

Mestrado Profissional
Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais

BERNARDO VILLANI CORRÊA FONSECA

**PROPRIEDADES QUÍMICAS E FÍSICAS DO SOLO EM CAVA DE
MINA E PILHA DE ESTÉRIL NA MINA DE FE EM CARAJÁS**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais, área de Ciências Ambientais, do Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável (ITV DS).

Orientador: Sílvio Junio Ramos, Dr.

Co-orientador: Rafael Silva Guedes, Dr.

Belém / PA

2020

BERNARDO VILLANI CORRÊA FONSECA

**PROPRIEDADES QUÍMICAS E FÍSICAS DO SOLO EM CAVA DE
MINA E PILHA DE ESTÉRIL NA MINA DE FE EM CARAJÁS**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais, área de Ciências Ambientais, do Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável (ITV DS).

Orientador: Sílvio Junio Ramos, Dr.
Co-orientador: Rafael Silva Guedes, Dr.

Data aprovação:

Banca Examinadora:

Dr./Msc. Sílvio Junio Ramos
Orientador - Instituto Tecnológico Vale (ITV)

Dr./Msc. Markus Gastauer
Membro interno - Instituto Tecnológico Vale (ITV)

Dr./Msc. Renato Alves Teixeira
Membro externo - Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

F676 Fonseca, Bernardo Villani Corrêa

Propriedades químicas e físicas do solo em cava de mina e pilha de estéril na mina de Fe em Carajás / Bernardo Villani Correa Fonseca -- Belém-PA, 2020.

60 f.: il.

Dissertação (Mestrado) – Instituto Tecnológico, 2020.

Orientador: Sílvio Júnio Ramos, Dr.

Co-orientador: Rafael Silva Guedes, Dr.

1. Minas a céu aberto. 2. Recuperação do solo. 3. Resistência à penetração do solo. 4. Atributos químicos do solo. I. Ramos, Silvio Junior. II. Guedes, Rafael Silva. III. Título

CDD.23 ed. 622.34098115

Bibliotecário (a) responsável :Nisa Gonçalves CRB-2: 525

RESUMO

As atividades de revegetação de taludes, principalmente nas cavas de mina em áreas de mineração de Fe se configuram como complexas, sendo que muitas vezes os resultados esperados de recobrimento vegetal não são efetivamente alcançados. Em minas de Fe, nas áreas de lavra, ocorre a conformação de taludes de corte, e, nas Pilhas de Deposição de Estéril, há a conformação de taludes de aterro. O substrato nestas áreas apresenta diferenciados obstáculos de ordem química e física, que diretamente influenciam no sucesso do desenvolvimento e recobrimento vegetal. Esta pesquisa objetivou analisar atributos químicos e físicos de solos amostrados em áreas de cavas e Pilhas de Estéril no Complexo Minerador de Carajás, Estado do Pará, afim de contribuir para o melhor entendimento de suas características e para a definição de melhor métodos e técnicas de revegetação. Os resultados apontaram que os taludes de corte de cavas apresentam maior número de impedimentos físicos e químicos quando comparados aos taludes de aterro de Pilhas de Estéril. As análises demonstram ainda que a resistência à penetração do solo reduz num mesmo ponto em diferentes épocas do ano, podendo ser consequência da influência da precipitação pluviométrica sobre o solo, indicando que eventuais medidas de irrigação nos períodos de estiagem podem contribuir positivamente para que as raízes da vegetação semeada se desenvolvam com maior eficácia. Esta pesquisa analisa ainda as possíveis consequências de adoção de irrigação nas faces dos taludes no que diz respeito à estabilidade geotécnica. Portanto, o presente trabalho apresenta uma ampla análise de atributos químicos e físicos dos solos em taludes em áreas de mineração de Fe em Carajás e pondera sobre as possíveis consequências de intervenções de irrigação nos períodos de seca para atenuação da resistência à penetração do solo.

Palavras chave: Minas a céu aberto. Recuperação do solo. Resistência à penetração do solo. Atributos químicos do solo.

ABSTRACT

Slope revegetation activities in Fe mining areas are complex, and the expected results of revegetation are often not effectively achieved. In Fe mines, in the pits, cutting slopes are formed, and in the Deposition Piles, there are conformation of embankment slopes. The substrate in these areas presents different chemical and physical obstacles, which directly influence the success of the development and vegetal covering. This research aimed to analyze chemical and physical attributes of soils sampled in areas of pits and dumps in the Mining Complex of Carajás, State of Pará, in order to contribute to a better understanding of their characteristics and to the definition of better methods and techniques of revegetation. The results showed that the cut slopes of pits have a greater number of physical and chemical impediments when compared to the embankment slopes of Deposition Piles. The analyzes also show that the resistance to penetration of the soil varies at the same point at different times of the year, which may be a consequence of the influence of rainfall on the soil, indicating that irrigation measures during drier periods can positively contribute to the roots sown vegetation to develop more effectively. This research also analyzes the possible consequences of adopting irrigation on the faces of the slopes with respect to geotechnical stability. Therefore, the present work presents a wide analysis of chemical and physical attributes of soils on embankments in Fe mining areas in Carajás and ponders about the possible consequences of irrigation interventions in periods of drought to attenuate resistance to soil penetration.

Keywords: Open pit mines. Soil recovery. Resistance to soil penetration. Chemical attributes of the soil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização do Complexo Minerador de Carajás.....	09
---	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	08
2	REFERENCIAL TEÓRICO	10
3	OBJETIVOS	11
3.1	Geral.....	11
3.2	Específicos.....	11
4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	12
5	CONCLUSÃO.....	14
	REFERÊNCIAS.....	15
	APÊNDICES	17
	Apêndice A – PROPRIEDADES QUÍMICAS E FÍSICAS DO SOLO EM CAVA DE MINA E PILHA DE ESTÉRIL NA MINA DE FE EM CARAJÁS	18
	Apêndice B – PONDERAÇÃO SOBRE AS POSSÍVEIS IMPLICAÇÕES DA PRÁTICA DE IRRIGAÇÃO COMO MEDIDA PARA REDUÇÃO DA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DO SOLO	48

1 INTRODUÇÃO

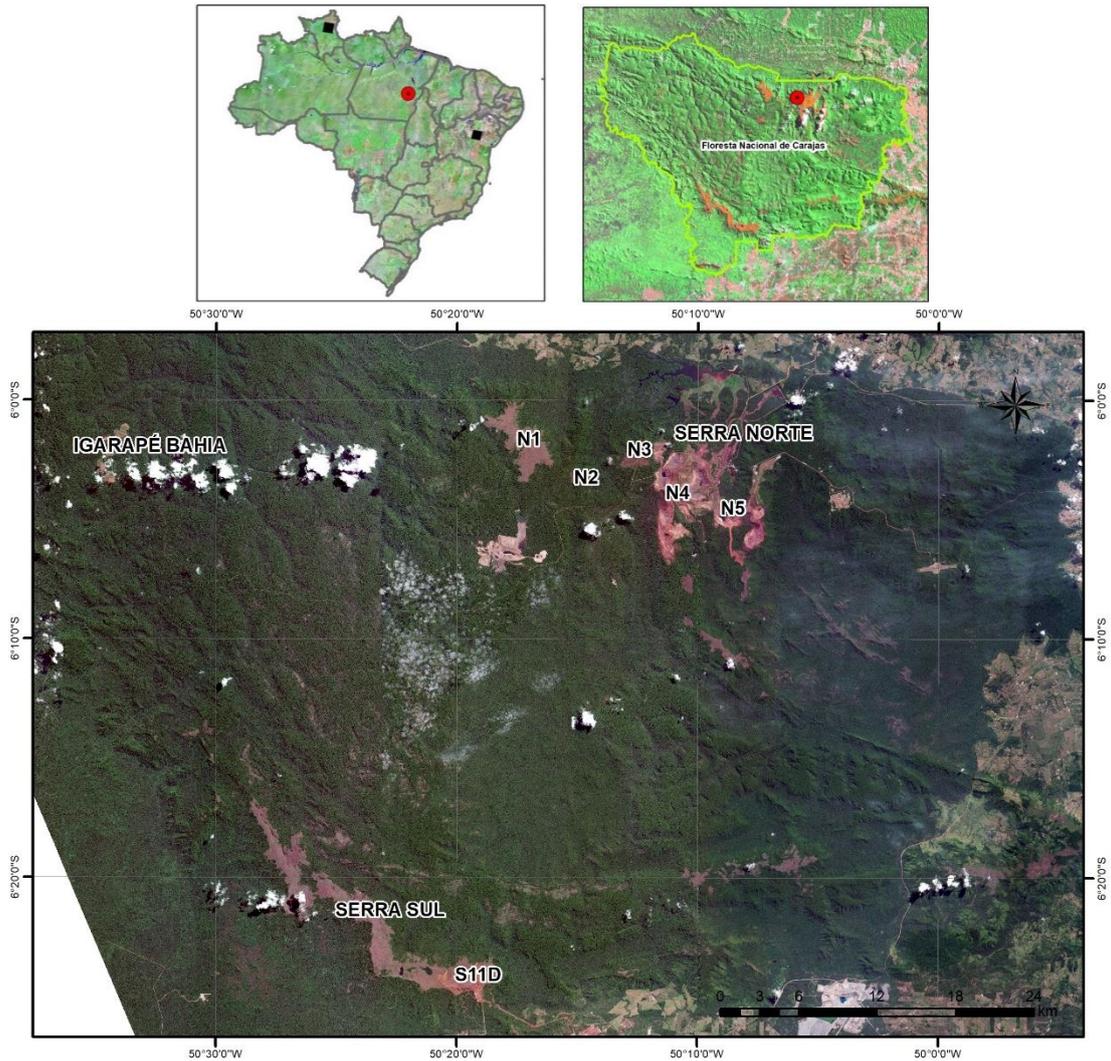
A mineração, apesar de essencial ao desenvolvimento humano, é uma atividade que causa grandes alterações no ambiente e na paisagem, devido a supressão florestal e escavações para retirada do minério (Gomes et al., 2019). As escavações consistem na remoção da camada superficial do solo (*top soil*) e o pré *stripping* – (decapeamento ou remoção de camada de solo e/ou transição de rocha-solo na região onde se localiza o corpo mineral para permitir o acesso dos equipamentos para o início da extração de minério).

Após a abertura das frentes de lavra, a extração de minério é efetivamente iniciada por meio de desmonte à quente (com o uso de explosivos) e mecanizado de rochas, promovendo uma alteração topológica do terreno natural. Os materiais que são escavados nas etapas iniciais (na região próxima ao topo da rocha sã) e também aqueles que, durante as operações de lavra não apresentam propriedades mineralógicas satisfatórias, são transportados e depositados em áreas denominadas pilhas de estéril, onde são espalhados e compactados com o uso de equipamentos de grande porte (trator), conformando grandes elevações com bermas de equilíbrio e taludes de corte (HALDAR, 2013).

Já nas cavas, onde o minério é efetivamente extraído, são conformados bermas de equilíbrio e taludes de corte, que têm altura, largura e inclinação variáveis.

Na região sudeste do Estado do Pará se localiza a Província Mineral de Carajás (PMC), maior complexo minerador de ferro de alto teor do mundo, cuja exploração ocorre em minas a céu aberto (IBRAM, 2013) – Figura 1.

Figura 1 - Localização do Complexo Minerador de Carajás



Fonte: Vale, 2019

A legislação brasileira estabelece que é responsabilidade do empreendedor recuperar as áreas interferidas por suas atividades, responsabilizando-se pelo sucesso no reestabelecimento das condições ambientais.

Nesse contexto, no âmbito da mineração em Carajás, tanto os taludes das cavas de mina como pilhas de estéril necessitam ser revegetados,

Ocorre que a revegetação de taludes de corte e aterro em áreas de mineração de Fe tem se mostrado desafiadora, já que estes apresentam características e níveis de dificuldade de recuperação diferenciados, sem que em todos os pontos sejam alcançados índices satisfatórios de sucesso.

Portanto, há muitos desafios para a recuperação das áreas impactadas pela mineração de Fe, principalmente taludes de cavas de mina, onde as pesquisas ainda

são insipientes. Neste contexto, é fundamental conhecer melhor os parâmetros físicos e químicos dos taludes das áreas de mineração, a fim de permitir a elaboração de planos de recuperação mais eficientes.

Afim de se conhecer melhor a influência de atributos físicos e químicos dos solos em áreas de taludes de corte e aterro no sucesso da revegetação, este estudo apresenta uma análise de dados obtidos a partir de coleta de amostras de solo em taludes de corte, aterro e áreas natural em minas de Fe na Província Mineral de Carajás.

Na primeira Seção “Apêndice A” são apresentados resultados de análises laboratoriais de amostras de solo coletadas em minas da Província Mineral de Carajás, além de discussões.

Já na segunda Seção, “Apêndice B”, é apresentada uma discussão sobre a influência da umidade nos parâmetros físicos do solo, relacionados à sua estabilidade.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Em geral, as atividades de exploração mineral no Brasil são acompanhadas de um plano de recuperação das áreas degradadas, o qual prevê, entre outras ações, a recuperação das áreas impactadas (GASTAUER *et al.*, 2019). Entretanto, a eficiência na recuperação dessas áreas pode ser menor que o esperado, por exemplo, pela dificuldade para o manejo e correção do solo, e sobrevivência das espécies utilizadas no processo de revegetação.

Os taludes nas pilhas de estéril podem apresentar menor densidade do solo e presença de materiais desagregados, enquanto que os taludes das cavas podem possuir menor porosidade e capacidade de retenção de água, além de menores índices de qualidade química do solo (HALDAR, 2013; SINHA; DEB; PATHAK, 2017).

Segundo Mukhopadhyay *et al.*, 2019, os taludes de corte conformados nas áreas de cavas (área efetiva de labra) apresentam enorme dificuldade para serem revegetados.

As principais dificuldades para a recuperação do solo em ambientes de mineração incluem limitações de natureza química como acidez, baixo teor de matéria orgânica, baixa capacidade de troca catiônica, baixos teores disponíveis de nutrientes

e, em alguns casos, a presença de elementos potencialmente tóxicos (FENG *et al.*, 2019; RODRÍGUEZ-VILA *et al.*, 2016).

Além disso, podem haver problemas de natureza física como elevada densidade do solo, alta pedregosidade, baixa porosidade e retenção de água, além de elevada resistência à penetração (ASENSIO *et al.*, 2013; MOHIEDDINNE *et al.*, 2019). Esses fatores podem representar impedimento ao desenvolvimento das espécies usadas para a revegetação das áreas impactadas, uma vez que dificultam o desenvolvimento radicular e impedem o acesso das plantas à água em maior profundidade, fundamental para a sua sobrevivência em épocas de baixa precipitação (COLOMBI *et al.*, 2018).

Ao desenvolver esse estudo, assume-se como hipótese a ser confirmada que os taludes de cava de mina apresentam maior número de atributos físicos e químicos desfavoráveis ao crescimento vegetal, quando comparadas aos taludes encontrados nas pilhas de estéril.

3 OBJETIVOS

3.1 Geral

O presente estudo tem como propósito contribuir para o melhor manejo e eficiência nas atividades de revegetação dos taludes de cavas e de pilhas de estéril de mineração na Província Mineral de Carajás.

3.2 Específicos

- Avaliar os atributos físicos e químicos dos solos encontrados em taludes de cava de mina e em pilhas de estéril do complexo minerador de Fe de Carajás;
- Avaliar os atributos físicos e químicos de solos naturais na área do complexo minerador de Fe de Carajás, para avaliação de background;

- Confirmar a hipótese de que taludes de cava de mineração de Fe apresentam maior número de atributos físicos e químicos desfavoráveis a estabelecimento da cobertura vegetal.

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este estudo foi realizado em três etapas: levantamento bibliográfico, estudo de campo – incluindo coleta e análise laboratorial de amostras de solo – e compilação dos resultados.

Para obtenção de dados secundários para a caracterização do problema – revegetação de taludes em áreas de mineração – foram realizadas consultas a diversos trabalhos publicados em periódicos nacionais e internacionais, revistas científicas, livros e outros trabalhos semelhantes disponíveis na internet.

O estudo de campo consistiu na realização de visitas à área operacional de mineração no Complexo Minerador de Carajás, abrangendo duas cavas – platô N5 na face West (N5W), onde foram avaliados dois taludes de corte, e o platô N4 na face East (N4E), onde foram avaliados três taludes de corte – duas pilhas de estéril – pilha de estéril Oeste (WP_O) e pilha de estéril Sul-4 (WP_S4), além de uma área adjacente às cavas com cobertura por floresta nativa.

Durante as visitas de campo às referidas cavas, pilhas de estéril e área com floresta nativa foram coletadas 102 amostras de solo, que foram devidamente preparadas e encaminhadas para análise em laboratório homologado seguindo o Manual de métodos de análise de solo, 3ª Edição (EMBRAPA, 2017).

A coleta de amostras de solo em área de floresta nativa para a realização de análises físico químicas teve por objetivo levantar informações a respeito do *background* do ambiente natural da região, no qual se desenvolvem espécies vegetais nativas. O conhecimento das características do solo em um ambiente natural adjacente às áreas interferidas se faz relevante para que se possa planejar as intervenções de recuperação que favoreçam não somente o desenvolvimento inicial da vegetação semeada em caráter de revegetação, mas também o futuro reestabelecimento de funções ecológicas.

Os resultados obtidos nas análises laboratoriais foram compilados e encontram-se graficamente apresentados e discutidos no Apêndice B.

Trata-se, portanto, de um estudo de caráter exploratório para a compreensão dos aspectos que influenciam no sucesso da revegetação de taludes em áreas de mineração, ainda pouco explorados.

5 CONCLUSÃO

A revegetação de taludes de corte e de aterros se configura como uma atividade de grande complexidade

O presente estudo demonstrou que os atributos químicos que influenciam na fertilidade do solo são de fato muito importantes para o sucesso no reestabelecimento da cobertura vegetal em taludes interferidos por atividades de mineração.

Por outro lado, o estudo demonstrou também que os parâmetros físicos sobremaneira influenciam no desenvolvimento da vegetação

A umidade do solo se mostrou um parâmetro relevante, que, mesmo em substratos com elevada resistência à penetração, favorece o desenvolvimento radicular das espécies

Por outro lado, a alta umidade do solo, que ameniza os efeitos negativos da resistência à penetração do solo, pode fazer com que atributos físicos do solo se alterem, desencadeando processos de instabilização geotécnica.

Face aos assuntos abordados e discutidos ao longo desse estudo, conclui-se sobre a necessidade de continuação de experimentos voltados à revegetação de taludes conformados por cortes e aterros em atividades de mineração.

REFERÊNCIAS

- ASENSIO, V. *et al.* Tree vegetation and waste amendments to improve the physical condition of copper mine soils. **Chemosphere**, v. 90, p. 603–610. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.08.050>. Acesso em: 20 jan. 2020.
- COLOMBI, T. *et al.* Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth – A vicious circle. **Sci. Total Environ**, v. 626, p. 1026–1035. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.129>. Acesso em: 20 jan. 2020
- FENG, Y. *et al.* Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: A review. **Earth-Science Rev.**, v. 191, p. 12–25. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.02.015>. Acesso em: 20 jan. 2020.
- GASTAUER, M., *et al.* Mine land rehabilitation in Brazil: Goals and techniques in the context of legal requirements. **Ambio**, v. 48, p. 74–88. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13280-018-1053-8>. Acesso em: 20 jan. 2020.
- GOMES, M. *et al.* Landscape evolution in ferruginous geosystems of the Iron Quadrangle, Brazil: a speleological approach in a biodiversity hotspot. **SN Appl. Sci.**, v. 1, p. 1102. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1139-3>. Acesso em: 20 jan. 2020.
- HALDAR, S. K. Elements of Mining, in: Mineral Exploration. **Elsevier**, cap.11, 193–222. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416005-7.00011-8>. Acesso em: 20 jan. 2020.
- IBRAM. **Information and Analysis on the Brazilian Mineral Economy**. 7th ed. Brazilian Min. Assoc. 2013. Disponível em: <http://URL www.ibram.org.br>. Acesso em: 15 jan. 2020
- RODRÍGUEZ-VILA, A. *et al.* Changes on the Phytoavailability of Nutrients in a Mine Soil Reclaimed with Compost and Biochar. **Water, Air, Soil Pollut.**, n. 227, p. 453. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11270-016-3155-x>. Acesso em: 20 jan. 2020.
- SINHA, N.; DEB, D.; PATHAK, K. Development of a mining landscape and assessment of its soil erosion potential using GIS. **Eng. Geol.**, v. 216, p. 1–12. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.10.012>. Acesso em: 15 jan 2020.
- MOHIEDDINNE, H. *et al.* Physical recovery of forest soil after compaction by heavy machines, revealed by penetration resistance over multiple decades. **For. Ecol. Manage**, v. 449, p. 117-472. 2019. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117472>. Acesso em: 20 jan. 2020.

MUKHOPADHYAY, S. *et al.* Application of Soil Quality Indicators for the Phytorestoration of Mine Spoil Dumps, in: *Phytomanagement of Polluted Sites*. **Elsevier**, cap. 14, p. 361–388. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-813912-7.00014-4>. Acesso em: 20 jan. 2020.

APÊNDICES

**Apêndice A – PROPRIEDADES QUÍMICAS E FÍSICAS DO SOLO EM CAVA DE
MINA E PILHA DE ESTÉRIL NA MINA DE FE EM CARAJÁS**

PROD. TEC. ITV DS-N017/2020

DOI: 10.29223/PROD.TEC.ITV.DS.2020.17.Fonseca

PRODUÇÃO TÉCNICA ITV DS

PROPRIEDADES QUÍMICAS E FÍSICAS DO SOLO EM CAVA DE MINA E PILHA DE ESTÉRIL NA MINA DE FE EM CARAJÁS

Bernardo Villani Corrêa Fonseca

Sílvio Júnio Ramos

Rafael Silva Guedes

Markus Gastauer

Cecílio Caldeira

Wilson Nascimento

Pedro Martins Souza-Filho

Belém / PA

Maio / 2020

Título: Propriedades químicas e físicas do solo em cava de mina e pilha de estéril na mina de Fe em Carajás	
PROD. TEC. ITV DS – N017/2020	Revisão
Classificação: () Confidencial () Restrita () Uso Interno (x) Pública	00

Informações Confidenciais - Informações estratégicas para o Instituto e sua Mantenedora. Seu manuseio é restrito a usuários previamente autorizados pelo Gestor da Informação.

Informações Restritas - Informação cujo conhecimento, manuseio e controle de acesso devem estar limitados a um grupo restrito de empregados que necessitam utilizá-la para exercer suas atividades profissionais.

Informações de Uso Interno - São informações destinadas à utilização interna por empregados e prestadores de serviço

Informações Públicas - Informações que podem ser distribuídas ao público externo, o que, usualmente, é feito através dos canais corporativos apropriados

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

F676 Fonseca, Bernardo Villani Corrêa.

Propriedades químicas e físicas do solo em cava de mina e pilha de estéril na mina de Fe em Carajás / Bernardo Villani Corrêa Fonseca ... [et al]. -- Belém-PA, 2020.

25 f. : il.

1. Minas a céu aberto. 2. Recuperação do solo. 3. Resistência à penetração do solo. 4. Atributos químicos do solo. I. Ramos, Sílvio Junio. II. Guedes, Rafael Silva. III. Gastauer, Markus. IV. Caldeira, Cecílio. V. Nascimento, Wilson. VI. Souza-Filho, Pedro Martins. VII. Título

CDD.23 ed. 622.34098115

Bibliotecário(a) responsável :Nisa Gonçalves CRB-2: 525

RESUMO

As atividades de revegetação de áreas impactadas pela mineração de ferro Fe podem ser prejudicadas por uma série de impedimentos de natureza química e física. Em cavas de mina, os problemas de ordem física, como a resistência à penetração e elevada inclinação podem se sobressair aos de ordem química, de modo que os atributos do solo devem ser considerados nos planos de recuperação dessas áreas. Este estudo teve como objetivo avaliar os principais atributos químicos e físicos que apresentam relação direta com o crescimento radicular nos taludes de cava e de pilhas de estéril, no complexo minerário de ferro de Carajás-PA. Para isso, foram coletadas amostras para caracterização química do solo em taludes de cava e pilhas de estéril, assim como em floresta nativa. Também, foram analisadas características físicas do solo, como densidade e a resistência à penetração em estação seca e chuvosa. Os resultados mostram que os taludes de cava apresentam baixo a médio os teores de P no solo, baixos teores de matéria orgânica e dos micronutrientes B, Zn e Cu. Nos taludes de pilha de estéril, os atributos químicos do solo se mostram menos preocupantes para o crescimento normal de plantas do que nos taludes de cava de mina. A resistência do solo à penetração nos taludes de cava foi maior que em pilhas de estéril e na floresta, no entanto na estação chuvosa houve redução de até 69 % da resistência do solo nos taludes de cava. Os principais problemas de natureza química observados podem ser corrigidos pela adubação, porém é necessário atentar para os elevados níveis de inclinação dos taludes, além da densidade do solo e os riscos de perdas por escoamento superficial, enquanto que a resistência à penetração se mostra um grave problema para o crescimento de raízes das plantas nas cavas em Carajás.

Palavras-chave: Minas a céu aberto. Recuperação do solo. Resistência à penetração do solo. Atributos químicos do solo.

ABSTRACT

Revegetation activities in areas degraded by iron ore mining can be hampered by a number of chemical and physical impediments. In mine pits, physical problems, such as resistance to penetration and high inclination, may stand out from those of a chemical nature, so that soil attributes should be considered in the recovery plans of these areas. This study aimed to evaluate the main chemical and physical attributes that are directly related to root growth in the slopes of pit and piles of waste, in the iron ore mining complex of Carajás-PA. To achieve this objective, samples were collected for chemical characterization of the soil in pit embankments and waste piles, as well as in native forest. Also, physical characteristics of the soil, such as density and resistance to penetration in dry and rainy seasons, were analyzed. The results show that the pit slopes present low to medium levels of P in the soil, low levels of organic matter and micronutrients B, Zn and Cu. In the slopes of the waste heap, the chemical attributes of the soil are less of a concern for normal plant growth than in the pit slopes. The soil resistance to penetration in the pit slopes was higher than in waste piles and in the forest, however in the rainy season there was a reduction of up to 69% of the soil resistance in the pit slopes. The main problems of a chemical nature observed can be corrected by fertilization, however, it is necessary to pay attention to the high levels of inclination of the slopes, in addition to the density of the soil and the risks of losses due to runoff, while the resistance to penetration is shown to be severe. problem for the growth of plant roots in the mine pits in Carajás.

Keywords: Open pit mines. Soil recovery. Resistance to soil penetration. Chemical attributes of the soil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa com a localização das áreas de estudo.....	11
Figura 2 - Pilha de Estéril Oeste – WP_O.	11
Figura 3 - Pilha de Estéril Sul 4 – WP_S4.	12
Figura 4 - Cava N5W.....	12
Figura 5 - Cava N4E.....	13

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1** - Recomendações para atributos químicos adotados para solos agrícolas no estado Pará, segundo Cravo et al. (2010)..... 15
- Tabela 2** - Umidade gravimétrica na estação chuvosa e densidade em cavas (N5W e N4E) e pilhas de estéril (WP_O e WP_S4) da mina de Fe e floresta na PMC.
..... 19

LISTA DE GRÁFICOS

- Gráfico 1** - Atributos químicos do solo em cavas de mina (N5W e N4E), pilhas de estéril (WP_O e WP_S4) e Floresta. Valores seguidos da mesma letra não diferem entre si pelo teste LSD.17
- Gráfico 2** - Atributos químicos do solo em cavas de mina (N5W e N4E), pilhas de estéril (WP_O e WP_S4) e Floresta. Valores seguidos da mesma letra não diferem entre si pelo teste LSD.....18
- Gráfico 3** - Distribuição relativa (%) de atributos químicos do solo em cava de mina (N5W e N4E) e pilha de estéril (WP_O e WP_S4) em função dos valores de recomendados para solos no estado do Pará (REC) propostos por Cravo et al. (2010) e Tedesco et al. (2004).18
- Gráfico 4** - Resistência a penetração do solo em áreas de cava e floresta a), b) e pilhas de estéril e floresta c), d) em estação seca e chuvosa. Dados apresentados como média de todos os pontos observados em cada área por profundidade.20

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BS	- Saturação por bases
CEC	- <i>Cation Exchange Capacity</i> (Capacidade de Troca Catiônica)
CTC	- Capacidade de Troca Catiônica
Embrapa	- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Fe	- Ferro
IBRAM	- Instituto Brasileiro de Mineração
pH	- potencial Hidrogeniônico
PMC	- Província Mineral de Carajás
RP	- Resistência à penetração

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	10
	2.1 Caracterização das áreas e amostragem.....	10
	2.2 Análises químicas do solo.....	14
	2.3 Análises físicas do solo.....	15
	2.4 Análises estatísticas.....	16
3	RESULTADOS	16
	3.1 Atributos químicos.....	16
	3.2 Densidade e resistência a penetração do solo.....	19
4	DISCUSSÃO	20
	4.1 Atributos químicos.....	20
	4.2 Atributos físicos.....	23
5	CONCLUSÕES	26
	REFERÊNCIAS.....	27

1 INTRODUÇÃO

As atividades de mineração para extração de minério de Fe exigem em significativas intervenções no meio ambiente natural, com notável perturbação e alteração nas características do solo.

Após a extração do minério se faz necessário realizar a recuperação ambiental das áreas degradadas ou interferidas. Uma das principais medidas voltadas à recuperação ambiental em áreas de mineração de Fe é a revegetação dos taludes, seja os de corte conformados nas cavas ou os de aterro, resultantes da deposição de materiais excedentes ou estéril.

A recuperação ambiental dessas faces conformadas pela atividade de mineração se dá, principalmente, através de sua revegetação. Ocorre que as atividades de revegetação de taludes de corte e aterro em mineração de Fe tem se demonstrado de grande complexidade, incorrendo em índices não satisfatórios de desenvolvimento e recobrimento vegetal.

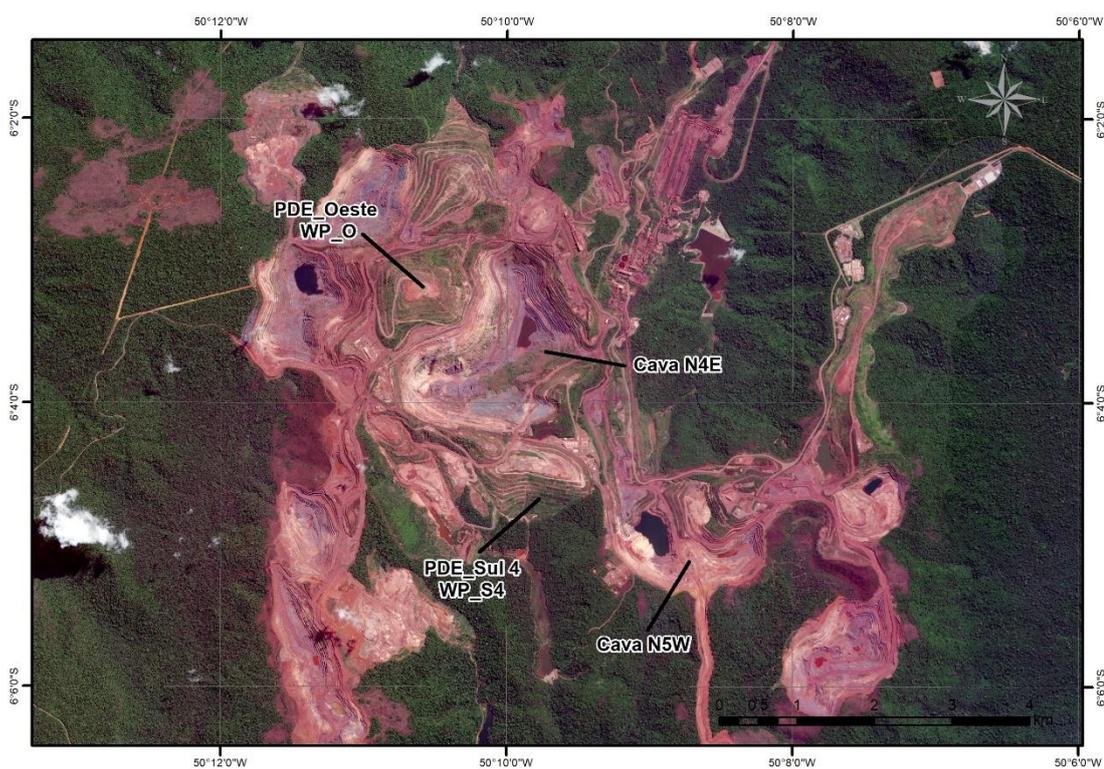
É sabido que as características físicas e químicas do substrato diretamente influenciam no sucesso do recobrimento vegetal. Para melhor entendimento das dificuldades que vêm sendo enfrentadas nas atividades de revegetação de taludes, este trabalho realizou coleta de amostras de solo em variadas áreas no Complexo Minerador de Carajás.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização das áreas e amostragem

O estudo foi desenvolvido na Província Mineral de Carajás, estado do Pará, Brasil, em mina de Fe a céu aberto, compreendendo diversas cavas, das quais vários taludes foram avaliados em duas cavas de mina, assim como duas pilhas de estéril contendo cronossequência de revegetação, sendo a pilha de estéril Oeste denominada de WP_O, enquanto a pilha de estéril Sul-4 foi identificada nesse estudo como WP_S4, além de uma área de floresta nativa. As cavas de minas estão situadas em dois platôs de minério de Fe: o platô N5, na face West (N5W), onde foram avaliados dois taludes, e o platô N4, na face *East* (N4E), onde foram avaliados três taludes. As Figuras 2, 3, 4, 5 e 6 apresentam um mapa com a localização e fotos aéreas das áreas de estudo.

Figura 2 - Mapa com a localização das áreas de estudo.



Fonte: Vale, 2019

Figura 3 - Pilha de Estéril Oeste – WP_O.



Fonte: Vale, 2019

Figura 4 - Pilha de Estéril Sul 4 – WP_S4.



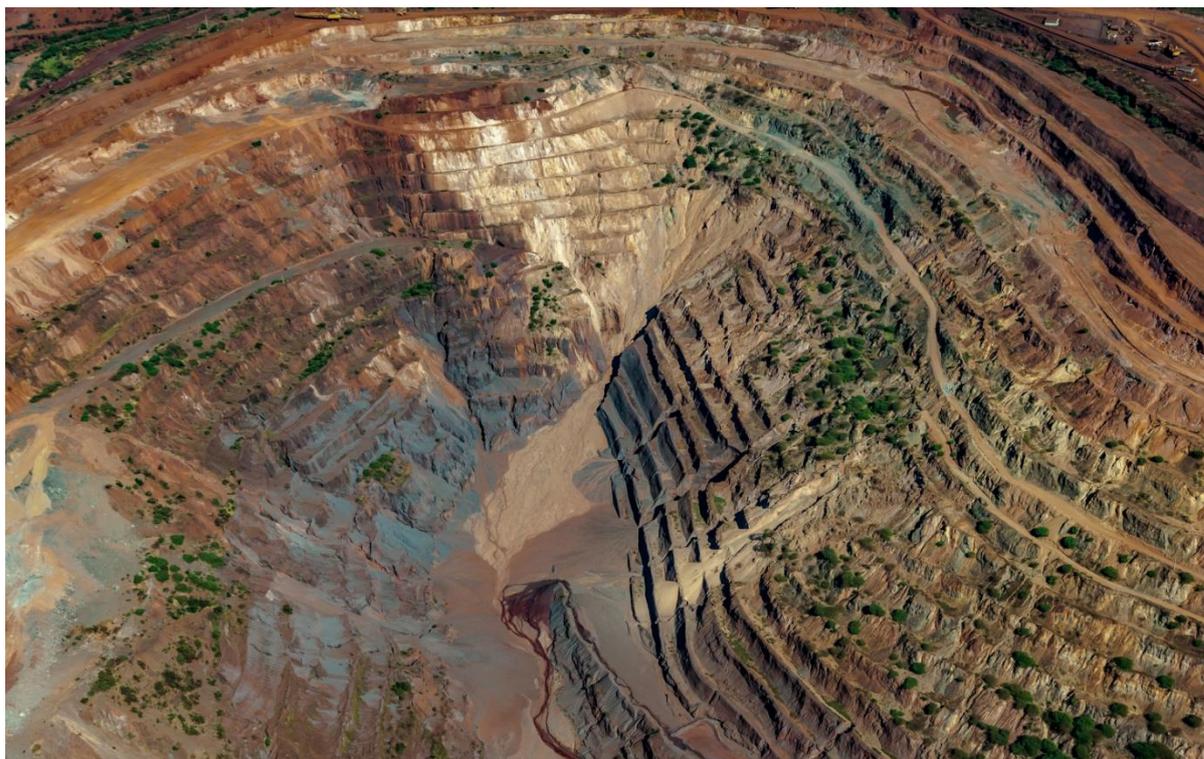
Fonte: Vale, 2019

Figura 5 - Cava N5W.



Fonte: Vale, 2019

Figura 6 - Cava N4E.



Fonte: Vale, 2019

Em ambas as cavas, os taludes apresentam material denso e com forte presença de rochas. As pilhas de estéril foram formadas pelo depósito de resíduos do processo de escavação para retirada do minério e, para a recuperação dessas áreas foram aplicados cerca de 2 t ha^{-1} de composto orgânico comercial, 600 kg ha^{-1} de NPK 4-14-08, 10 kg ha^{-1} de micronutrientes via FRITAS_BR12 e adubação de cobertura realizada 60 dias depois do plantio aplicando 100 kg ha^{-1} de NPK 20-00-20. Um hidrossemeador foi utilizado para a aplicação dos insumos e realização do semeio com a mix de sementes de espécies nativas e não nativas, incluindo principalmente espécies leguminosas. O grau de inclinação dos taludes de cava e pilhas de estéril variou entre 40 e 82 %, sendo os maiores valores observados nas cavas.

A coleta de amostras de solo em área de floresta nativa para a realização de análises físico químicas teve por objetivo levantar informações a respeito do *background* do ambiente natural da região, de modo a permitir a realização de comparações com os resultados obtidos nas áreas interferidas pela atividade de mineração na PMC.

2.2 Análises químicas do solo

As amostras foram coletadas na profundidade de 0-10 cm em pontos equidistantes nos taludes das cavas. O número de amostras variou segundo as dimensões de cada talude, sendo coletadas 49 amostras em N5W e 29 amostras em N4E. Nas pilhas de estéril e floresta foram coletadas amostras em parcelas de 10 x 20 m de modo que, em cada parcela, três amostras compostas foram coletadas, cada uma formada por 5 amostras simples. Assim, na pilha de estéril WP_O e WP_S4, 10 e 9 amostras compostas, respectivamente, foram coletadas e em floresta 5 amostras compostas. No total, 102 amostras foram analisadas.

A preparação das amostras para análises químicas incluiu secagem ao ar e peneiramento usando peneiras com 2 mm de abertura. As análises foram realizadas conforme Embrapa (2017): pH em água (solo:solução 1:2,5); K e P disponível foram extraídos em solução Mehlich-1 (MEHLICH, 1953), em que o K foi determinado por fotometria de chama e o P determinado por colorimetria; Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} trocáveis foram extraídos com KCl 1M, onde Ca^{2+} e Mg^{2+} foram determinados por espectrometria de absorção atômica e Al^{3+} foi determinado por titulação; a acidez potencial (H+Al) foi determinado via extração com acetato de cálcio 0,5 M e quantificado por titulação. Os teores de Fe, Cu, Zn e Mn disponível foram extraídos em solução DTPA a pH 7,3 e determinado por espectrometria de absorção atômica e B extraído por BaCl_2 a quente (Camargo et al., 2009). O N total foi extraído pelo método Kjeldahl e o S- SO_4^{2-} extraído em solução $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ em ácido acético 2M contendo 500 mg kg^{-1} de P e determinado por turbidimetria (Camargo et al., 2009). A capacidade de troca catiônica (CTC) foi calculada como $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{H} + \text{Al}^{3+}$; saturação por bases (BS) = $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+) \times 100 / \text{CTC}$. O teor de matéria orgânica é estimado pela concentração de carbono orgânico do solo determinado via combustão úmida (EMBRAPA, 2017) (Tabela 1).

Tabela 1 - Recomendações para atributos químicos adotados para solos agrícolas no estado Pará, segundo Cravo et al. (2010).

Atributo		Baixo	Médio	Alto
pH*	-	<5,5	5,5-6,0	>6
MO*	dag kg ⁻¹	<2,6	2,6-5,0	>5,0
P	mg kg ⁻¹	<5	5-10	>11
K	mg kg ⁻¹	<40	40-60	>60
Ca	cmol _c kg ⁻¹	<1,5	1,5-3,5	>3,5
Mg	cmol _c kg ⁻¹	<0,5	0,5-1,5	>1,5
B	mg kg ⁻¹	<0,35	0,35-0,9	>0,9
Cu	mg kg ⁻¹	<0,7	0,7-1,8	>1,8
Fe	mg kg ⁻¹	<18	18-45	>45
Mn	mg kg ⁻¹	<5	5-12	>12
Zn	mg kg ⁻¹	<0,9	0,9-2,2	>2,2

*Valores propostos por Tedesco et al. (2004). Dados em negrito são o limite superior do terço médio de classificação, adotados como referência (Alvarez et al., 1999)

Fonte: Adaptado de Cravo *et al* 2010.

2.3 Análises físicas do solo

Para análises de resistência a penetração, foram avaliados perfis de 0 a 10 cm em floresta, taludes de pilhas de estéril e taludes de cavas em dois períodos: estação seca (junho 2019) e estação chuvosa (novembro de 2019). Foram avaliados 22 pontos de amostragem em taludes de cavas, 12 pontos em pilhas de estéril e 9 pontos em floresta na estação seca. Na estação chuvosa foram analisados 30 pontos em taludes de cava, 12 pontos em pilhas de estéril e 6 pontos em floresta, obedecendo uma distância mínima de 10 m e máxima de 50 m entre cada ponto de amostragem.

A resistência à penetração foi avaliada através de um penetrômetro de impacto segundo o método descrito por Stolf et al. (1983). O penetrômetro de ponta em cone expressa os resultados por meio da equação (1) de Stolf (1991), considerando as características do equipamento utilizado.

$$RP = 2,37 + 3,7(N) \quad (1)$$

Onde, RP é a resistência à penetração do solo em kgf cm⁻² e N é o número de impactos de peso metálico. Os resultados obtidos em kgf cm⁻² foram multiplicados pela constante 0,0980665 para conversão em Mpa. Em cada ponto de avaliação de RP foram coletadas amostras indeformadas para análise de densidade e umidade gravimétrica conforme Embrapa (2017).

2.4 Análises estatísticas

Todos as análises foram realizadas em triplicata. Todas as variáveis foram submetidas ao teste LSD de Fisher, quando os dados apresentam homogeneidade de variância, e quando não, um teste Dunnett T3 foi aplicado, sempre analisado a um nível de 95% de confiança. Para as análises utilizou-se a linguagem R, versão 3.5.1 para Windows (R Core Team, 2018). Para a construção dos gráficos, foi utilizado o software SigmaPlot versão 12.0.

3 RESULTADOS

3.1 Atributos químicos

O pH do solo nos taludes de cava de mina e nas pilhas de estéril variaram entre 5.5 e 6.2 (Gráfico 1), faixa considerada ideal para a disponibilidade de macro e micronutrientes. Esses valores são superiores ao observados para os solos de floresta amostrados em Carajás.

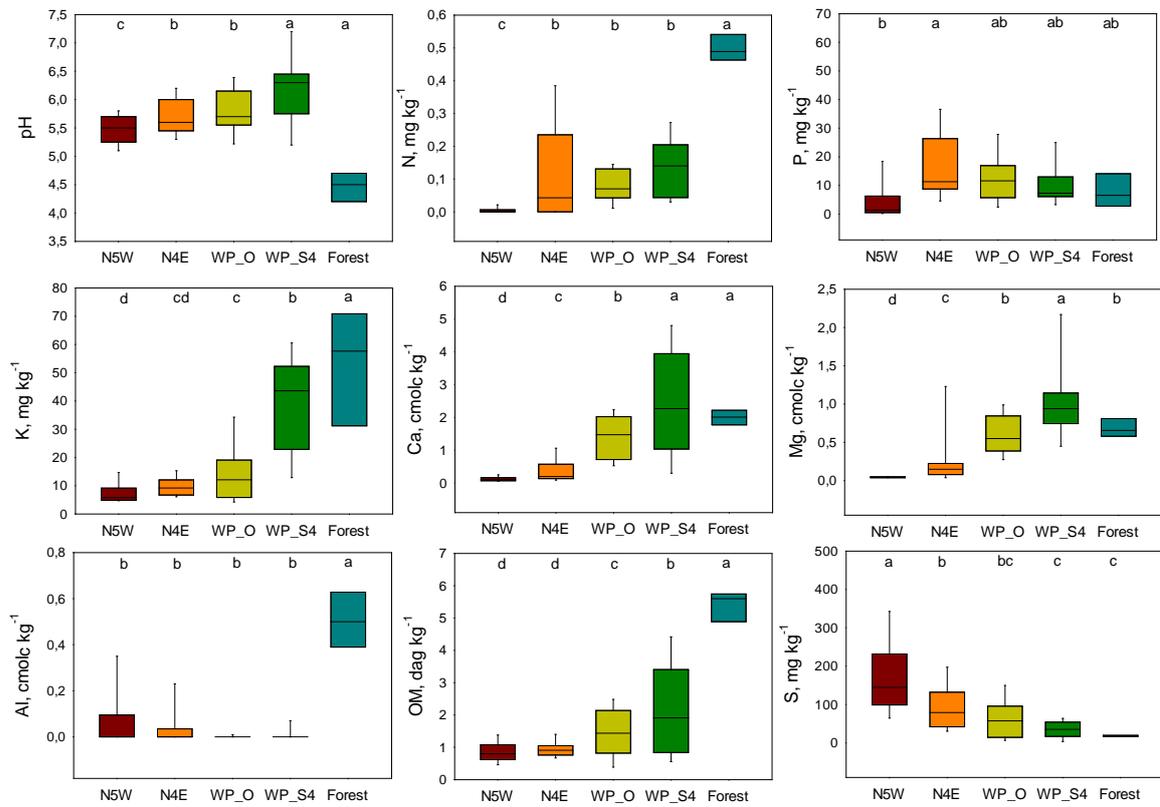
Todas as áreas apresentaram teores de P disponível inferiores a 12 mg kg^{-1} , exceção para a cava N4E (Gráfico 1). Observa-se que nos taludes da mina N5W os teores disponíveis de P correspondem a apenas 25% do recomendado em solos para o crescimento de plantas em solos da região. Mas, os teores encontrados nos taludes da mina N4E são superiores em 20% a esses níveis de referência (Gráfico 1). Os teores de K nas cavas não superaram 11 mg kg^{-1} , sendo os maiores valores encontrados nas áreas de floresta. Esses teores são inferiores em até 91 % nos taludes de cavas e 80 % inferiores em pilhas de estéril, quando comparados aos valores recomendados para solos da região. De modo semelhante, observou-se baixos teores de Ca e Mg em ambos os taludes de cavas e pilhas de estéril, os quais encontram-se, respectivamente, 82 a 97 % e 30 e 60 % abaixo dos valores recomendados. Outros elementos, como Al, que se encontra dentro do tolerável para as plantas, e S e Mn, que superaram a recomendação e não representam dificuldades para o processo de revegetação dessas áreas.

O conteúdo de matéria orgânica do solo nos taludes de cava de mina e nas pilhas de estéril foi menor que o encontrado nas áreas de floresta, estando ainda de 60 a 80 % abaixo do recomendado. Essa tendência foi observada também para os

teores de N total nos taludes avaliados. Além disso, CEC e Fe disponível apresentaram maiores valores em floresta.

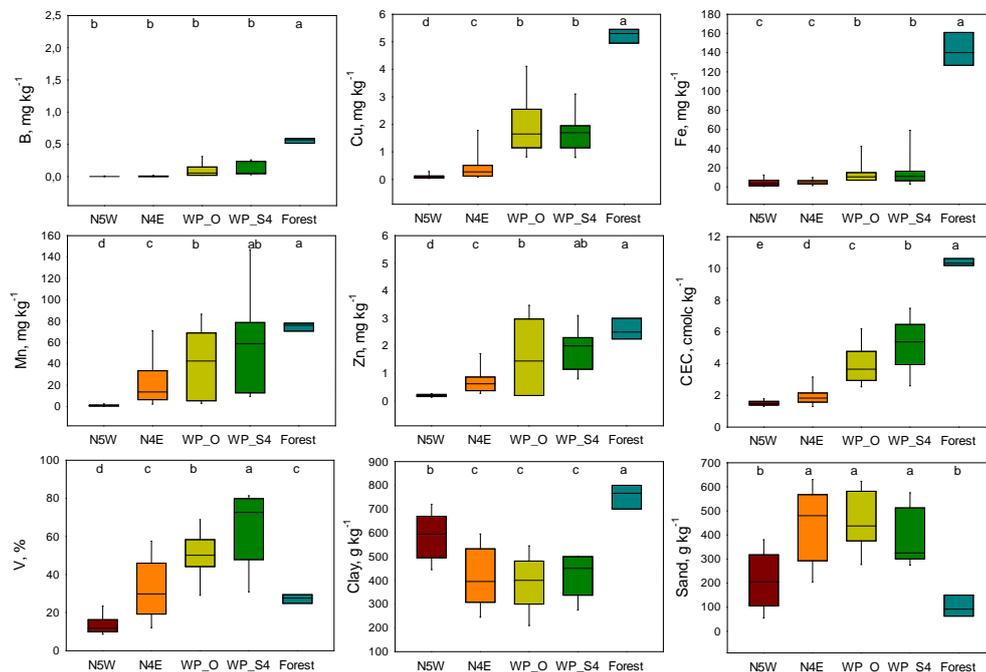
De modo geral, os micronutrientes B, Cu, Zn e Fe disponível nos taludes de cava são menores aos teores encontrados na floresta nativa e, esses estão muito abaixo da recomendação adotada neste estudo (Gráficos 2 e 3).

Gráfico 1 - Atributos químicos do solo em cavas de mina (N5W e N4E), pilhas de estéril (WP_O e WP_S4) e Floresta. Valores seguidos da mesma letra não diferem entre si pelo teste LSD.



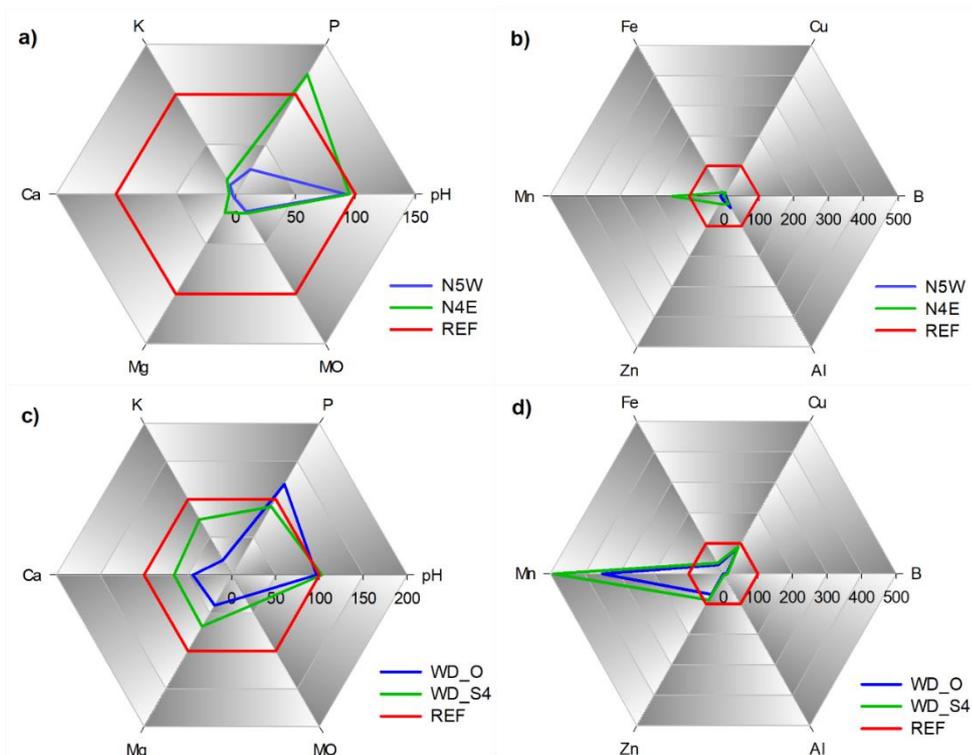
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 2 - Atributos químicos do solo em cavas de mina (N5W e N4E), pilhas de estéril (WP_O e WP_S4) e Floresta. Valores seguidos da mesma letra não diferem entre si pelo teste LSD



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 3 - Distribuição relativa (%) de atributos químicos do solo em cava de mina (N5W e N4E) e pilha de estéril (WP_O e WP_S4) em função dos valores de recomendados para solos no estado do Pará (REC) propostos por Cravo et al. (2010) e Tedesco et al. (2004).



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 Densidade e resistência a penetração do solo

A densidade do solo foi avaliada na camada de 0 a 10 cm e indicou baixos valores na área de floresta nativa ($1,1 \text{ g cm}^{-3}$), nas pilhas de estéril apresentam valores que variaram entre $1,3$ e $1,6 \text{ g cm}^{-3}$, enquanto que em N4E a densidade do solo ($1,92 \text{ g cm}^{-3}$) pode ser considerado um fator preocupante para o processo de revegetação e restauração da área (Tabela 2). Entretanto, na cava N5W, os dados mostram que a densidade do solo ($1,54 \text{ g cm}^{-3}$) pode não ser o principal problema físico para o desenvolvimento radicular das plantas.

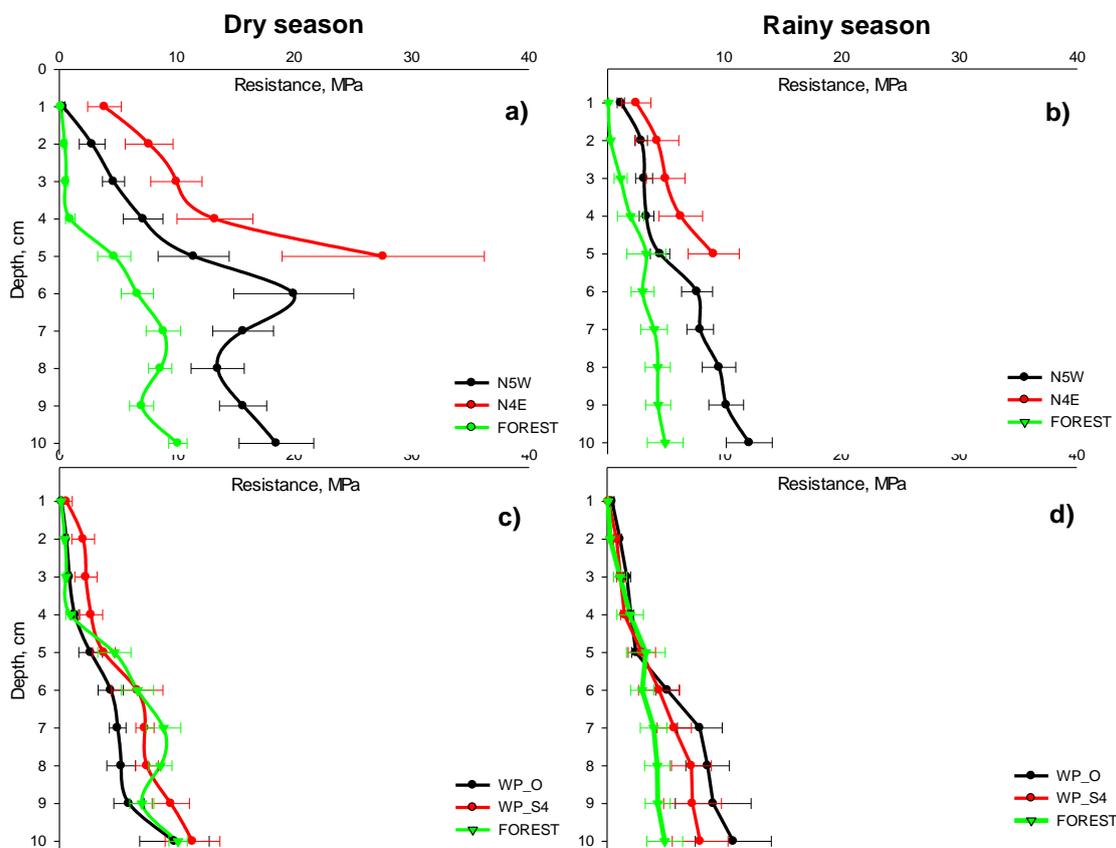
As cavas de mineração também apresentam elevada resistência à penetração das raízes, principalmente na estação seca, com destaque para a cava N4E (média de 28 Mpa) (Gráfico 4). Por outro lado, na estação chuvosa, houve redução de 69% da resistência à penetração nesse talude de cava nos primeiros 5 cm de profundidade. Para essa área, somente foi possível avaliar até 5 cm de profundidade, isso devido à forte presença de material rochoso. Diferentemente, nas pilhas de estéril, foram observados menores valores de resistência à penetração, os quais se aproximam aos encontrados em floresta, tanto em estação seca como chuvosa.

Tabela 2 - Umidade gravimétrica na estação chuvosa e densidade em cavas (N5W e N4E) e pilhas de estéril (WP_O e WP_S4) da mina de Fe e floresta na PMC.

	Umidade (g g^{-1})	Densidade (g dm^{-3})
N5W	0,18	1,54
N4E	0,08	1,95
WP_O	0,14	1,27
WP_S4	0,19	1,58
Forest	0,28	1,08

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 4 - Resistência a penetração do solo em áreas de cava e floresta a), b) e pilhas de estéril e floresta c), d) em estação seca e chuvosa. Dados apresentados como média de todos os pontos observados em cada área por profundidade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4 DISCUSSÃO

4.1 Atributos químicos

O pH do solo é um dos atributos mais importantes para o processo de recuperação de áreas degradadas e pode ser um agravante por causar a baixa disponibilidade de nutrientes (TOUCEDA-GONZÁLEZ *et al.*, 2017). No presente estudo, as áreas avaliadas não apresentam limitações quanto a acidez do solo, a qual variou dentro da faixa ideal para a disponibilidade da maioria dos macro e micronutrientes (ALVAREZ *et al.*, 1999). Esses valores de pH estiveram acima do observado em ambiente de floresta nativa, entretanto é importante destacar que em floresta, mesmo com um solo ácido, um conjunto de fatores pode contribuir para a disponibilidade de nutrientes, como maior matéria orgânica, atividade microbiana, exsudados radiculares, além outros fatores como microclima próprio para o

desenvolvimento das espécies nativas (FUJITA; MIYABARA; KUNITO, 2019; JING *et al.*, 2020). Neste ambiente, a decomposição da serapilheira, associada a elevada temperatura e umidade é responsável pelo fornecimento de nutrientes ao solo, permitindo o desenvolvimento de uma vegetação sem sintomas de deficiência nutricional, em um solo naturalmente pobre (QUESADA *et al.*, 2011).

A disponibilidade de P nas áreas mineradas variou entre baixa a alta (CRAVO *et al.*, 2010), indicando a necessidade de reposição deste nutriente nos locais de menor disponibilidade para atingir o valor de referência em alguns ambientes. As formações ferríferas podem conter minerais fosfatados (UPADHYAY; ASOKAN; VENKATESH, 2011), entretanto a disponibilidade de P pode ser extremamente baixa, porque este elemento pode estar associado a estrutura cristalina dos minerais ou, quando liberado pelo intemperismo para a solução do solo, pode ser adsorvido nos óxidos e hidróxidos de Fe e Al (FINK *et al.*, 2016). Por este motivo, uma forma de aumentar a eficiência de aproveitamento do P do solo pode ser a aplicação de compostos orgânicos que retardem a retenção de fosfatos aplicados ao solo via fertilizante, bem como o uso de fontes de liberação lenta (FERTAHI *et al.*, 2019).

Baixos teores de Ca e Mg foram encontrados nos taludes de cava e pilhas de estéril (CRAVO *et al.*, 2010), principalmente nas cavas, onde foi encontrada maior diferença para os valores de referência. Esses baixos teores de Ca e Mg encontrados nos taludes, se devem ao material parental, que dá origem a solos naturalmente pobres em Ca e Mg, fato que se confirma na maior parte dos solos da região amazônica (QUESADA *et al.*, 2011). As minas de Fe em Carajás se situam na Bacia Carajás onde ocorrem rochas metavulcano-sedimentares e similares, compostas principalmente de Metabasalto, Metarriolito e Metadacito (VASQUEZ; ROSA-COSTA, 2008), que apesar de conter o Ca e Mg na estrutura mineral, esses elementos não se encontram disponíveis às plantas. Isso reforça a necessidade de fornecimento de Ca e Mg, principalmente por meio de fontes menos solúveis, uma vez que tanto as áreas de cavas de mina como pilhas de estéril apresentam alta inclinação e isso pode favorecer a erosão e perda de nutrientes por escoamento superficial e lixiviação.

Diferentemente dos taludes de cava, as pilhas de estéril são áreas de maior facilidade de manejo (maior facilidade de plantio, fertilização e manutenção de plantas) e, por isso, se distanciam menos dos valores de referência. As pilhas de estéril apresentam maiores teores de Ca e Mg devido à calagem realizada no início

do processo de revegetação. Esses resultados demonstram que a prática de calagem foi eficiente para aumentar os valores desses elementos nessas áreas, equiparando aos valores observados em áreas de floresta. De maneira geral, os taludes nas pilhas de estéril apresentam menor grau de inclinação, favorecendo as operações de correção do solo. Por outro lado, os taludes nas cavas podem atingir mais de 80 % de inclinação e representam um desafio para as práticas de preparo do solo, causando grandes perdas, não apenas de fertilizantes, mas também de sementes e plântulas. Como forma de minimizar as perdas na revegetação de áreas muito inclinadas, Zhao *et al.* (2018), realizaram plantio de mudas utilizando técnica denominada “*container seedling*” e observou expressivos aumentos na cobertura do solo de encostas de estradas, aumentando a eficiência de aproveitamento de água e fertilizantes. Segundo Chirino *et al.* (2008), o uso desta técnica permite o maior desenvolvimento de raízes e observaram ganhos na condutância hidráulica das raízes de plantas usadas no reflorestamento mesmo que plantadas em condições áridas.

Os baixos teores de K nas em cavas e pilhas de estéril se relacionam diretamente com a formação geológica da Bacia de Carajás baixa ocorrência de rochas graníticas ou granitoides (VASQUEZ; ROSA-COSTA, 2008). Mesmo quando aplico ao solo, os teores de K tendem a ser baixos devido a elevada mobilidade do elemento no solo, o qual é fracamente retido no solo por adsorção eletrostática (EICK *et al.*, 1990). Isso dificulta o manejo de fertilização, exigindo aplicações fracionadas, tendo em conta não apenas a possibilidade de perdas do elemento, mas também as necessidades fisiológicas da planta e o balanceamento com outros nutrientes (DAS *et al.*, 2019).

Tanto taludes de cava como pilhas de estéril, acumulam menos matéria orgânica que as áreas de floresta avaliadas. Esse fato ocorre porque são escassas as fontes de matéria orgânica nas áreas mineradas, principalmente nos taludes inclinados de cava de mina. Também, as áreas de floresta apresentaram maiores teores de N no solo, assim como CTC, B e Fe disponíveis, o que confirma a importância da matéria orgânica para o fornecimento de nutrientes e disponibilidade de micronutrientes. Segundo Dunalska *et al.* (2012), a matéria orgânica possui relação direta com o teor de N do solo e pode ser a principal fonte deste nutriente em ambientes não antropizados, principalmente em condições de elevadas temperaturas. Do mesmo modo, a matéria orgânica pode ter grande influência na CTC do solo,

devido ao elevado número de cargas livres em superfície de suas estruturas (ZHAO *et al.*, 2019).

Em síntese, os atributos químicos dos taludes nas pilhas de estéril e, principalmente nas cavas, apresentaram limitações para a revegetação, como baixo Ca, Mg, matéria orgânica e micronutrientes, e que associado ao grau de inclinação das áreas, podem dificultar a recuperação dos taludes de cava de mina. Poucos trabalhos publicados mostram sucesso na revegetação de taludes de cava de mina, por exemplo (PINTO *et al.*, 2011; ZHAO *et al.*, 2018), em que o plantio em covas aumentou o aproveitamento de fertilizantes e evitou a perdas de plantas por enxurrada. Além disso aplicação de hidrogel nas covas em taludes mostrou aumentar a eficiência de uso da água e facilitar o crescimento radicular (MILLER; NAETH, 2019). Para os taludes em pilhas de estéril, pesquisas apontam soluções para a recuperação desse ambiente, como adubação e semeio por hidrossemeadura, a proteção imediata do solo com aplicação de diversas combinações de mulches e fibras para a fixação de sementes e fertilizantes no solo (FIELDS-JOHNSON *et al.*, 2012; LIU *et al.*, 2019).

4.2 Atributos físicos

Os maiores valores de densidade em pilhas de estéril em relação à floresta podem estar associado ao processo de formação das pilhas de estéril, as quais são formadas por material desagregado, que durante o empilhamento sofrem compactação por máquinas e este material, com o tempo, tende a se rearranjar, causando o aumento da densidade (VEIGA *et al.*, 2007). Apesar disso, a densidade de solo nos taludes nas pilhas de estéril parece não comprometer a revegetação, uma vez que espécies herbáceas, arbustos e arbóreas formam a vegetação nativa e são facilmente encontradas cobrindo o solo nessas áreas. Nos taludes da cava, onde foram observados os maiores valores de densidade do solo, é possível que o impedimento físico seja um dos causadores do menor desenvolvimento de raízes das plantas e, conseqüentemente, isso possa afetar negativamente o processo de revegetação. Segundo Reinert *et al.* (2008), densidade do solo maiores que $1,85 \text{ g cm}^{-3}$ podem causar sérias restrições ao crescimento radicular e reduções no desenvolvimento de diversas espécies. Até o momento não há maneiras rápidas e eficientes para reduzir a densidade do solo em áreas de elevada inclinação, entretanto

espera-se que com o avanço do processo de recuperação das áreas, o desenvolvimento de raízes, o aumento da atividade microbiana e a incorporação de matéria orgânica favoreça a redução da densidade do solo (ASENSIO *et al.*, 2013). Nestes casos, a bioturbação provocada pelo desenvolvimento de raízes se mostra fundamental (COLOMBI; KELLER, 2019).

A densidade do solo em área de floresta, pode estar sendo condicionado pela maior quantidade de matéria orgânica e, possivelmente, pela maior atividade microbiana neste ambiente, fundamental para a estruturação e agregação do solo (DULTZ *et al.*, 2018; QIN *et al.*, 2017). Desta maneira, o baixo teor de matéria orgânica encontrado nos taludes da cava de mina e pilhas de estéril pode ser considerada um problema. As áreas de cava de mina são ambientes escavados que normalmente possuem baixos teores de matéria orgânica, enquanto que as pilhas de estéril são provenientes de diferentes materiais, os quais foram revolvidos, facilitando a oxidação da matéria orgânica (ONDRASEK *et al.*, 2019). Portanto, é fundamental que o manejo de recuperação dessas áreas considere a necessidade de adição/incorporação de matéria orgânica, como forma de melhorar o condicionamento não apenas químico, mas também físico do solo. No entanto, devido a inclinação dos taludes nas cavas de mina e a dificuldade de fixação e estabelecimento de plantas nessas áreas, aumentar o teor de matéria orgânica pode ser um grande desafio.

A resistência à penetração nos taludes de cava atingiu valores acima de 10 MPa e são considerados como extremamente elevados para solos (ARSHAD; LOWERY; GROSSMAN, 1996). Assim, nas condições de solo seco ou baixa umidade nas cavas, a partir de 1 cm de profundidade já há forte impedimento ao desenvolvimento radicular e, a 5 cm de profundidade a resistência à penetração possivelmente inviabiliza o crescimento da maioria das espécies utilizadas atualmente nas atividades de revegetação. A partir de 3 MPa podem ocorrer sérias restrições ao crescimento de raízes, causando alterações morfológicas e forçando o desenvolvimento superficial de raízes no solo, conseqüentemente, limita a absorção de água e nutrientes na superfície do solo, e aumenta a susceptibilidade ao déficit hídrico (COLOMBI *et al.*, 2018). Por outro lado, com o aumento da umidade do solo em função do início do período chuvoso na região, foi observada redução dos valores de resistência à penetração nos taludes de cava estudados, os quais se aproximaram dos valores observados em solo de floresta na estação seca. Além de fatores como

argila, matéria orgânica e mineralogia, a umidade do solo é apontada como outro fator que afeta a resistência à penetração no solo, uma vez que altera a coesão entre partículas do solo, de modo que quando o solo está seco ou com baixa umidade, há uma aproximação de partículas que dificulta sua separação por forças externas (BELTRAME *et al.*, 1981). Assim, com o aumento do teor de água, decresce a atuação das forças de coesão entre as partículas do solo e o atrito interno, incorrendo em redução da resistência a deformações e a penetrações (DUNCAN *et al.*, 2014). O resultado encontrado no presente estudo sugere que há uma necessidade de manutenção de níveis de umidade adequados nessas áreas, para que as práticas de revegetação tenha maior sucesso, considerando o impedimento físico que existe no local.

A menor resistência a penetração observada nos taludes pilhas de estéril, em relação às cavas, se deve em parte à pouca estrutura do solo (ainda em fase de consolidação). A estrutura do solo é também considerada um fator determinante para a resistência do solo, e em caso de materiais pouco estruturados e pouco coesos, há uma tendência que essa resistência seja menor (GÜLSER; CANDEMIR, 2012). Apesar disso, a resistência do solo a partir de 5 cm de profundidade é considerada elevada (ARSHAD; LOWERY; GROSSMAN, 1996), o que não necessariamente representa um problema para as espécies nativas, uma vez que esses valores são observados em níveis semelhantes na área de floresta nativa. Além disso, a elevada resistência nas pilhas de estéril pode estar relacionada à forte presença de pequenos fragmentos rochosos, que pode não afetar o crescimento radicular, tendo em vista a capacidade das raízes em contornar esses pontos de resistência, além de alterar sua arquitetura radicular (CHEN *et al.*, 2014).

De modo geral, os problemas de ordem física não são facilmente manejáveis nos taludes de cava de mina, principalmente devido à inclinação dos taludes. Além disso, é preciso considerar que os taludes apresentam elevado risco para as atividades de revegetação, por exemplo, coveamento, aplicação de insumos, sementes e mudas. Por outro lado, com o controle de umidade é possível reduzir a resistência a penetração do solo, minimizando os efeitos da densidade, e isso pode facilitar o desenvolvimento de espécies para a revegetação nos taludes de cava de mina. Para isso, a implantação de sistemas de irrigação pode ser uma alternativa viável não apenas para o fornecimento de água às plantas, mas também para reduzir

a resistência do solo. A disponibilidade de água às plantas permite o maior desenvolvimento radicular e o acesso a regiões mais profundas do solo (COLOMBI *et al.*, 2018), de modo que pode garantir maior cobertura do solo, estabilidade do terreno, e em estações secas, maior taxa de sobrevivência das espécies implantadas.

5 CONCLUSÕES

Os problemas de natureza química do solo observados tanto em cavas de mina como em pilhas de estéril, podem ser corrigidos com simples fertilização, entretanto a disposição e inclinação dos taludes, principalmente taludes de corte pode tornar mais difícil a aplicação de técnicas de correção de solo, como calagem e fertilização ou até mesmo o plantio. As cavas de mina apresentaram baixo teor de matéria orgânica, macronutrientes como Ca, Mg, K e N, além de micronutrientes como B, Zn e Cu. Esses elementos podem ser aplicados ao solo juntamente com o plantio, porém é necessário que haja mecanismos de proteção de solo e plantas para conter as perdas por escorrimento superficial e permitir o armazenamento dos insumos, favorecendo o desenvolvimento vegetal. Para isso, um sistema de plantio em covas ou containers também pode ser eficiente em áreas de elevada inclinação (ZHAO *et al.*, 2018).

Apesar dos elevados valores de resistência em pilhas de estéril, não são esperados significativos efeitos negativos sobre o desenvolvimento radicular das espécies nativas usadas para o manejo de recuperação dessas áreas. Entretanto, as cavas de mina apresentam elevada densidade e elevada resistência a penetração das raízes, o que pode ser um dos principais impedimentos para revegetação dessas áreas. Este é um problema cuja solução é altamente dependente da sazonalidade das chuvas, porém é possível que a aplicação de lâminas adequadas de irrigação possa reduzir a resistência do solo.

REFERÊNCIAS

ALVAREZ, V. H., *et al.* Interpretação dos resultados das análises de solos. *In*: RIBEIRO, A. C., GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. (EDS.). **Recomendações Para o Uso de Corretivos e Fertilizantes em Minas Gerais - 5º Aproximação**. CFSEMG, Viçosa, p. 359. 1999

ASENSIO, V. *et al.* Tree vegetation and waste amendments to improve the physical condition of copper mine soils. **Chemosphere**, v. 90, p. 603–610. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.08.050>. Acesso em: 20 jan. 2020.

ARSHAD, M. A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. *In*: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (Eds.). **Methods for Assessing of Soil Quality**. **Soil Science Society of American/American Society of Agronomy**, Madison, p. 123–141. 1996.

CAMARGO, O. A. *et al.* Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do IAC, **Technical Bulletin**. Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas. 2009.

CHEN, Y. L. *et al.* Root architecture alteration of narrow-leafed lupin and wheat in response to soil compaction. **F. Crop. Res.**, v. 165, p. 61–70. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.04.007>. Acesso em: 20 jan. 2020

COLOMBI, T. *et al.* Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth – A vicious circle. **Sci. Total Environ**, v. 626, p. 1026–1035. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.129>. Acesso em: 20 jan. 2020

COLOMBI, T.; KELLER, T. Developing strategies to recover crop productivity after soil compaction—A plant eco-physiological perspective. **Soil Tillage Res.** v. 191, p. 156–161. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.04.008>. Acesso em: 20 jan. 2020

CRAVO, M. S. *et al.* **Recomendações de adubação e calagem para o Estado do Pará**, 1. ed. Embrapa Amazônia Oriental, Belém. 2010.

DAS, D. *et al.* Potassium supplying capacity of a red soil from eastern India after forty-two years of continuous cropping and fertilization. **Geoderma**, v. 341, p. 76–92. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.041>. Acesso em: 20 jan. 2020

DULTZ, S. *et al.* Impact of organic matter types on surface charge and aggregation of goethite. **Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.**, v. 554, p. 156–168. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.06.040>. Acesso em: 20 jan. 2020

DUNALSKA, J. A. *et al.* Effect of temperature on organic matter transformation in a different ambient nutrient availability. **Ecol. Eng.** v. 49, p. 27–34. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.08.023>. Acesso em: 20 jan. 2020

DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G.; BRANDON, T. L. **Soil Strength and Slope Stability**, 2nd Ed., John Wiley & Sons. 2014

EICK, M. J. *et al.* Analyses of Adsorption Kinetics Using a Stirred-Flow Chamber : II . Potassium-Calcium Exchange on Clay Minerals. **Soil Sci. Soc. Am. J.** v. 54, p. 1278–1282. 1990. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj1990.03615995005400050013x>. Acesso em: 20 jan. 2020

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**, 3. ed. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017

FERTAHI, S. *et al.* New generation of controlled release phosphorus fertilizers based on biological macromolecules: Effect of formulation properties on phosphorus release. **Int. J. Biol. Macromol.** 2019 Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2019.12.005>. Acesso em: 20 jan. 2020.

FIELDS-JOHNSON, C. W. *et al.* Forest restoration on steep slopes after coal surface mining in Appalachian USA: Soil grading and seeding effects. **For. Ecol. Manage.**, v. 270, p. 126–134. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.01.018>. Acesso em: 20 jan. 2020.

FINK, J. R. *et al.* Phosphorus adsorption and desorption in undisturbed samples from subtropical soils under conventional tillage or no-tillage. **J. Plant Nutr. Soil Sci.**, p. 1-8. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jpln.201500017>. Acesso em: 20 jan 2020.

FUJITA, K.; MIYABARA, Y.; KUNITO, T. Microbial biomass and coenzymatic stoichiometries vary in response to nutrient availability in an arable soil. **Eur. J. Soil Biol.**, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2018.12.005>. Acesso em: 20 jan 2020.

GÜLSER, C.; CANDEMIR, F. Changes in penetration resistance of a clay field with organic waste applications. **Eurasian J. Soil Sci.**, v. 1, p. 16–21. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.18393/ejss.03364>. Acesso em:

JING, X. *et al.* Soil microbial carbon and nutrient constraints are driven more by climate and soil physicochemical properties than by nutrient addition in forest ecosystems. **Soil Biol. Biochem.**, v. 141, p. 107657. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107657>. Acesso em: 20 jan. 2020.

LIU, G. *et al.* Effects and mechanisms of erosion control techniques on stairstep cut-slopes. **Sci. Total Environ.**, v. 656, p. 307–315. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.385>. Acesso em: 20 jan. 2020.

MEHLICH, A. **Determination of P, Ca, Mg, K, Na, and NH₄, North Carolina Soil Testing Laboratories**. Raleigh: University of N. Carolina, 1953.

MILLER, V. S., NAETH, M. A. Hydrogel and Organic Amendments to Increase Water Retention in Anthrosols for Land Reclamation. **Appl. Environ. Soil Sci.** p. 1–11.

2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2019/4768091>. Acesso em: 20 jan. 2020.

ONDRASEK, G. *et al.* Biogeochemistry of soil organic matter in agroecosystems & environmental implications. **Sci. Total Environ.**, v. 658, p. 1559–1573. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.12.243>. Acesso em: 20 jan. 2020.

PINTO, J. R. *et al.* Establishment and growth of container seedlings for reforestation: A function of stocktype and edaphic conditions. **For. Ecol. Manage.**, v. 261, p. 1876–1884. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.02.010>. Acesso em: 20 jan. 2020.

QIN, H. *et al.* Intensive management decreases soil aggregation and changes the abundance and community compositions of arbuscular mycorrhizal fungi in Moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) forests. **For. Ecol. Manage.**, v. 400, p. 246–255. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.06.003>. Acesso em: 20 jan. 2020.

QUESADA, C. A. *et al.* Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites. **Biogeosciences**, v. 8, p. 1415–1440. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/bg-8-1415-2011>. Acesso em: 20 jan. 2020.

R CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Reinert, D.J., Albuquerque, J.A., Reichert, J.M., Aita, C., Andrada, M.M.C., 2008. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em argissolo vermelho. **Rev. Bras. Ciência do Solo**, v. 32, p. 1805–1816. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000500002>. Acesso em: 20 jan. 2020.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Rev. Bras. Cienc. do Solo**, v. 15, p. 229–235. 1991.

STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI NETO, V. Penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf: recomendação para seu uso. **STAB 1**, p. 18–23. 1983.

TEDESCO, M. J. *et al.* **Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**, 10. ed. Porto Alegre: SBCS - Sociedade Brasileira de Ciência Do Solo; Núcleo Regional Sul, 2004.

TOUCEDA-GONZÁLEZ, M. *et al.* Aided phytostabilisation reduces metal toxicity, improves soil fertility and enhances microbial activity in Cu-rich mine tailings. **J. Environ. Manage.** 186, 301–313. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.019>

UPADHYAY, R. K.; ASOKAN, S.; VENKATESH, A. S. Mode of occurrence of phosphorus in iron ores of eastern limb, Bonai Synclinorium, eastern India. **J. Geol. Soc. India**, v. 77, p. 549–556. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12594-011-0054-z>. Acesso em: 20 jan. 2020.

VASQUEZ, M. L.; ROSA-COSTA, L. T. **Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG**: texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará. Escala 1:1.000.000. CPRM, Belém. 2008.

VEIGA, M. *et al.* Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. **Soil Tillage Res.**, v. 92, p. 104–113. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2006.01.008>. Acesso em: 20 jan. 2020

ZHAO, X. *et al.* Revegetation using the deep planting of container seedlings to overcome the limitations associated with topsoil desiccation on exposed steep earthy road slopes in the semiarid loess region of China. **L. Degrad. Dev.**, v. 29, p. 2797–2807. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ldr.2988>. Acesso em: 20 jan. 2020.

ZHAO, Z. *et al.* Evolution of soil surface charge in a chronosequence of paddy soil derived from Alfisol. **Soil Tillage Res.**, v. 192, p. 144–150. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.011>. Acesso em: 20 jan. 2020.

**Apêndice B – PONDERAÇÃO SOBRE AS POSSÍVEIS IMPLICAÇÕES DA
PRÁTICA DE IRRIGAÇÃO COMO MEDIDA PARA REDUÇÃO DA RESISTÊNCIA
À PENETRAÇÃO DO SOLO**

PROD. TEC. ITV DS-N018/2020

DOI: 10.29223/PROD.TEC.ITV.DS.2020.18.Fonseca

PRODUÇÃO TÉCNICA ITV DS

PONDERAÇÃO SOBRE AS POSSÍVEIS IMPLICAÇÕES DA PRÁTICA DE IRRIGAÇÃO COMO MEDIDA PARA REDUÇÃO DA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DO SOLO

Bernardo Villani Corrêa Fonseca

Sílvio Junio Ramos

Rafael Silva Guedes

Cecílio Frois Caldeira

Markus Gastauer

Belém / PA

Maio / 2020

Título: Ponderação sobre as possíveis implicações da prática de irrigação como medida para redução da resistência à penetração do solo	
PROD. TEC. ITV DS - N018/2020	Revisão
Classificação: () Confidencial () Restrita () Uso Interno (x) Pública	00

Informações Confidenciais - Informações estratégicas para o Instituto e sua Mantenedora. Seu manuseio é restrito a usuários previamente autorizados pelo Gestor da Informação.

Informações Restritas - Informação cujo conhecimento, manuseio e controle de acesso devem estar limitados a um grupo restrito de empregados que necessitam utilizá-la para exercer suas atividades profissionais.

Informações de Uso Interno - São informações destinadas à utilização interna por empregados e prestadores de serviço

Informações Públicas - Informações que podem ser distribuídas ao público externo, o que, usualmente, é feito através dos canais corporativos apropriados

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

F676 Fonseca, Bernardo Villani Corrêa.

Ponderação sobre as possíveis implicações da prática de irrigação como medida para redução da resistência à penetração do solo / Bernardo Villani Corrêa Fonseca ... [et al]. - Belém-PA, 2020.
11 f.

1. Resistência à penetração do solo. 2. Irrigação em taludes. 3. Estabilidade geotécnica. I. Ramos, Sílvio Junio. II. Guedes, Rafael Silva. III. Caldeira, Cecílio Frois. IV. Gastauer, Markus. V. Título.

CDD.23 ed. 622.34098115

Bibliotecário(a) responsável :Nisa Gonçalves CRB-2: 525

RESUMO

Análises realizadas em amostras de solo coletadas no Complexo Minerador de Carajás indicaram que a resistência à penetração do solo alterou ao longo do ano, reduzindo significativamente no período chuvoso. A resistência à penetração do solo é um atributo físico que se configura como um importante obstáculo ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas utilizadas nos serviços de revegetação de taludes. A constatação de que a resistência à penetração do solo reduz nos períodos de maior ocorrência de precipitações pluviométricas sugere que, para apoio e maior sucesso nos resultados da revegetação de taludes, sejam adotadas práticas de irrigação durante os períodos de seca. Entretanto, a saturação do solo em taludes e encostas pode influenciar outros parâmetros físicos, que podem prejudicar a estabilidade geotécnica. Esta pesquisa apresenta, com base em dados secundários, uma ponderação sobre a influência da água sobre a estabilidade de taludes, fato que deve ser levado em consideração caso seja tomada a decisão de se implementar práticas de irrigação como medida de aceleração do processo de recobrimento vegetal em taludes de mineração. Além disso, avalia a implementação de sistemas automáticos de monitoramento meteorológico e da umidade do solo como ferramenta para possibilitar a redução da resistência à penetração do solo, para favorecer o recobrimento vegetal, de modo a não prejudicar a condição de estabilidade geotécnica dos taludes.

Palavras chave: Resistência à penetração do solo. Irrigação em taludes. Estabilidade geotécnica.

ABSTRACT

Analyzes carried out on soil samples collected in the Complexo Minerador de Carajás indicated that the resistance to soil penetration changed throughout the year, reducing significantly in the rainy season. Resistance to soil penetration is a physical attribute that is configured as an important obstacle to the development of the root system of plants used in slope revegetation services. The finding that resistance to soil penetration reduces during periods of higher rainfall, suggests that, for support and greater success in the results of slope revegetation, irrigation practices should be adopted during periods of drought. However, soil saturation on slopes and slopes can influence other physical parameters, which can impair geotechnical stability. This research presents, based on secondary data, a consideration of the influence of water on the stability of slopes, a fact that should be taken into consideration if the decision is taken to implement irrigation practices as a measure to accelerate the process of vegetation recovery on mining slopes. In addition, it evaluates the implementation of automatic systems for monitoring meteorological and soil moisture as a tool to make it possible to reduce resistance to soil penetration, to favor plant cover, so as not to affect the slopes geotechnical stability parameters.

Keywords: Resistance to soil penetration. Slope irrigation. Geotechnical stability.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	5
2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	5
3	DISCUSSÃO.....	5
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	9
	REFERÊNCIAS.....	11

1 INTRODUÇÃO

Os estudos de campo realizados nas áreas operacionais da Província Mineral de Carajás, apresentados no Apêndice A indicaram que a resistência à penetração do solo observada em taludes nas cavas de N5W e N4E reduziu significativamente nas análises realizadas durante a estação chuvosa.

Em termos práticos, essa constatação sugere que manter alguma medida de irrigação nos taludes de corte em cavas durante a estação seca, em teoria, contribuiria para menores índices de resistência à penetração pelas raízes, favorecendo o desenvolvimento e o recobrimento vegetal.

O correto suprimento de fertilizantes e de água sobremaneira contribui para o desenvolvimento das plantas, importante para que seja viável o recobrimento das faces dos taludes.

Entretanto, do ponto de vista de atributos físicos do solo, há que se considerar a influência da aplicação de água por meio de irrigação na estabilidade geotécnica dos taludes.

Este Apêndice apresenta uma revisão bibliográfica e uma discussão a respeito da influência do peso de água eventualmente aplicada em caráter de irrigação para recobrimento vegetal na estabilidade de taludes e encostas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento desta etapa, foram realizadas consultas a diversos trabalhos publicados em periódicos nacionais e internacionais, revistas científicas, livros e outros trabalhos semelhantes disponíveis na internet, afim de se levantar dados secundários e discorrer sobre o tema.

3 DISCUSSÃO

É indiscutível a importância da vegetação para recobrimento da face dos taludes conformados, para a recuperação de áreas degradadas.

A parte aérea das plantas contribui para interceptar e evaporar a precipitação, reduzindo a quantidade de água infiltrada no solo (COPPIN; RICHARDS, 1990). Além disso, indicam que o sistema radicular retira umidade, reduzindo a poro-pressão da água, e aumenta a rugosidade superficial do solo, minimizando o carreamento superficial de sedimentos.

O sistema radicular (ou reforçamento radicular) das plantas pode influenciar na estabilidade de taludes, especialmente por meio da variação dos parâmetros geotécnicos relativos à resistência ao cisalhamento do solo (COUTO *et al.*, 2010).

As fibras do sistema radicular da vegetação contribuem para o reforçamento dos solos através do incremento do parâmetro coesão aparente, que corresponde ao aumento da agregação e melhor estruturação das partículas do solo (GRAY; SOTIR, 1997). Ainda segundo os autores, a coesão aparente proporcionada pelas fibras radiculares pode fazer uma diferença significativa na resistência a deslizamentos superficiais ou em movimentações por cisalhamento.

As raízes das espécies vegetais contribuem para o incremento significativo da coesão aparente do solo, promovendo o ancoramento de grandes massas de solo (COELHO, 1999).

Uma maior concentração de raízes de menor diâmetro é mais eficaz do que um número menor raízes de maior diâmetro para o aumento da resistência ao cisalhamento de massas de solos permeadas por raízes (GREENWAY, 1987), e este aumento de resistência será diretamente proporcional à profundidade explorada pelas raízes. A ação mais eficiente neste aumento da resistência é verificada quando as raízes penetram ao longo do manto de solo até fraturas ou fissuras presentes na camada de rocha-matriz ou em zonas de transição onde a densidade e a resistência do solo ao cisalhamento aumentem com a profundidade. Atingindo esses pontos, as raízes se fixam, promovendo a transferência de forças de zonas de menor resistência ao cisalhamento para zonas de maior resistência ao cisalhamento.

Entretanto, há que se considerar que a função de melhoria das propriedades físicas do solo proporcionada pelas plantas somente se consolida a partir do momento em que o sistema radicular já estiver desenvolvido. Durante o período de germinação e desenvolvimento inicial das plantas, o solo ou substrato permanecem com suas propriedades físicas originais.

Nesse sentido, é relevante ponderar se eventuais serviços de irrigação em taludes durante o período de seca, que certamente contribuirão para o desenvolvimento e recobrimento vegetal, podem afetar parâmetros físicos do solo que influenciam sua estabilidade.

Vários artigos abordam a temática relacionada à influência da água sobre a estabilidade dos taludes, porém o foco principal dos mesmos é em relação às águas pluviais. Artigos específicos sobre a influência da infiltração de água de irrigação sobre face de taludes em processos de revegetação não foram identificados.

A infiltração pode ser entendida como a água que penetra nos poros do solo, podendo ser desencadeada por chuvas (precipitação), irrigação ou de formação de lâmina sobre a superfície (SANTOS, 2004). A infiltração pode causar os seguintes efeitos em um solo não saturado: a redução da coesão (coesão aparente), o aumento da condutividade hidráulica do solo e o aumento do peso específico do solo.

As ações das precipitações nos taludes são as seguintes: alteração dos parâmetros de resistência dos materiais, diminuição da coesão aparente, diminuição da sucção, dissolução da cimentação; aumento da sollicitação externa; aumento do peso específico dos materiais que formam o talude; avanço da frente de saturação no maciço, provocando o desenvolvimento de pressões neutras positivas nos solos, supressões nas discontinuidades rochosas e forças de percolação; e alteração do perfil da encosta por erosão de materiais (ZANARDO, 2014).

A alteração dos parâmetros e propriedades do solo, especialmente em taludes, pode afetar sua estabilidade causando escorregamentos ou rupturas.

Escorregamentos são movimentos de massa, geralmente rápidos e com volumes bem definidos, onde o centro de gravidade é deslocado para baixo e para fora do talude. A velocidade de avanço de um escorregamento cresce mais ou menos rapidamente, de quase zero a pelo menos 0,30 m por hora (TERZAGHI, 1950). Velocidades maiores também podem ser atingidas.

A condições geológicas, geomorfológicas e a intervenções antrópicas são os principais fatores que influenciam a ocorrência de deslizamentos. Destaca também que além desses fatores, a precipitação pluviométrica (incidência de água sobre o substrato) é considerada um estímulo que pode provocar a mobilização dos materiais constituintes de uma encosta, seja pelo aumento rápido dos esforços ou pela redução da resistência ao cisalhamento (MUÑOZ-HOYOS, 2014).

Condições hidroclimáticas são fatores determinantes para a ocorrência de deslizamentos (ARISTIZÁBAL, 2007). A maior parte dos deslizamentos em encostas e taludes ocorre nos meses com maior precipitação pluviométrica, indicando que esses fenômenos estão diretamente relacionados com a quantidade de água nas camadas superficiais do solo.

Para a ocorrência de um escorregamento é necessário que a relação entre resistência média ao cisalhamento do solo e as tensões médias na superfície potencial de movimentação decresçam de tal forma a serem menor que 1, de tal forma que as tensões na superfície sejam maiores que a resistência ao cisalhamento (GUIDICINI; NIEBLE, 1983)

Porém para que ocorra a ruptura é necessário que haja uma diminuição da resistência ao cisalhamento do material, que pode ser explicada pelo intemperismo, diminuição da coesão do material e aumento da pressão hidrostática (TERZAGHI, 1950).

Existem diversos métodos de cálculo para avaliação da estabilidade de taludes, as quais envolvem equações que levam em consideração diversos parâmetros físicos do solo (MUÑOZ-HOYOS, 2014).

No âmbito da mineração, a que se refere o presente trabalho, é grande a preocupação com relação à ocorrência de escorregamentos ou ruptura de taludes.

Uma ruptura de talude em uma mina, pode causar consequências que englobam segurança, fatores sociais, econômicos e ambientais (ZANARDO, 2014). Dentre as consequências estão perdas de vidas ou invalidez, danos econômicos para os trabalhadores, perda de credibilidade da corporação tanto da parte de acionistas como da sociedade em geral, perda de equipamentos, custos adicionais com limpeza, interrupção das operações, perda de minério entre outros prejuízos, reforçando assim a necessidade de uma atenção especial para uma análise de estabilidade confiável para que tais riscos sejam evitados.

Nesse sentido, a busca por medidas de monitoramento contínuo da condição hidroclimática em áreas com taludes de corte e de aterro em áreas de mineração se faz extremamente relevante.

Para tanto, em primeiro lugar há que se ressaltar a importância de que as condições meteorológicas sejam monitoradas. A instalação e operação de estações meteorológicas automáticas no entorno da área para monitoramento da ocorrência de

chuvas pode ser uma importante ferramenta não somente para a otimização dos serviços de irrigação de taludes, mas também para acompanhamento de chuvas intensas e tempestades que são considerados gatilhos para processos de instabilização geotécnica.

Em complemento, a instalação de sensores de umidade no solo pode ser outra estratégica ferramenta para minimizar o risco de saturação porventura proporcionada por serviços de irrigação em taludes. Sistemas de automação que vinculam os sensores de umidade à ativação do sistema de bombeamento e/ou início de aspersão e irrigação podem sobremaneira contribuir para que menores índices de resistência à penetração do solo sejam atingidos sem que a estabilidade geotécnica dos taludes seja afetada.

Cabe ressaltar que a implementação de sensores de umidade do solo é uma prática relativamente comum em cultivos agrícolas, como ferramenta de otimização de serviços de irrigação e aumento de produção. Face às especificidades topológicas, de elevado desnível e de características do substrato, é certo que para implementação sistemas automáticos de monitoramento de umidade do solo interligados a redes de irrigação em áreas de lavra de minério de ferro necessitam ser adequados. Entretanto, ainda que ajustes sejam necessários, a implementação de tal solução pode vir a ser considerada tecnicamente viável para ser adotada em áreas de mineração de ferro.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ainda que se pondere o fato de que a área objeto desta Dissertação se localiza na porção sudeste do Estado do Pará, em região de clima tropical onde elevados índices pluviométricos são registrados anualmente, há que se considerar que a adoção de irrigação em períodos de seca para aceleração do recobrimento vegetal torna-se necessária, mas deve ser conduzida com cautela, a fim de evitar a perda de solo e o deslocamento dos taludes em eventuais excessos de água.

As consultas à base bibliográfica demonstraram que de fato existe uma direta relação da presença de água sobre taludes e encostas com a ocorrência de deslizamentos e escorregamentos (incidentes geotécnicos).

Tendo em vista que o objetivo principal de uma eventual medida de irrigação em taludes é favorecer o crescimento vegetal e a permanência da vegetação no

período de seca, se faz necessário o desenvolvimento de novos experimentos, com a adoção de sistemas automáticos de monitoramento hidroclimático e de irrigação para que seja identificado um ponto “ótimo” de umidade do solo, de modo que favoreça o desenvolvimento radicular, minimizando a resistência à penetração do solo, mas sem afetar a estabilidade geotécnica dos taludes.

REFERÊNCIAS

- ARISTIZÁBAL, É. **SHIA Landslide**: Developing a physically based model to predict shallow landslides triggered by rainfall in tropical environments. PhD., Universidad Nacional de Colombia, Colombia, Medellín, 220 p. 2013
- COELHO, A. T. **Avaliação dos efeitos do recobrimento vegetativo nos processos erosivos laminares em talude de corte rodoviário, em Ribeirão das Neves/MG** . 1999. 198 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Recursos Hídricos e Meio Ambiente) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 1999.
- COPPIN, N. J.; RICHARDS, I. G. **Use of vegetation in civil engineering**. Sevenoaks, Kent: Butterworths, 1990. 305 p.
- COUTO *et al.* **Técnicas de Bioengenharia para revegetação de Taludes no Brasil** – Boletim Técnico CBCN n001. Viçosa/MG: Centro Brasileiro de Conservação da Natureza e Desenvolvimento Sustentável, 2010.
- GUIDICINE, Guido; NIEBLE, Carlos M. 1 Escavação 2. **Estabilização do solos**. 3. Taludes (Mecânica dos Solos). 2. ed. São Paulo: Blucher, 1983. 194 p.
- GRAY D. H.; SOTIR, R. B. **Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization - A practical guide for erosion control**. New York: Wiley, 1997. 377 p.
- GREENWAY, D. R. Vegetation and slope stability. *In*: Anderson, M.G.; Richards, K.S. (Eds). **Slope stability** . Chichester: Wiley, 1987. p. 37-39.
- MUÑOZ HOYOS, Estefanía. **Influência dos parâmetros hidrológicos e geotécnicos na estabilidade de taludes**. 2014. xviii, 107 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2014.
- SANTOS, C. R. dos. **Análise paramétrica da infiltração e sua influência na estabilidade de taludes em solo não saturado**. Escola de Engenharia de São Carlos, 2004.
- TERZAGHI, Karl. **Mecanismo dos Escorregamentos de Terra**. São Paulo: Grêmio Politécnico, 36 p. 1950.
- ZANARDO, B. **Análise de Estabilidade de Taludes de Escavação em Mina de Bauxita**. Poços de Caldas: Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL MG, 2014.