTERIZAÇÃO E QUALIDADE FÍSICA DE TECNOSSOLO FORMADO
PELA DEPOSIÇÃO DOS REJEITOS**

**Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal de Viçosa como parte das
exigências para a obtenção do título de Engenheiro
Agrônomo.**

Orientador: Prof. Genelício Crusoé Rocha

Coorientador: Prof. Igor Rodrigues de Assis

VIÇOSA – MINAS GERAIS

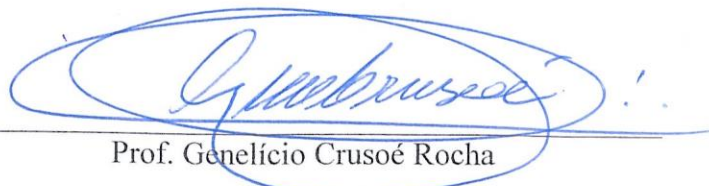
2017

LUCAS DE CASTRO MOREIRA DA SILVA

**ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO EM MARIANA-MG:
CARACTERIZAÇÃO E QUALIDADE FÍSICA DE TECNOSSOLO FORMADO
PELA DEPOSIÇÃO DOS REJEITOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal de Viçosa como parte das
exigências para a obtenção do título de Engenheiro
Agrônomo.

APROVADO:



Prof. Genécio Crusoé Rocha
Universidade Federal de Viçosa

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu pai, Cláudio, meu Guru e principal incentivador desta conquista.

À minha mãe, Adriana, por todo carinho e conforto emocional.

Ao meu orientador, Prof. Genelício, pelos ensinamentos e conselhos, pela atenção e receptividade com todos os seus orientados, por acreditar no meu potencial e pela boa convivência no ambiente de trabalho.

Ao meu coorientador, Prof. Igor Assis, pela atenção e disponibilidade quando necessitei.

Ao CNPq pela concessão de bolsa de pesquisa.

A todos professores da Agronomia UFV pelo conhecimento passado.

A todos funcionários da UFV, principalmente Claudinho e Evandro do Laboratório de Física do Solo, pela boa convivência e pela ajuda durante os dias de análises.

Ao meu amigo e chefe André Martius e todos os funcionários do CELB/EPAMIG.

Aos amigos de Viçosa e BH, as boas companhias são o que há de melhor nessa passagem pela Terra.

Aos irmãos da República Estância.

RESUMO

O trabalho consistiu-se em analisar o Tecnosolo formado às margens do Rio do Carmo pela deposição de rejeitos de mineração de ferro, oriundos do rompimento da Barragem de Fundão, localizada no município de Mariana, Minas Gerais. Estima-se que mais de 30 milhões de m³ de rejeitos tenham sido lançados sobre a superfície do solo da região. O objetivo deste estudo foi caracterizar e estabelecer a qualidade física do Tecnosolo, explicitando as condições impostas pelo material ao desenvolvimento vegetal. Analisou-se duas situações, consideradas tratamentos: o solo formado pela deposição dos rejeitos (Tecnossolo) e solo adjacente sob pastagem (Pastagem). Salienta-se que a pastagem apresentava sinais visíveis de degradação. As análises físicas consistiram na determinação dos parâmetros: granulometria, densidade, porosidade, umidade e resistência à penetração. Concomitantemente realizou-se análise química de rotina. O Tecnosolo apresentou classe textural franco arenosa, composto majoritariamente por silte e areia fina. A densidade do Tecnosolo mostrou-se superior e a porosidade total inferior à da Pastagem. Os resultados obtidos mostraram alta resistência à penetração na camada de 0-20 cm do Tecnosolo, com valores classificados como totalmente restritivos ao desenvolvimento vegetal no momento da amostragem. O Tecnosolo apresentou baixa capacidade de retenção de água e teor de umidade inferior ao longo do perfil, quando comparado à Pastagem. A adição de solo argiloso ao Tecnosolo mostrou-se alternativa eficaz para aumentar a retenção de água, já a adição de areia apresentou-se como prejudicial.

Palavras-chave: física do solo, resistência do solo à penetração, curva de retenção de água no solo, umidade do solo, áreas degradadas

ABSTRACT

The study consisted on the analysis of the Technosol formed on the banks of Carmo River (Minas Gerais, Brazil), by deposition of iron ore tailings, originating from the rupture of Fundão Dam, located in Mariana, Minas Gerais, Brazil. It is estimated that more than 30 million m³ of tailings have been dumped off on soil surface. The objective of this study was to characterize and establish the physical quality of the Technosol, explaining the conditions imposed by the material to vegetal development. Two situations were considered: soil formed by deposition of tailings, denominated Technosol (Tecnossolo) and adjacent soil under pasture system (Pastagem). It should be noted that pasture showed visible signs of degradation. Physical analysis consisted in determining the parameters: particle size, density, porosity, moisture and penetration resistance. Concomitantly, routine chemical analysis was performed. The Technosol (Tecnossolo) presented sandy loam textural class, composed mostly of silt and fine sand. The density of Technosol was superior and total porosity inferior to the pasture. The results showed high resistance to penetration in the 0-20 cm layer of Technosol, with values classified as totally restrictive to plant development at the time of sampling. Technosol presented low capacity to water retention and lower moisture content along the profile when compared to pasture. The addition of clayey soil to Technosol shows to be an efficient alternative to increase water retention, and addition of sand appeared to be harmful.

Keywords: soil physics, soil penetration resistance, soil water retention curve, soil moisture, degraded areas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 OBJETIVOS	9
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
3.1 Mineração no Brasil e o Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais	9
3.2 Impactos ambientais da atividade mineradora	10
3.3 Rompimento da Barragem de Fundão em Mariana-MG	11
3.4 Degradação física do solo	12
3.5 Recuperação física do solo	13
4 MATERIAIS E MÉTODOS	13
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	
5.1 Granulometria, densidade e porosidade	15
5.2 Resistência à penetração	16
5.3 Curva de retenção de água	19
5.4 Contagem de nêutrons moderados	20
5.5 Análise química	22
6 CONCLUSÕES	23
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	23

1. INTRODUÇÃO

A mineração é um dos sustentáculos da economia brasileira e confere ao país posição de destaque na produção e exportação de bens minerais. O setor mineral representa 4,0% do PIB nacional, é responsável por 20% do total de exportações e gera um milhão de empregos diretos na indústria. O produto do setor atingiu o valor de 80,2 bilhões de dólares em 2014, composto principalmente pelo minério de ferro, responsável por 25,8 bilhões de dólares em exportação no mesmo ano (MME, 2011; DNPM, 2016). Todavia, além de gerar riquezas a atividade mineradora pode ocasionar sérios impactos ambientais.

A exploração de minério de ferro gera grandes quantidades de rejeitos, os quais são tratados geralmente de forma úmida e contidos em barragens, onde são decantados. Esta disposição apresenta elevado risco ambiental, uma vez que as barragens são estruturas sujeitas ao rompimento e comumente implantadas em áreas altas, o que eleva o potencial destrutivo em uma eventual extravasão dos resíduos (DIAS, 2001).

Em novembro de 2015 o maior estado produtor de minério de ferro e detentor majoritário das reservas nacionais do recurso, Minas Gerais, foi cenário do desastre envolvendo a ruptura de uma barragem de contenção de rejeitos, a Barragem de Fundão, localizada no município de Mariana. A deposição do material sobre a área atingida suprimiu a vegetação das margens dos rios e gerou uma nova camada de substrato sobre a superfície do solo, a qual pode ser classificada como um Tecnosolo.

Tecnossolos são solos constituídos por quantidade significativa de materiais criados ou fortemente alterados pelas atividades humanas. Diz-se do solo cuja formação não ocorre naturalmente na superfície terrestre na ausência de ação antrópica. O solo de ambientes como cidades, estradas, minas, e aterros sanitários estão incluídos na classe dos Tecnossolos (FAO, 2015).

O rompimento da Barragem de Fundão e suas consequências é caracterizado o maior desastre ambiental brasileiro (SILVA et al., 2015). Estima-se que 34 milhões de m³ de rejeitos de mineração de ferro tenham sido lançados sobre a superfície do solo da região afetada (IBAMA, 2015). Laudos preliminares de IBAMA (2015) referentes ao Tecnosolo gerado em Mariana sugerem que a condição física do rejeito representa a maior limitação para o desenvolvimento vegetal. Ademais, a condição pode restringir o uso de maquinário, dificultando a intervenção na área. A supressão da comunidade vegetal nas margens dos rios

acentuou os danos do desastre, desencadeou processos erosivos, assoreamento dos cursos d'água e alteração dos fluxos fluviais (MINAS GERAIS, 2016).

A recomposição da cobertura vegetal a curto prazo é a única solução para as influências nocivas da atividade mineradora no solo (LONGO et al., 2011). O restabelecimento da vegetação depende diretamente das condições impostas pelo solo ao desenvolvimento de plantas. A necessidade de conhecimento das condições físicas do Tecnosolo formado nas áreas atingidas pelo desastre fundamentou o propósito deste trabalho.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo deste estudo foi caracterizar e analisar a condição física do Tecnosolo formado às margens do Rio do Carmo, em MG, com vistas à vegetação deste material.

2.2. Objetivos específicos

Analisar os atributos físicos do Tecnosolo: resistência à penetração, granulometria, densidade, porosidade e umidade, comparando-os com solo adjacente, sob pastagem.

Avaliar a possibilidade de melhoria das características hídricas do Tecnosolo por meio da mistura com areia, solo argiloso e matéria orgânica.

Estabelecer resultados que explicitem os fatores limitantes ao desenvolvimento vegetal, com ênfase às propriedades físicas dos solos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. A Mineração no Brasil e o Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais

O setor mineral participa com 20% das exportações nacionais e representa 4,0% do PIB, apresentando-se como um dos pilares da economia nacional. O país é importante produtor e exportador de nióbio, minério de ferro, bauxita, manganês, tantalita, grafite, entre outros. A Indústria Mineral Brasileira apresentou crescimento significativo nas últimas décadas e rendeu um produto de mais de 80 bilhões de dólares no ano de 2014. Tal fato é atribuído ao elevado crescimento populacional, mudanças de infraestrutura e alta taxa de urbanização dos

países em desenvolvimento. (MME, 2011; DNPM 2016)

Os bens minerais são elemento base de diversas cadeias produtivas e fator crucial nos padrões de consumo da sociedade moderna. Dados evidenciam a relação do setor mineral com a qualidade de vida. O Brasil, apesar de importante produtor do cenário mineral mundial, apresenta baixo consumo per capita dos recursos em comparação com países mais desenvolvidos. Tal comparação também se reflete no interior do território nacional. Regiões menos desenvolvidas têm os mais baixos níveis de consumo de bens minerais e as cidades mineradoras apresentam elevado IDH em comparação com o índice de outras cidades do estado onde estão situadas. (MME, 2011; IBRAM, 2012)

O minério de ferro, principal elemento exportado e responsável por grande parte da receita da atividade, atingiu valores superiores a 25 bilhões de dólares em exportações no ano de 2014. A maior parte de suas reservas concentra-se nos estados de Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Pará, sendo o primeiro detentor de 72,5% das reservas nacionais (DNPM, 2016).

O Quadrilátero Ferrífero, na região central de Minas Gerais, é um dos polos produtores minerais mais importantes do país e o mais conhecido geologicamente. A região detém reservas de ouro, calcário, bauxita, manganês, minério de ferro, entre outras, as quais possibilitaram o surgimento e desenvolvimento de importantes cidades mineiras (PRADO FILHO & SOUZA, 2004).

3.2. Impactos ambientais da atividade mineradora

Os impactos da mineração no ambiente podem ser altamente danosos. Tais efeitos nocivos são compreendidos em degradação da paisagem, poluição das águas, do ar e sonora, além de severas alterações nas áreas exploradas e em áreas vizinhas, usadas como depósito de resíduos (SILVA, 2007).

A supressão da vegetação local e a remoção da camada superficial do solo facilitam processos erosivos e consequente assoreamento dos cursos d'água. O fluxo hidrológico natural pode ser alterado pela ausência das matas ciliares, assim como a qualidade das águas, influenciada pela lixiviação e carreamento de sedimentos para os corpos hídricos (MECHI & SANCHES, 2010). Segundo Prado Filho & Souza (2004), a influência da mineração nos recursos naturais da região do Quadrilátero Ferrífero é extremamente significativa,

principalmente na qualidade das águas superficiais, afetada pelo transporte de sedimentos oriundos da mineração de ferro para a calha dos rios.

A geração de elevadas quantidades de resíduos é intrínseca a atividade mineradora devido à baixa concentração do elemento de interesse em relação ao mineral bruto. Nos últimos anos, a disposição destes rejeitos tem sido aspecto importante nos estudos de empresas mineradoras e dos órgãos de fiscalização ambiental (ARAÚJO, 2006). Entre outros aspectos, a composição de cada rejeito é fator relevante e deve ser considerada nos projetos para sua disposição final (DIAS, 2001). A NBR 10.004:2004 classifica os resíduos sólidos como perigosos, não-inertes e inertes. (ABETRE, 2006).

Nas áreas de beneficiamento de minério são gerados dois tipos de resíduos, classificados como estéril e rejeito. O primeiro é composto por materiais não aproveitados economicamente, como solo, subsolo e rochas usadas no processo da lavra. Os estéreis são geralmente dispostos em pilhas, caracterizando um substrato restrito ao desenvolvimento vegetal, o que entrava a restauração das áreas de deposição. O rejeito é proveniente do processo de beneficiamento, e, no caso do minério de ferro, em geral forma-se um rejeito inerte. (PRESOTTI, 2002; ARAÚJO, 2012).

A exploração de minério de ferro apresenta como principais impactos a poluição das águas superficiais e a supressão da vegetação nas áreas mineradas. A instabilidade das barragens de contenção de rejeitos também é fator que apresenta elevado riscos ambientais (FARIAS, 2002).

3.3. O rompimento da Barragem de Fundão em Mariana-MG

A Barragem de Fundão continha 50 milhões de m³ de rejeitos de minério de ferro. Estima-se que 34 milhões de m³ tenham sido lançados no meio ambiente após o rompimento da barragem, e 16 milhões foram transportados pelos corpos d'água, ultrapassando limites estaduais, em direção ao mar. O rompimento da Barragem de Fundão ocorreu no dia 05/11/2015, causando o derramamento dos rejeitos, o que acarretou efeitos secundários, como o galgamento da Barragem de Santarém, situada a jusante, elevando a magnitude dos impactos. (IBAMA, 2015).

A onda de rejeitos foi transportada pelo Rio Gualaxo do Norte, desaguardo no Rio do Carmo e posteriormente no Rio Doce, chegando ao Oceano Atlântico 16 dias após o acidente.

Dados estimam que 663,2 km de corpos hídricos foram afetados, do primeiro afluente até a foz do Rio Doce, no Município de Linhares-ES. (IBAMA, 2015). Conforme informações de Samarco (2017), os rejeitos contidos nas barragens da empresa são de dois tipos: um de maior granulometria, denominado rejeito arenoso e um de menor granulometria (lama).

O derramamento dos rejeitos soterrou as matas ciliares e populações vegetais de sub-bosque, houve também a supressão e arranquio de indivíduos arbóreos pela força da onda de sedimentos (IBAMA, 2015).

3.4. Degradação física do solo

Sánchez (2015) conceitua o termo degradação ambiental como "qualquer alteração adversa dos processos, funções ou componentes ambientais". Entre as fontes de degradação ambiental está a mineração, principalmente pelas atividades de supressão da vegetação, remoção da camada mais fértil do solo e alteração dos regimes hídricos, causada por operações como lavra e beneficiamento (ALMEIDA, 2002).

A mineração pode influenciar negativamente os atributos físicos do solo, dificultando os processos de restauração das áreas alteradas. Segundo Longo et al. (2011), a degradação das propriedades físicas do solo provém dessas influências, caracterizada principalmente pela compactação do solo, baixa infiltração de água, prejudicada aeração e intensificação de processos erosivos.

A degeneração da qualidade física dos solos é importante fator nas áreas de deposição de rejeitos, uma vez que o local apresenta alterações estruturais e hídricas após essa etapa do processo produtivo. Comumente as consequências observadas de degradação física são o escoamento superficial de água e o consequente carreamento de solo erodido, causadas pela diminuição do potencial de drenagem do solo. Nos solos restabelecidos em áreas mineradas observa-se elevada densidade e grau de compactação, o que restringe a penetração radicular e a capacidade de infiltração de água (NETO et al., 2008).

Estudos preliminares sugerem que a condição física do rejeito pode entravar a intervenção antrópica na região afetada, impedindo o tráfego de veículos de tração motora e animal. Tal impedimento é ocasionado pela aparente instabilidade estrutural do rejeito, de caráter siltoarenoso e susceptível a erosão (MINAS GERAIS, 2016).

3.5. Recuperação física do solo

A recuperação do solo é a última etapa do processo de controle da degradação, uma vez que a ação é tomada quando o dano já está instalado no ambiente. As características físicas do solo são consideradas aspectos vitais para o desenvolvimento e distribuição das comunidades vegetais (SALAS, 1987).

Em climas tropicais, os parâmetros físicos mais influentes na qualidade do solo são a porosidade, a capacidade de drenagem, a textura, a umidade e a permeabilidade. Os atributos de umidade do solo são diretamente relacionados com a regeneração do ambiente, uma vez que contribuem para a germinação de sementes e desenvolvimento das plantas (SALAS, 1987).

Almeida (2002) afirma que o objetivo primário na recuperação de áreas mineradas é a estabilização física do terreno e, posteriormente, a recuperação da população vegetal. O restabelecimento de indivíduos florestais evita a ocorrência de processos erosivos e proporciona a conservação e eventual melhoria da condição do solo. A recomposição de vegetação arbórea de alta diversidade influi na dispersão e no estabelecimento de novos indivíduos de flora e fauna, contribuindo para a regeneração do ambiente (BARBOSA, 2006).

A cobertura do solo pela vegetação promove a infiltração de água, diminuindo escoamentos superficiais e, portanto, controlando os processos erosivos. O incremento de matéria orgânica oriunda da comunidade vegetal contribui na adequação das condições do solo para o desenvolvimento da biota local. A matéria orgânica além de fornecer nutrientes para as plantas por meio de sua mineralização, influencia positivamente os atributos físicos do solo como a estrutura, capacidade de retenção de água, aeração e contribui para a formação e estabilidade de agregados (ALMEIDA, 2002).

4. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido nas áreas marginais ao Rio do Carmo, no município de Barra Longa-MG (20° 16' 58" S, 43° 02' 27" W). O clima predominante na região é tipo Cwa, caracterizado como temperado úmido, apresentando inverno seco e verão quente, conforme classificação de Köppen & Geiger disponível em Sá Júnior (2009).

O trabalho consistiu na avaliação de duas situações, consideradas tratamentos: o solo

formado pela deposição do rejeito, tratado neste trabalho como “Tecnossolo” e solo nas proximidades, sob sistema de pastagem, tratado como “Pastagem”. As análises físicas consistiram da determinação dos seguintes parâmetros: resistência à penetração, umidade, densidade, porosidade e granulometria. Conjuntamente foi realizada uma análise de rotina de fertilidade do solo para caracterização química dos tratamentos. Os estudos foram realizados na área experimental e no Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa.

A resistência à penetração (RP) foi mensurada a campo, em período de baixa umidade do solo, após mais de 100 dias de estiagem na região. O trabalho foi realizado com auxílio de penetrômetro de impacto modelo Stolf, avaliando-se a camada de 0 a 60 cm de profundidade, e os valores de resistência expressos a cada 5cm. Os resultados foram calculados por meio da fórmula descrita por Stolf (1991): $RP (MPa) = 0,56 + 0,689*(N)$, na qual RP = resistência à penetração e N = número de impactos por decímetro. Realizou-se 9 amostragens (repetições) em cada tratamento.

Amostras do solo e do Tecnossolo foram extraídas no início da estação chuvosa, na camada 0 – 20 cm de profundidade, com auxílio de trado holandês. Estas foram transportadas em recipientes apropriados e hermeticamente fechados para obtenção da umidade atual e em latas de alumínio para as demais análises. A curva de retenção de água (CRA) no solo foi obtida com base nas tensões de 10 kPa, 30 kPa, 60kPa, 100 kPa e 1500 kPa por meio da mesa de tensão (até 10 kPa) e Extrator de Richards para as demais tensões (EMBRAPA, 2011).

Além das CRA's dos dois tratamentos foram obtidas outras três curvas, referentes à camada superficial do Tecnossolo misturada com outros materiais, com o objetivo de avaliar o comportamento das misturas quanto à retenção de água, visando a possibilidade de incorporação de componentes externos potencialmente viáveis para melhoria dessa característica. As misturas adotadas foram: Tecnossolo e matéria orgânica (TEC + MO), Tecnossolo e areia grossa (TEC + ARE), Tecnossolo e solo argiloso (TEC + ARG). As combinações TEC + ARE e TEC + ARG foram realizadas em recipientes contendo 50% em volume de cada composto. A mistura TEC + MO foi obtida com a adição de matéria orgânica na dose de 20 t/ha.

O Tecnossolo apresenta-se sem estrutura, assim, a densidade foi obtida pelo Método da Proveta. Já a densidade de partículas foi obtida pelo Método do Balão Volumétrico. A porosidade total foi calculada por meio da fórmula $Pt = (Dp - Ds)/Dp$, na qual Pt = porosidade total, Dp = densidade de partículas e Ds = densidade do solo. A análise

granulométrica foi realizada pelo Método da Pipeta. Estas análises referem-se à camada 0-20 cm de profundidade dos tratamentos e foram realizadas conforme metodologia descrita por EMBRAPA (2011).

Na área experimental foi realizada a contagem de nêutrons moderados para estimativa da variação de umidade entre os tratamentos ao longo do perfil. A contagem foi feita por meio de sonda de nêutrons modelo 503DR Hydroprobe, nas camadas 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100cm de profundidade. Foram instalados tubos de PVC de 1,20m de comprimento para o acesso da sonda. O tempo de contagem das leituras foi de 8 segundos e houveram 3 repetições para cada tratamento.

A análise estatística para a resistência à penetração foi realizada por meio do teste *t* de Student a 5% de significância. Já para as contagens da sonda de nêutrons foi obtido gráfico de barras explicitando as médias numéricas e o erro padrão dos tratamentos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Granulometria, densidade do solo e de partículas e porosidade total

A caracterização granulométrica e classe textural dos tratamentos são apresentados na Tabela 1. Os resultados de densidade do solo, densidade de partículas e porosidade total estão explicitados na Tabela 2.

Tabela 1. Análise granulométrica e classe textural dos tratamentos.

Análise granulométrica					
	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	
Tratamento	(dag/kg)				Classe Textural
Tecnossolo	4,2	46,3	45,2	4,3	Franco arenoso
Pastagem	42,4	10,7	14,3	32,6	Franco argilo arenoso

Tabela 2. Resultados das análises de densidade do solo (Ds), densidade de partículas (Dp) e porosidade total (Pt)

Densidade do Solo, Densidade de Partículas e Porosidade Total			
	Ds	Dp	Pt
Tratamento	(g/cm³)		(m³/m³)
Tecnossolo	1,5564	2,985	0,48
Pastagem	1,0496	2,972	0,65

Reichert, et al. (2003) citam valores críticos de densidade para o crescimento vegetal, com base na composição granulométrica dos solos. Os autores estabelecem o valor de 1,45 g/cm³ para solos argilosos (>55% argila), 1,55 g/cm³ para solos de textura média (20 a 55% de argila) e 1,65 g/cm³ para solos de textura arenosa (<20% argila). Os resultados de densidade, segundo os autores, não são críticos para nenhum dos tratamentos. Entretanto, o Tecnossolo apresenta valor superior de densidade do solo. A diferença entre a porosidade total do Tecnossolo e da pastagem pode ser decorrente da composição mais argilosa do segundo.

Estudos com pastagens degradadas na Amazônia, realizados por Muller et al. (2001), mostram que a degradação da pastagem resulta em aumento da densidade e diminuição da porosidade. Os mesmos autores concluíram que o capim *Andropogon* demonstrou-se como espécie eficiente na recuperação de pastagens na região de estudo, aumento da porosidade e diminuição da densidade na camada superficial do solo, após um ano instalado na área degradada.

5.2. Resistência à penetração

A distribuição da resistência à penetração ao longo do perfil é demonstrada pela Figura 1 e as médias numéricas explicitadas na Tabela 3. Na análise de resistência à penetração observa-se diferenças significativas entre os tratamentos, ao longo do perfil, com exceção das medições em 5 e 25 cm de profundidade, que foram similares. As maiores diferenças entre os valores de resistência em MPa ocorreram em 10, 15 e 20cm. A resistência conferida pelo Tecnossolo foi maior nas camadas superficiais e menor a partir dos 30 cm.

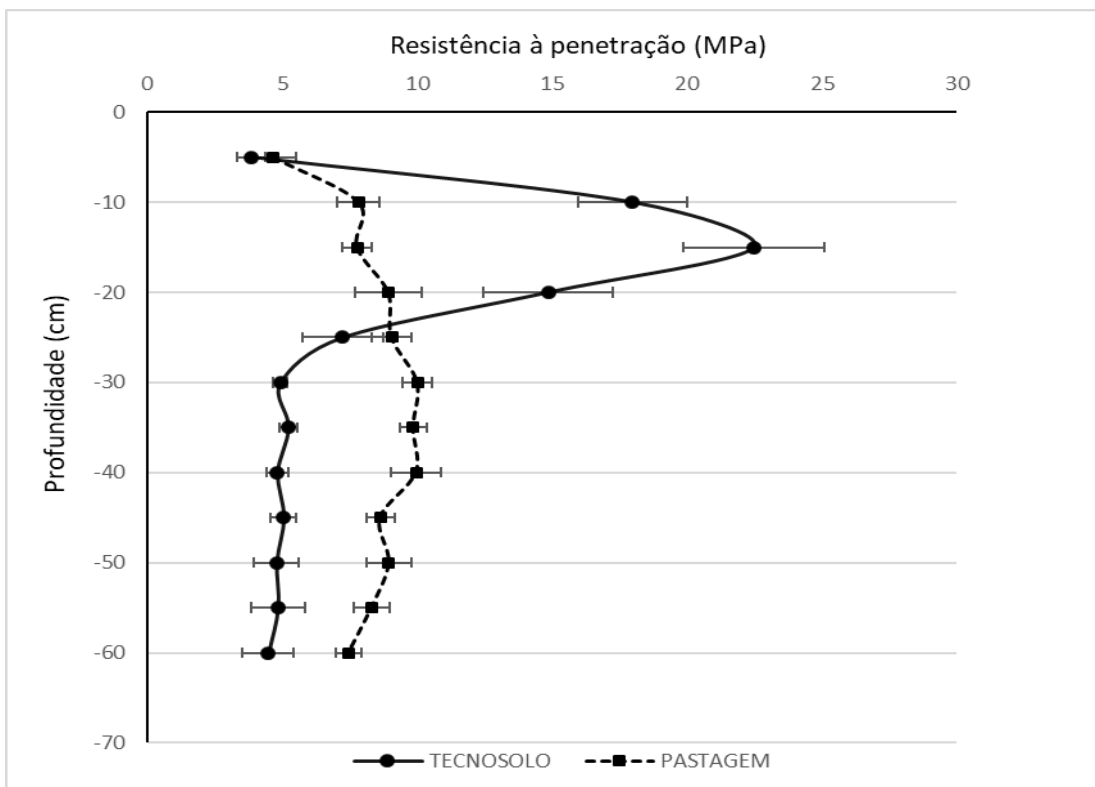


Figura 1. Resistência à penetração (MPa) em 60cm de profundidade.

Tabela 3. Resistência à penetração (RP) em MPa,

Profundidade (cm)	RP (MPa)	
	Tecnossolo	Pastagem
5	3,85	4,65
10	17,97*	7,83*
15	22,47*	7,78*
20	14,85*	8,93*
25	7,24	9,06
30	4,93*	10,01*
35	5,22*	9,86*
40	4,81*	9,96*
45	5,04*	8,63*
50	4,78*	8,96*
55	4,83*	8,31*
60	4,49*	7,46*

Médias na mesma linha seguidas de * diferem significativamente pelo teste *t* de Student, a 5% de

probabilidade.

Canarache (1990) propõe uma classificação que relaciona a limitação do crescimento de raízes de plantas com classes de resistência à penetração do solo, segregadas por valores limites, expressos em MPa, conforme Tabela 4.

Tabela 4. Limites de resistência à penetração do solo para o desenvolvimento radicular (CANARACHE, 1990).

Classes de resistência à penetração	Limites (MPa)	Limitação ao crescimento radicular
Muito baixa	< 1,1	Sem limitação
Baixa	1,1 a 2,5	Sem limitação
Média	2,6 a 5,0	Algumas limitações
Alta	5,1 a 10,0	Algumas limitações
Muito alta	10,1 a 15	Não há crescimento
Extremamente alta	> 15,0	Não há crescimento

De acordo com os resultados obtidos e a classificação proposta por Canarache (1990), observa-se que ambos tratamentos apresentam alguma limitação ao desenvolvimento de raízes em todo o perfil de solo estudado. O Tecnosolo apresenta séria ou total limitação ao desenvolvimento vegetal nos primeiros 20 cm de profundidade. A pastagem atingiu o máximo de resistência nos 30cm, com valor superior a 10 MPa, que, segundo Canarache (1990), restringe totalmente o crescimento radicular. O Tecnosolo apresenta completa restrição já aos 15cm, onde a resistência à penetração supera os 22 MPa.

A resistência à penetração pode variar significativamente com os teores de umidade do solo. Deste modo, infere-se que somente os valores obtidos com o penetrômetro de impacto não são absolutamente concretos para afirmar se um solo está ou não compactado (STOLF et al., 1983). Logo, os resultados evidenciam a situação atual de resistência dos solos, os quais se encontravam, no momento da análise, em condição de extrema seca decorrente dos mais de 3 meses de estiagem na região estudada.

A classificação apresentada na Tabela 4 sugere que o Tecnosolo, na condição analisada, é extremamente resistente à penetração nos primeiros 20cm de profundidade, o que

pode representar sérias dificuldades para o estabelecimento de plantas no local devido ao impedimento físico ao crescimento de raízes. Abaixo dos 30 cm de profundidade a pastagem apresenta resistência alta e o Tecnosolo média a alta. A diferença mais relevante ocorre a 15 cm de profundidade, onde a resistência à penetração do Tecnosolo chega a ser aproximadamente três vezes superior à resistência da pastagem. Salienta-se que a pastagem estudada se apresenta em nítido estado de degradação.

5.3. Curva de retenção de água

As curvas de retenção de água dos tratamentos estão expostas na Figura 2. Neste estudo, além dos solos dos tratamentos (Pastagem e Tecnosolo), analisou-se também as misturas de Tecnosolo com areia, solos argilosos e matéria orgânica. O solo sob pastagem obteve maiores valores de retenção de água no solo entre todos os tratamentos. Dentre as misturas de Tecnosolo com outros materiais, o tratamento TEC + ARG foi o tratamento que apresentou melhores características de retenção de água, quando comparado às outras misturas e ao Tecnosolo puro. Os tratamentos TEC + MO e TEC + ARE apresentaram retenção de água inferiores ao Tecnosolo puro.

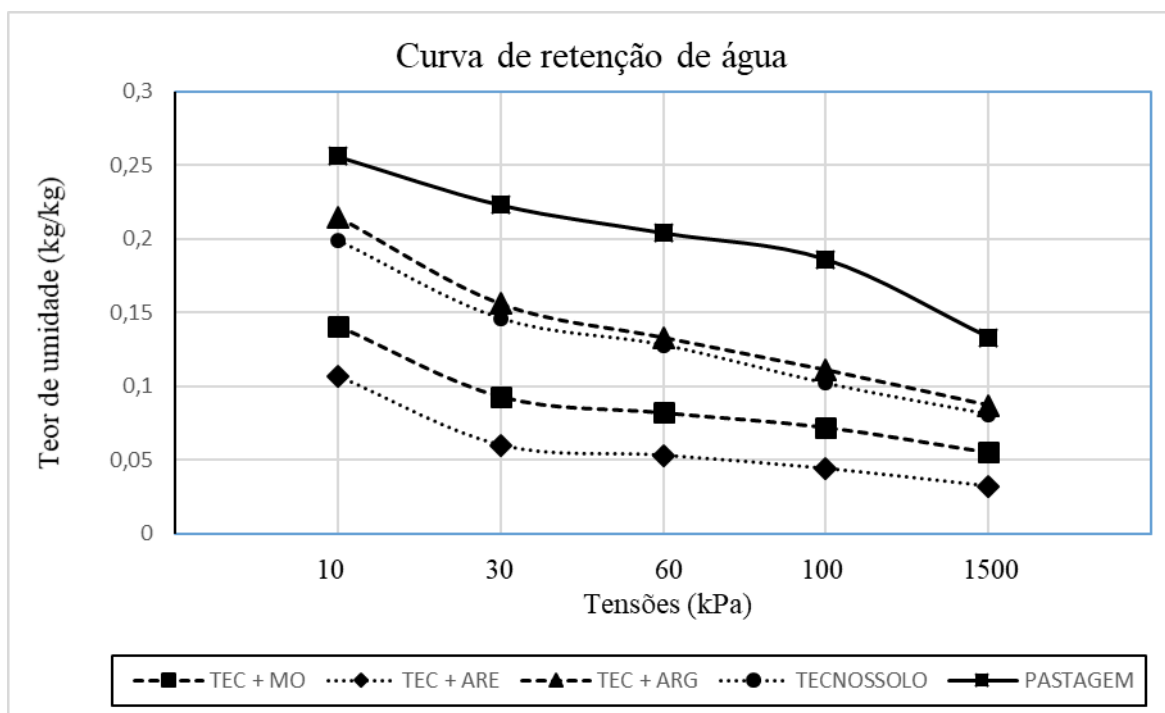


Figura 2. Curvas de retenção de água no solo obtida pela Mesa de Tensão e pelo Extrator de Richards.

Beutler, et al. (2002) concluíram, analisando dois Latossolos, que o teor de argila dos solos apresenta correlação positiva com a capacidade de retenção de água. De modo semelhante, demonstrado na Figura 2, os tratamentos compostos de maiores teores de argila apresentaram maiores conteúdos de umidade retida no solo. A diferença entre a retenção de água do solo sob pastagem e do Tecnosolo pode ser explicada pela composição granulométrica dos mesmos (Tabela 1).

5.4. Contagem de nêutrons moderados

Os valores de nêutrons moderados, obtidos por meio da sonda de nêutrons, estão apresentados na Figura 3.

A moderação de nêutrons é um recurso utilizado para determinação da umidade do solo por meio da contagem de nêutrons “lentos”. A metodologia consiste de uma fonte radioativa que emite nêutrons de alta energia cinética (nêutrons rápidos), os quais são desacelerados, ou seja, moderados quando colidem com outros átomos. O átomo de hidrogênio é o elemento que apresenta maior Poder de Moderação de nêutrons rápidos, deste modo, o número de nêutrons moderados contados pela sonda possui correlação positiva com o conteúdo de átomos de hidrogênio na região de análise. Dada tal proporcionalidade e visto que átomos de hidrogênio são componentes da molécula de água, quanto maior o número de nêutrons moderados fornecido pela sonda, maior é o teor de umidade no solo (FALLEIROS, 1994; FERREIRA, et al., 1998).

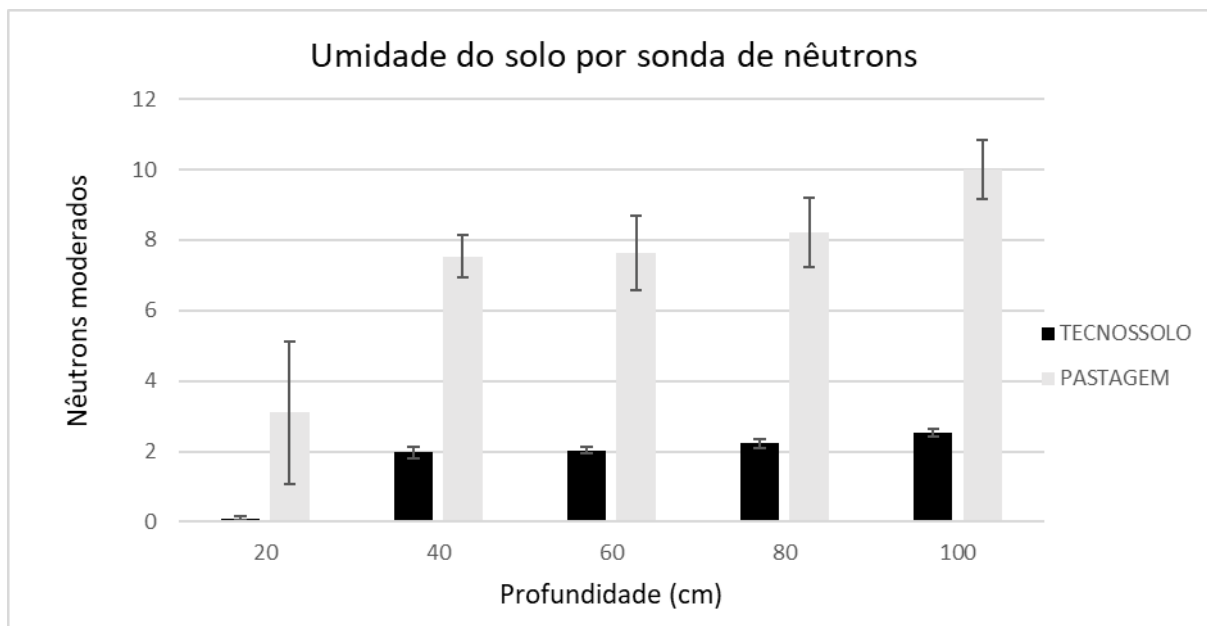


Figura 3. Nêutrons moderados ao longo do perfil do Tecnosolo e da Pastagem.

As leituras fornecidas pela sonda de nêutrons demonstram a baixa quantidade de nêutrons moderados no Tecnosolo comparado à pastagem, ou seja, a partir destes resultados, pode-se inferir que o Tecnosolo apresenta baixa umidade quando comparado à Pastagem, sob as mesmas condições climáticas. Os resultados de umidade do Tecnosolo, inferiores aos da pastagem nos primeiros 100 cm de profundidade, pode influir na incapacidade de retenção de água pelo primeiro. A contagem foi realizada no início da estação chuvosa. Os valores maiores de umidade em profundidade na pastagem sugerem que a água das primeiras chuvas após o inverno seco conseguiu infiltrar e percolar pelo perfil do solo.

O comportamento praticamente uniforme das leituras em profundidade no Tecnosolo pode sugerir alguma deficiência e/ou bloqueio da drenagem. Ribeiro, et al. (2007) afirmam que solos constituídos na sua maioria por areia fina e silte, como é o caso do Tecnosolo, possuem estrutura adensada, com predominância de microporos. Deste modo, a insuficiência de macroporos, responsáveis pela percolação de água, pode explicar o comportamento da umidade no perfil do Tecnosolo.

Para análise do comportamento temporal da umidade nos solos é necessário o monitoramento periódico com a sonda de nêutrons. Portanto, os resultados apresentados na Figura 3 representam as condições de umidade dos tratamentos somente no momento da leitura, realizada nas primeiras chuvas após 3 meses de seca na região.

5.5. Análise química

A análise química de rotina dos tratamentos está explicitada na Figura 4, na qual P1, P2 e P3 são pontos de amostragem no Tecnosolo e P5, P6 e P7 pontos na pastagem.

Resultados de Análise Química de Solo

Nº Laboratório	Referência do Cliente	pH H ₂ O	pH KCl	pH CaCl ₂	P	K	Na	Ca ²⁺
					mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	cmol _e /dm ³
7351	P1	6,71	-	-	8,0	88	-	1,25
7352	P2	6,38	-	-	9,2	116	-	1,83
7353	P3	7,12	-	-	8,3	165	-	1,75
7354	P5	4,34	-	-	4,0	32	-	1,60
7355	P6	4,35	-	-	2,5	24	-	1,25
7356	P7	5,12	-	-	10,0	161	-	3,17

Nº Laboratório	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al	SB	t	T	V	m	ISNa	MO	P-Rem
	cmol _e /dm ³	cmol _e /dm ³	cmol _e /dm ³	cmol _e /dm ³	cmol _e /dm ³	cmol _e /dm ³	%	%	%	dag/kg	mg/L
7351	0,10	0,00	0,0	1,58	1,58	1,58	100,0	0,0	-	-	29,5
7352	0,34	0,00	0,9	2,47	2,47	3,37	73,3	0,0	-	-	36,1
7353	0,12	0,00	0,0	2,29	2,29	2,29	100,0	0,0	-	-	29,6
7354	0,43	0,66	4,5	2,11	2,77	6,61	31,9	23,8	-	-	26,2
7355	0,47	0,38	3,6	1,78	2,16	5,38	33,1	17,6	-	-	24,4
7356	2,01	0,19	4,0	5,59	5,78	9,59	58,3	3,3	-	-	31,8

pH em água, KCl e CaCl - Relação 1:2,5

P - Na - K - Fe - Zn - Mn - Cu - Cd - Pb - Ni - Cr - Extrator Mehlich-1

H + Al - Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol/L - pH 7,0

t - Capacidade de Troca Catiônica Efetiva

V = Índice de Saturação por Bases

P-rem = Fósforo Remanescente

pH em água, KCl e CaCl - Relação 1:2,5

Ca²⁺ - Mg²⁺ - Al³⁺ - Extrator: KCl - 1 mol/L

SB = Soma de Bases Trocáveis

T - Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0

m = Índice de Saturação por Alumínio

Figura 4. Resultados de análise química de solo. P1, P2 e P3 referem-se ao Tecnosolo e P5, P6, e P7 à Pastagem.

Conforme interpretações sugeridas por Ribeiro et al. (1999), os resultados demonstram que a acidez ativa do Tecnosolo pode apresentar limitações do ponto de vista agrônomico. Os valores de pH encontrados em P1 e P2 são considerados altos e em P3 muito alto. O nível de fósforo disponível nos três pontos de amostragem do Tecnosolo foi considerado muito bom, e os de potássio muito bom em P3 e bom em P1 e P2.

Os teores de cálcio trocável no Tecnosolo foram classificados como médios, já os teores de magnésio considerados baixos. A acidez trocável apresentou-se muito baixa, com teor nulo de alumínio trocável nos três pontos de amostragem, bem como a acidez potencial. A soma de bases variou de baixa a média, bem como a CTC efetiva. A CTC a pH 7,0 apresentou-se como baixa. A saturação por bases no Tecnosolo apresentou valores

satisfatórios, variando de bom a muito bom (RIBEIRO et al, 1999).

Observa-se com os resultados que o Tecnosolo não apresenta sérias restrições ao desenvolvimento vegetal no que se refere a sua fertilidade. Os teores nulos de alumínio trocável no material mostram que não há impedimento químico ao crescimento radicular das plantas. Já o pH do Tecnosolo pode determinar alguma limitação de micronutrientes.

6. CONCLUSÕES

A textura da camada 0-20 cm do Tecnosolo foi classificada como franco arenosa, composta por 91% de silte e areia fina.

A densidade do Tecnosolo foi superior e a porosidade total inferior à da pastagem, ambas na camada de 0 a 20cm.

A resistência à penetração do Tecnosolo foi classificada como totalmente restritiva ao crescimento radicular na camada 10-20 cm de profundidade, apresentando resistência classificada como extremamente alta nas condições de análise.

Os resultados da curva de retenção de água e as leituras de nêutrons moderados sugerem capacidade inferior de retenção de água do Tecnosolo comparado à pastagem degradada.

A mistura do Tecnosolo com areia grossa no intuito de melhorar as características físicas desse rejeito não é uma boa estratégia uma vez que reduz a retenção de água. Já a mistura com solo argiloso apresentou-se eficaz, ocasionando ligeiro aumento da retenção de água.

Com exceção do pH elevado, o qual diminui a disponibilidade dos micronutrientes Fe, Cu, Mn e Zn, o Tecnosolo não apresentou restrições químicas ao desenvolvimento vegetal.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, R. O. P. O. 2002. Revegetação de áreas mineradas: estudo dos procedimentos aplicados em minerações de areia. 160p. São Paulo, 2002.

ARAÚJO, C. B. 2006. Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro. 143p. Rio de Janeiro, 2006.

ARAÚJO, I. C. da S. 2012. Potencial de revegetação de solo degradado pela mineração de ferro utilizando leguminosas arbóreas e resíduo de carcinicultura. 89p. Fortaleza, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS - ABETRE. 2006. Classificação de resíduos sólidos Norma ABNT NBR 10004:2004. 14p.

BARBOSA, L. M. (Coord.). 2006. Manual para recuperação de áreas degradadas do Estado de São Paulo: matas ciliares do interior paulista. São Paulo: Instituto de Botânica, 2006.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SOUZA, Z. M.; ANDRIOLI, I.; ROQUE, C. G. 2002. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. Revista Brasileira de Ciência do Solo. 26:829-834.

CANARACHE, A. 1990. PENETR -- a Generalized Semi-empirical Model Estimating Soil Resistance to Penetration. Soil & Tillage Research, 16 (1990) 51-70.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL - DNPM. 2016. Sumário Mineral 2015. 135p. Brasília: DNPM, 2016.

DIAS, E. G. C. da S. 2001. Avaliação de impacto ambiental de projetos de mineração no estado de São Paulo: a etapa de acompanhamento. 283p. São Paulo, 2001.

EMBRAPA. 2011. Manual de métodos de análise de solo. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 3ª edição. 230p. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011.

FALLEIROS, M. de C. 1994. Medida da umidade do solo com sonda de nêutrons. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN. São Paulo, 1994.

FARIAS, C.E.G. 2002. Mineração e meio ambiente no Brasil. Relatório do CGEE/PNUD (2002). 42p.

FERREIRA, E.; RESENDE, A. S. de; BALIEIRO, F.; ZOTARELLI, L.; SILVA, L. A. da;

BACIS, M.; ALFARO, M. A.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S. 1998. Avaliação de diferentes tubos de acesso para medição da umidade do solo através do uso de sonda de nêutrons. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, nov. 1998. 12p. (Embrapa-CNPAB. Série Documentos, 59).

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. 2015. World reference base for soil resources 2014. World soil resources reports, n.106, 203p. Rome, 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO - IBRAM. 2012. Informações e análises da Economia Mineral Brasileira. 7. ed. 68p.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS - IBAMA. 2015. Laudo Técnico Preliminar. Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais. Nov. 2015. 38p.

LONGO, R. M.; RIBEIRO, A. I.; MELO, W. J. de. 2011. Uso de adubação verde na recuperação de solos degradados por mineração na floresta amazônica. *Bragantia*, Campinas, v. 70, n. 1, p.139-146.

MECHI, A. & SANCHES, D. L. 2010. Impactos ambientais da mineração no Estado de São Paulo. *Estudos avançados*, São Paulo, v. 24. n. 68, p. 209-220.

MINAS GERAIS. 2016. Relatório: Avaliação dos efeitos e desdobramentos do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana-MG. Secretaria de Estado de Desenvolvimento Regional, Política Urbana e Gestão Metropolitana. Governo do Estado de Minas Gerais. Decreto n 46.892/2015. 287p. Belo Horizonte, 2016.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. 2011. Plano Nacional de Mineração 2030 (PNM - 2030). Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Brasília: MME, 2010. 178p.

MULLER, M. M. L.; GUIMARÃES, M. de F.; DESJARDINS, T.; MARTINS, P. F. da S. 2001. Degradação de pastagens na Região Amazônica: propriedades físicas do solo e crescimento de raízes. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 36, n. 11, p. 1409-1418.

NETO, A. L.; ALBUQUERQUE, J.A.; ALMEIDA, J. A.; MAFRA, A. L.; MEDEIROS, J. C.; ALBERTON, A. 2008. Atributos físicos do solo em área de mineração de carvão influenciados pela correção da acidez, adubação orgânica e revegetação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 32:1379-1388.

PRADO FILHO, J. F. & SOUZA, M. P. 2004. O Licenciamento Ambiental da mineração no Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais - Uma análise da implementação de medidas de controle ambiental formuladas em EIAs/RIMAs. *Engenharia Sanitária e Ambiental*. Vol. 9. N. 4. p. 343-349.

PRESOTTI, E. da S. 2002. Influência do teor de ferro nos parâmetros de resistência de um rejeito de minério de ferro. *Ouro Preto*, 2002.

REICHERT, J. M. REINERT, D. J. & BRAIDA, J. A. 2003. Qualidade dos solos e sustentabilidade dos sistemas agrícolas. *Ci. Amb.*, 27:29-48.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. (ed.). 1999. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais, 5ª aproximação. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359p.

RIBEIRO, K. D.; MENEZES, S. M.; MESQUITA, M. da G. B. de F.; SAMPAIO, F. de M. T. 2007. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG. *Ciênc. agrotec.*, Lavras, v. 31, n. 4, p. 1167-1175, jul./ago.

SÁ JÚNIOR, A. de. 2009. Aplicação da classificação de Koppen para o zoneamento climático do Estado de Minas Gerais. 101p. Lavras: UFLA, 2009.

SALAS, G. de L. 1987. Suelos y ecosistemas forestales; con énfasis en América Tropical. Colección Libros y Materiales Educativos/ IICA; n. 80. 450p. San José, Costa Rica.

SAMARCO. 2017. Disponível em: www.samarco.com/barragem-de-rejeitos/. Acessado em 28 de março de 2017.

SÁNCHEZ, L. E. 2015. Avaliação de impactos ambiental: conceitos e métodos. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. Edição Digital 2015.

SILVA, D. L. da; FERREIRA, M. C.; SCOTTI, M. R. 2015. O maior desastre ambiental brasileiro: de Mariana (MG) a Regência (ES). Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico/UFMG, v. 24, n. 1/2, Belo Horizonte, 2015.

SILVA, J. P. S. 2007. Impactos ambientais causados por mineração. Revista Espaço da Sophia, v. 1, n. 08.

STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI NETO, V. L. 1983. Recomendação para o uso do penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf. Piracicaba: IAA/PLANALSUCAR, 1983. 9p. (Série Penetrômetro de Impacto. Boletim n. 1).

STOLF, R. 1991. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v.15, p.229-235.