UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

MARIA PAULA PIRES DE OLIVEIRA

Caracterização geológico-geotécnica e propostas de
intervenções para estabilização de taludes na Boçoroca do
Córrego do Cravo - Nazareno/MG

São Carlos – SP

2015

MARIA PAULA PIRES DE OLIVEIRA

Caracterização geológico-geotécnica e propostas de intervenções
para estabilização de taludes na Boçoroca do Córrego do Cravo -
Nazareno/MG

Dissertação apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade
de São Paulo para obtenção do título de
Mestre em Ciências, Programa: Geotecnia.

Orientador: Prof. Titular Osni José Pejon

Versão corrigida

Original se encontra disponível na Unidade que aloja o Programa

São Carlos – SP

2015

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Oliveira, Maria Paula Pires de
048c Caracterização geológico-geotécnica e propostas de
 intervenções para estabilização de taludes na Boçoroca
 do Córrego do Cravo - Nazareno/MG / Maria Paula Pires
 de Oliveira; orientador Osni José Pejon. São Carlos,
 2015.

 Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
 e Área de Concentração em Geotecnia -- Escola de
 Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
 2015.

 1. Erosão hídrica. 2. Escorregamentos. 3. Boçoroca.
 4. Nazareno. 5. Bioengenharia de solos. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **MARIA PAULA PIRES DE OLIVEIRA.**

Título da dissertação: "Caracterização geológico-geotécnica e propostas de intervenções para estabilização de taludes na Boçoroca do Córrego do Cravo-Nazareno/MG".

Data da defesa: 28/05/2015

Comissão Julgadora:

Prof. Titular **Osni José Pejon (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Profa. Dra. **Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Associado **Reinaldo Lorandi**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:
Prof. Dr. **Edmundo Rogério Esquivel**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

Resultado:

Aprovada.

APROVADA

Aprovada

Dedico este trabalho aqueles que diaramente convivem com processos erosivos e ao Projeto Maria de Barro, por sua dedicação ao meio ambiente.

AGRADECIMENTOS

Foram muitas pessoas que contribuíram para o desenvolvimento desse trabalho. É difícil escrever em uma página toda a gratidão que sinto por aqueles que estiveram presentes e fizeram parte desse período.

Agradeço ao meu orientador pelo direcionamento, apoio, conversas e compreensão.

Ao Departamento de Geotecnia, professores, funcionários, técnicos, companheiros e amigos que conheci, pelos momentos compartilhados, atenção e disponibilidade. Todo auxílio que recebi foi muito importante para a realização desse trabalho.

A todos do Projeto Maria de Barro, pela atenção e carinho com que nos receberam.

Ao CNPq, pela bolsa concedida.

Ao Programa de Aperfeiçoamento de Ensino, pela oportunidade do estágio em docência, e a meu supervisor, alunos e demais monitoras das disciplinas acompanhadas, pelo aprendizado e troca durante o ano do estágio.

A todos aqueles que colaboraram com material, fornecimento de dados e ajuda nos trabalhos de campo e laboratório.

À minha família, meus pilares que me amparam e me dão força.

Aos meus amigos, que estão sempre presentes e deixam meus dias mais alegres.

Às madrinhas e padrinhos da Sol, pela atenção e cuidados essenciais nos momentos em que tive que me ausentar.

Aos profissionais de saúde que me ajudaram nos momentos de debilidade, de forma que eu pudesse trabalhar da melhor forma possível.

A todos que encontrei e reencontrei nesse período. Cada vez percebo mais como as pessoas sempre possuem algum papel em nossa vida, sempre aparecem no momento certo, com a troca e contribuição que precisamos para aquela ocasião.

RESUMO

OLIVEIRA, M. P. P. **Caracterização geológico-geotécnica e propostas de intervenções para estabilização de taludes na Boçoroca do Córrego do Cravo - Nazareno/MG.** 2015. 143p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos. 2015.

Processos erosivos podem gerar grandes prejuízos ambientais e econômicos. É importante que projetos de controle de erosão tenham uma abordagem holística, considerando aspectos econômicos, sociais, ecológicos e paisagísticos. A sub-bacia do Alto Rio Grande apresenta uma elevada incidência de boçorocas de grande porte. No município de Nazareno/MG, foi realizado um projeto de controle na Boçoroca do Córrego do Cravo, entretanto, após a finalização das obras, houve dois grandes escorregamentos na área. Realizou-se uma análise geológico-geotécnica da boçoroca a fim de se entender os motivos pelos quais ocorreram os escorregamentos e propor técnicas de bioengenharia de solos para a estabilização dos taludes. Foram realizadas campanhas de campos e ensaios laboratoriais com amostras de pontos com diferentes condições de estabilidade. Realizaram-se ensaios de determinação de massa específica, granulometria, limites de consistência, erodibilidade, adsorção de azul de metileno, ATD, ATG e DRX. Também se realizou um levantamento bibliográfico de técnicas de bioengenharia de solos para estabilização de taludes em boçorocas preferencialmente em condições similares às da área de estudo. A maior parte da feição erosiva consiste de uma camada de solo laterítico sobre um saprolito de gnaiss. O solo laterítico é majoritariamente argiloso com presença de caulinita e óxidos, que conferem resistência ao material. Já o saprolito é siltoso, friável e apresenta argilominerais mais ativos. O projeto realizado previamente utilizou técnicas de baixo custo e impacto ambiental e controlou o avanço da feição erosiva, entretanto, apresentou algumas carências quanto à estabilização dos taludes. Concluiu-se que os escorregamentos podem ter ocorrido devido à saturação do saprolito e consequente instabilização de todo o maciço. A alta declividade dos taludes e a presença de planos preferenciais de ruptura também podem ter contribuído para a ocorrência dos escorregamentos. Propôs-se o retaludamento das encostas e o uso de técnicas de bioengenharia de solos para a estabilização do solo e incremento da biodiversidade local.

Palavras-chave: Erosão hídrica; Escorregamentos; Boçoroca; Nazareno; Bioengenharia de Solos.

ABSTRACT

OLIVEIRA, M. P. P. Geological-geotechnical characterization and related intervention for slope stabilization in Córrego do Cravo Gully - Nazareno/MG. 2015. 143p. Dissertation (Master) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos. 2015.

Erosion can generate great environmental and economic losses. It is important that erosion control projects have a holistic approach, considering economic, social, ecological and landscape aspects. The Alto Rio Grande hydrographic basin presents a high incidence of large gullies. A control project was the done in Córrego do Cravo Gully, city of Nazareno/MG. However, after the completion of the works, there were two major landslides in the area. The geological and geotechnical analysis of the gully was accomplished in order to understand the reasons why the landslides occurred and to propose soil bioengineering techniques for slope stabilization. Field visits and laboratory tests on samples from places with different stability conditions were performed. The tests performed were density determination, grain size analysis, liquid limit, plastic limit, erodibility, methylene blue adsorption, DTA, TGA and XRD. It was also made a literature review of soil bioengineering techniques for slope stabilization in gullies preferably under similar conditions to the study area. Most of the studied gully consists of a laterite layer over a gneiss saprolite. The laterite soil is mostly clay with presence of kaolinite and oxides, which provide resistance to the material. The saprolite is silty, friable and presents more active clay minerals. The previous conducted project used low cost and low environment impacts techniques which contained the advance of erosion, however, it presented some deficiencies in slope stabilization. It was concluded that the landslides may have occurred due to saturation of the saprolite and consequent instability of the whole soil massif. The high declivity of the slopes and the presence of rupture surfaces may also have contributed to the occurrence of the landslides. It was proposed the change of the slope geometry and the use of soil bioengineering techniques for soil stabilization and increase of local biodiversity.

Keywords: Water erosion; Landslides; Gully; Nazareno; Soil Bioengineering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Escorregamento (a) translacional (b) rotacional	30
Figura 2 – Visão esquemática de diferentes ângulos de corte para três horizontes de um solo (Adaptado de ROCHA, 2003)	40
Figura 3 – Aumento de rugosidade entre planos devido a raízes (Adaptado de GRAY; SOTIR, 1996).....	41
Figura 4 – Variação de técnicas de Bioengenharia de Solos segundo a declividade do local (Adaptado de SAULI; CORNELINI; PRETI, 2005)	44
Figura 5 – Uso de Vetiver em boçoroca - Venezuela (LUQUE, R.; LUQUE, O.; POSADA, 2011).....	45
Figura 6 – Estacas vivas na implementação e após crescimento de raízes e ramos (STEINFELD et al., 2007).....	46
Figura 7 – Revitalização do solo com estacas vivas – Rio das Velhas, Santa Luzia/MG (COUTO et al., 2010).....	47
Figura 8 – Feixe vivo (Adaptado de USDA, 1992).....	49
Figura 9 – Elaboração de feixe vivo	49
Figura 10 – Exemplos de usos da camada de ramos	50
Figura 11 – Paliçadas utilizadas para estabilização de encostas (a) (CORNELINI; SAULI, 2005) (b) (FERRARI, 2008)	51
Figura 12 – Paliçadas em taludes de boçoroca – Sacavém/MA (BEZERRA, 2008)	52
Figura 13 – Implantação de geotêxteis de buriti em uma boçoroca de Sacavém/MA (BEZERRA, 2011)	53
Figura 14 – Proteção de taludes com biorrollos (BONTERRA IBERICA S.L., s.d.).....	55
Figura 15 – Localização do município de Nazareno-MG (FERREIRA et al, 2011).....	56
Figura 16 – Relevo, vegetação e uso do solo na região.....	57
Figura 17 – Contexto geológico próximo à área urbana de Nazareno/MG (SAMPAIO, 2014 adaptado de CODEMIG, 2013).....	58
Figura 18 – Gnaiss encontrado próximo à área de estudo	59
Figura 19 – Mapa de solos do município de Nazareno/MG (Adaptado de HORTA, 2006)	60
Figura 20 – Latossolo e saprolito expostos em erosão próxima à área de estudo	61
Figura 21 – Área urbana de Nazareno e Boçoroca do Córrego do Cravo (destaque em vermelho)	63
Figura 22 – Estrada de terra e áreas de cultivo próximas à cabeceira da Boçoroca do Córrego do Cravo	63
Figura 23 – Uso e ocupação da Bacia do Córrego do Cravo, Nazareno/MG (SAMPAIO, 2014)	64
Figura 24 – Vista da cidade de Nazareno a partir da Boçoroca do Córrego do Cravo.....	64

Figura 25 – Boçorocas existentes na região: a) Boçoroca observada da estrada que liga Nazareno a São João del Rei b) Boçoroca da Sapolândia c) Boçoroca da Copasa d) Boçoroca da Copasa com depósito de resíduos	65
Figura 26 – Bacia de captação de água (FERREIRA, s.d.)	68
Figura 27 – Exemplo de técnicas de retaludamento manual em boçoroca	68
Figura 28 – Exemplo de técnica de plantio de mudas (FERREIRA, s.d.)	69
Figura 29 – Canal de drenagem	70
Figura 30 – Sacos de ráfia utilizados na parte interna da boçoroca	70
Figura 31 – Retaludamento manual em talude da Boçoroca do Córrego do Cravo a) Quebra das cristas de talude a partir de degraus b) Degraus suavizados e novos degraus sendo feitos, a esquerda c) Talude suavizado	71
Figura 32 – Plantio de vegetação através de abertura de berços.....	72
Figura 33 – Intervenções no talude onde ocorreu o escorregamento translacional e talude contíguo	72
Figura 34 – Intervenções realizadas no talude onde ocorreu o escorregamento translacional: A - Paliçada B - Drenagem com sacos de ráfia C - Suavização manual do talude.....	72
Figura 35 – Boçoroca do Córrego do Cravo (a) Janeiro/2007 (b) Janeiro/2010 (c) Julho/2012 (d) Setembro/2012	73
Figura 36 – Boçoroca do Córrego do Cravo em Julho de 2013.....	74
Figura 37 – Escorregamentos translacional e rotacional (a) Julho/2012 (b) Setembro/2012 (c) Novembro/2012 (d) Julho/2013.....	74
Figura 38 – Medição das dimensões de um talude com o uso de topofil (centro da imagem) e trena (seta à direita da imagem).....	75
Figura 39 – Topofil empregado para auxiliar nas medições	75
Figura 40 – Medição de direção de bandamentos	75
Figura 41 – Vala aberta para amostragem na parte superior do escorregamento rotacional ...	76
Figura 42 – Amostras indeformadas para ensaios de (a) erodibilidade e (b) massa específica	77
Figura 43 – Coleta de amostra no topo do talude onde ocorreu o escorregamento translacional	77
Figura 44 – Amostras indeformadas para o ensaio de erodibilidade	78
Figura 45 – Amostras indeformadas coletadas em ponto próximo a um afundamento.....	78
Figura 46 – Localização dos pontos de coleta (a) escorregamento rotacional (b) escorregamento translacional (ao fundo) e talude adjacente (à esquerda)	79
Figura 47 – Pontos amostrados na Boçoroca do Córrego do Cravo	79
Figura 48 – Equipamento utilizado para ensaio de erodibilidade - absorção de água	81
Figura 49 – Ensaio de erodibilidade - perda de peso por imersão	82
Figura 50 – Influência da mineralogia das argilas sobre a adsorção de azul de metileno (LAUTRIN, 1987 apud PEJON, 1992)	86
Figura 51 – Diagrama da atividade das argilas pelo método do azul de metileno (LAUTRIN, 1989 apud PEJON, 1992)	87
Figura 52 – Solo laterítico e saprolito expostos em talude da boçoroca.....	88
Figura 53 – Talude da boçoroca em saprolito.....	88

Figura 54 – Taludes com problemas de estabilidade.....	89
Figura 55 – Corpos d’água (a) Canal interno (b) Área alagada	89
Figura 56 – Porção norte da boçoroca e afundamento observado no meio da vegetação	89
Figura 57 – Evolução em anfiteatro da boçoroca (escorregamento rotacional em destaque) ..	90
Figura 58 – Trincas na parte superior do talude onde ocorreu o escorregamento rotacional...	92
Figura 59 – Fendas de tração no topo do talude	92
Figura 60 – Análise granulométrica - Topo do talude onde ocorreu o escorregamento rotacional	94
Figura 61 – Limite de liquidez (Casagrande) - Topo do talude onde ocorreu o escorregamento rotacional	94
Figura 62 – ATD - Topo do talude onde ocorreu o escorregamento rotacional.....	94
Figura 63 – Bandamento no saprolito da base do talude rotacional.....	95
Figura 64 – Análise granulométrica - Base do talude onde ocorreu o escorregamento rotacional	97
Figura 65 – Limite de liquidez (Casagrande) - Base do talude onde ocorreu o escorregamento rotacional	97
Figura 66 – ATD - Base do talude onde ocorreu o escorregamento rotacional	97
Figura 67 – DRX - Base do talude onde ocorreu o escorregamento rotacional. Tratamentos: (a) Natural (b) Etilenoglicol (c) 550°C.....	98
Figura 68 – Análise granulométrica - Material mobilizado no escorregamento rotacional ...	100
Figura 69 – Limite de liquidez (Casagrande) - Material mobilizado no escorregamento rotacional	100
Figura 70 – (a) ATD e (b) ATG - Material mobilizado no escorregamento rotacional	101
Figura 71 – DRX do material mobilizado no escorregamento rotacional. Tratamentos: (a) Natural (b) Etilenoglicol (c) 550°C.	102
Figura 72 – Possível processo de como ocorre o escorregamento rotacional	104
Figura 73 – Material observado no escorregamento translacional	104
Figura 74 – Análise granulométrica - Topo do escorregamento translacional.....	107
Figura 75 – Limite de liquidez (Casagrande) - Topo do escorregamento translacional.....	107
Figura 76 – ATD - Topo do escorregamento translacional	107
Figura 77 – Análise granulométrica – Saprolito do talude onde ocorreu o escorregamento translacional	109
Figura 78 – Limite de liquidez (Casagrande) - Saprolito do talude onde ocorreu o escorregamento translacional	109
Figura 79 – ATD - Saprolito do talude onde ocorreu o escorregamento translacional	109
Figura 80 – Análise granulométrica – Material mobilizado no escorregamento translacional	111
Figura 81 – Limite de liquidez (Casagrande) - Material mobilizado no escorregamento translacional	111
Figura 82 – (a) ATD e (b) ATG - Material mobilizado no escorregamento translacional.....	112
Figura 83 – DRX - Material mobilizado no escorregamento translacional. Tratamentos: (a) Natural (b) Etilenoglicol (c) 550°C	113
Figura 84 – Possível processo de como ocorre o escorregamento translacional.....	114

Figura 85 – Taludes com foliações	116
Figura 86 – Talco-xisto presente na parte superior do talude adjacente ao escorregamento translacional.....	116
Figura 87 – Alinhamento de blocos de quartzo	117
Figura 88 – Análise granulométrica - Topo do talude estável	118
Figura 89 – Limite de liquidez (Casagrande) - Topo do talude estável.....	118
Figura 90 – ATD - Topo do talude estável	118
Figura 91 – Saprolito, talco-xisto e blocos de quartzo observados na base do talude.....	119
Figura 92 – Curva granulométrica - Base do talude estável	120
Figura 93 – Limite de liquidez (Casagrande) - Base do talude estável.....	120
Figura 94 – (a) ATD (b) ATG – Base do talude estável	121
Figura 95 – DRX - Base do talude estável com diferentes tratamentos: (a) Natural (b) Etilenoglicol (c) 550°C.....	122
Figura 96 – Afundamentos observados ao longo da boçoroca	124
Figura 97 – Afundamento adjacente ao ponto analisado	124
Figura 98 – Materiais analisados próximo a afundamento (a) BCO (b) RS (c) RX	125
Figura 99 – Bandamentos no material RX.....	125
Figura 100 – Análise granulométrica - Materiais coletados próximos a erosão subsuperficial	128
Figura 101 – Limite de liquidez (Casagrande) - Materiais coletados próximos à erosão subsuperficial.....	128
Figura 102 – ATD - Materiais coletados próximos a erosão subsuperficial.....	128
Figura 103 – Possível processo de como ocorre a evolução dos afundamentos.....	129
Figura 104 – Proposta de intervenção no talude onde ocorreu o escorregamento rotacional	133
Figura 105 – Proposta de intervenção no talude onde ocorreu o escorregamento translacional	134

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Agentes condicionantes e deflagradores de movimentos de massa	32
Quadro 2 – Efeitos da vegetação na estabilidade do solo (adaptado de SAULI; CORNELINI; PRETI, 2005)	42
Quadro 3 – Vantagens e desvantagens das técnicas de bioengenharia de solos.....	43
Quadro 4 – Amostras coletadas para ensaios de laboratório	80
Quadro 5 – Intervalos de CTC (BEALIEU, 1979 apud PEJON, 1992)	84
Quadro 6 – Intervalos de CTC e SE (RESENDE ET AL, 1997)	85
Quadro 7 – Caracterização descritiva do talude onde ocorreu o escorregamento rotacional...	91
Quadro 8 – Caracterização laboratorial do solo laterítico encontrado no topo do talude onde ocorreu o escorregamento rotacional	93
Quadro 9 – Caracterização laboratorial do saprolito presente na base do talude onde ocorreu o escorregamento rotacional.....	96
Quadro 10 – Caracterização laboratorial do material mobilizado no escorregamento rotacional	99
Quadro 11 – Caracterização descritiva do talude onde ocorreu o escorregamento translacional	105
Quadro 12 – Caracterização laboratorial do material presente do topo do escorregamento translacional	106
Quadro 13 – Caracterização laboratorial do saprolito do talude onde ocorreu o escorregamento translacional	108
Quadro 14 – Caracterização laboratorial do material mobilizado no escorregamento translacional	110
Quadro 15 – Caracterização descritiva de talude estável adjacente ao escorregamento translacional	115
Quadro 16 – Caracterização laboratorial do topo do talude estável	117
Quadro 17 – Caracterização laboratorial da base do talude estável	119
Quadro 18 – Caracterização descritiva de ponto próximo à erosão subsuperficial	126
Quadro 19 – Caracterização laboratorial dos materiais coletados próximo a erosão subsuperficial	127

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

Acb	Atividade da fração argila
ATD	Análise Térmica Diferencial
ATG	Análise Térmica Gravimétrica
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
CTC _{arg}	Capacidade de Troca Catiônica da fração argila
c	Coesão
DRX	Difração de Raio-X
e	Índices de vazios
E	Índice de Erodibilidade
IP	Índice de Plasticidade
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
n	Porosidade
SE	Superfície específica
Sr	Grau de saturação
Vb	Valor de azul de metileno
ρ_d	Massa específica seca
ρ_s	Massa específica dos sólidos

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	25
2.	OBJETIVOS.....	27
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	28
3.1	Processos erosivos.....	28
3.2	Movimentos de massa.....	29
3.3	Estabilidade de taludes.....	30
3.3.1	Evolução de boçorocas e estabilidade de taludes.....	35
3.4	Influência de solos lateríticos e saprolitos de gnaiss em processos erosivos e movimentos de massa.....	36
3.5	Estabilização de taludes em boçorocas.....	38
3.6	O papel da vegetação na estabilização de processos erosivos e movimentos de massa.....	40
3.7	Bioengenharia de solos.....	42
3.8	Técnicas de bioengenharia de solos com potencial de aplicação em taludes de boçorocas.....	44
4	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	56
5	MATERIAIS E MÉTODOS.....	75
5.1	Campanhas de campo.....	75
5.2	Amostragem.....	76
5.3	Ensaio de laboratório.....	81
5.3.1	Ensaio geotécnicos.....	81
5.3.2	Ensaio mineralógicos.....	83
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	88
6.1	Caracterização da boçoroca.....	88
6.1.1	Talude com escorregamento rotacional.....	90
6.1.2	Talude com escorregamento translacional.....	104
6.1.3	Áreas sem escorregamentos.....	114
6.1.3.1	Talude estável adjacente ao escorregamento translacional.....	114
6.1.3.2	Materiais próximos a alicerces.....	123
6.2	Considerações sobre as primeiras intervenções realizadas para estabilização dos taludes.....	130
6.3	Sugestões de intervenções com técnicas de bioengenharia de solos.....	132
7	CONCLUSÕES.....	136
8	RECOMENDAÇÕES.....	137
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	138

1. INTRODUÇÃO

Os processos erosivos geram grandes prejuízos para a sociedade devido à perda de solos agricultáveis, danificação de infraestruturas e de áreas urbanas e assoreamento de corpos hídricos. Dentre os tipos de processos erosivos, as boçorocas são as formas mais severas de degradação do solo (SÃO PAULO, 1989).

Apesar da predisposição e suscetibilidade de alguns lugares para o desenvolvimento de boçorocas, geralmente seu processo de formação está intimamente ligado ao uso indevido do solo. Dessa forma, é de grande importância a revisão das práticas de manejo de solo atualmente vigentes e a implementação de ações preventivas e corretivas de combate à erosão. Tais medidas, devem levar em consideração a capacidade de uso das terras, a adoção de práticas conservacionistas adequadas, o planejamento da ocupação urbana e os devidos cuidados em obras de infraestrutura (SÃO PAULO, 1989).

O controle dessas feições envolve principalmente medidas de isolamento da área, controle de drenagem e estabilização de taludes. Nos métodos tradicionais, alguns aspectos ecológicos, paisagísticos e sociais podem ser eventualmente negligenciados. Entretanto, é de extrema importância a adoção de estratégias de recuperação que tenham uma abordagem holística, embasadas nas características e na funcionalidade ecológica do local, e que considerem o envolvimento da população, que passa a entender melhor o significado e a importância da conservação do solo. Projetos de recuperação que utilizam técnicas mais naturais, como a bioengenharia de solos, possibilitam atender os aspectos mencionados, além de, geralmente, serem mais simples e de menor custo que as técnicas tradicionais.

A sub-bacia do Alto Rio Grande é uma região com altos índices de processos erosivos e assoreamento de rios, agravados pela existência de boçorocas de grande porte. O município de Nazareno/MG está entre os que sofrem com a ocorrência de um número elevado de boçorocas que afetam áreas naturais, agrícolas e urbanas (FERREIRA et al, 2011). A boçoroca analisada neste trabalho é a do Córrego do Cravo, localizada neste município. Seu projeto de recuperação foi realizado em 2009, no entanto, em janeiro de 2012, ocorreram grandes escorregamentos na área, comprometendo sua estabilização.

Com o apoio do Projeto Maria Barro, responsável pela recuperação da Boçoroca do Córrego do Cravo, o presente trabalho realizou uma análise geológico-geotécnica da boçoroca a fim de se entender os motivos pelos quais ocorreram os escorregamentos. Além disso, foram levantadas técnicas de bioengenharia de solos que podem ser utilizadas na estabilização dos taludes da boçoroca. O trabalho foi realizado em parceria com Sampaio (2014), que apresentou propostas de macrodrenagem para a boçoroca, e visa contribuir com os projetos realizados na região.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa foi analisar os aspectos geológico-geotécnicos associados aos escorregamentos existentes na Boçoroca do Córrego do Cravo para propor, frente às características estudadas, alternativas para sua recuperação. Para isso, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- Caracterizar a Boçoroca do Córrego do Cravo;
- Analisar o projeto de recuperação realizado;
- Levantar técnicas de bioengenharia de solos que podem ser empregadas na estabilização de taludes de boçorocas;
- Propor alternativas que melhorem a eficiência na estabilização dos taludes da boçoroca.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Processos erosivos

Bigarella, Becker e Santos (2007b) relacionam o termo erosão ao desgaste da superfície do terreno decorrente da remoção e transporte de grãos minerais, através da fragmentação mecânica ou decomposição química das rochas, ou ainda pela remoção superficial e subsuperficial de produtos do intemperismo. Tal processo se dá pela ação da água ou do vento (KELLEY, 1990).

A erodibilidade do solo, ou seja, sua suscetibilidade à erosão, depende da declividade do terreno, condições climáticas, uso do solo, vegetação e características do solo, tais como capacidade de infiltração, coesão, conteúdo orgânico, textura e teor de umidade (ARAUJO; ALMEIDA; GUERRA, 2010; BIGARELLA; BECKER; SANTOS, 2007b).

A erosão acelerada é a forma de degradação do solo mais severa, sendo o desmatamento, a lavoura e a pastagem intensiva exemplos de fatores que deixam o solo altamente vulnerável a este processo (FAO, 2012).

No caso da erosão hídrica, a remoção e o transporte das partículas pode se dar pelo salpicamento do solo devido às gotas da chuva ou pelo escoamento da água (BIGARELLA; BECKER; SANTOS, 2007b). Este processo pode se manifestar de diferentes maneiras, sendo as principais a erosão subsuperficial, a erosão laminar e a erosão linear.

Na erosão subsuperficial, também conhecida como *piping*, ocorre a remoção do solo pela surgência da água subterrânea. Neste caso, a formação de dutos ocorre porque a força da água é maior que a força de coesão do solo (ARAUJO; ALMEIDA; GUERRA, 2010).

A erosão laminar é a remoção progressiva de finas camadas superficiais do solo através do escoamento superficial não concentrado (BIGARELLA; BECKER; SANTOS, 2007b, INFANTI JUNIOR; FORNASARI FILHO, 1998).

Já a erosão linear ocorre devido a um fluxo superficial concentrado, gerando feições erosivas de maiores profundidades. Existem três tipos principais de erosão linear: sulcos, ravinas e boçorocas (INFANTI JUNIOR; FORNASARI FILHO, 1998).

Nas irregularidades do terreno o escoamento de água se concentra e forma ranhuras na superfície. As ranhuras podem se desenvolver em sulcos, que possuem profundidade suficiente para tornar o escoamento turbulento e a velocidade capaz de transportar partículas maiores. O aprofundamento do sulco acarreta em um transporte cada vez maior de sedimentos e no solapamento das paredes, provocando seu alargamento (BIGARELLA; BECKER; SANTOS, 2007b). Ao atingir horizontes inferiores do solo os sulcos podem evoluir para ravinas (INFANTI JUNIOR; FORNASARI FILHO, 1998).

As ravinas são canais pequenos, mas relativamente profundos. Podem originar-se a partir de ranhuras, sulcos, valas, erosão subsuperficial e atividade antrópica não conservacionista. Seu desenvolvimento ocorre a partir do solapamento de suas paredes e cabeceira devido ao fluxo hídrico (BIGARELLA; BECKER; SANTOS, 2007b).

As boçorocas, também chamadas de voçorocas, são ravinamentos acelerados. Apresentam grandes dimensões e o agravante de terem atingido o lençol freático, o que intensifica ainda mais o processo erosivo. Geralmente as boçorocas são bastante ramificadas, com paredes íngremes e abruptas. Sua origem pode ser natural, mas costumam se relacionar intimamente com desequilíbrios hidrológicos causados por ações antrópicas (BIGARELLA; BECKER; SANTOS, 2007b; INFANTI JUNIOR; FORNASARI FILHO, 1998).

3.2 Movimentos de massa

Os movimentos de massa consistem no transporte de materiais encosta abaixo devido ao efeito da gravidade (BIGARELLA; BECKER; SANTOS, 2007b). Segundo Bigarella, Becker e Santos (2007b), a classificação dos tipos de movimentos de massa é difícil e, por isso, a definição dos termos encontrada na literatura não é uniforme e muitas vezes imprecisa. De uma maneira geral, os movimentos de massa são descritos principalmente segundo o tipo de movimento e o material transportado.

Os principais tipos de movimentos de massa são os rastejos, quedas, corridas e escorregamentos. Os rastejos consistem em um movimento lento e contínuo, com superfície de ruptura não definida. As quedas são movimentos de blocos rochosos em queda livre. Já as corridas são movimentos de grande quantidade de solos, rochas e água que ocorrem em um escoamento de velocidade muito elevada (ARAÚJO; ALMEIDA; GUERRA, 2010; INFANTI JUNIOR; FORNASARI FILHO, 1998).

Os escorregamentos são movimentos de massa rápidos que podem ser diferenciados de acordo com sua geometria e tipo de material que instabilizam. Os escorregamentos translacionais ocorrem em solos superficiais ou em solos e rochas que se movimentam sobre uma superfície plana, geralmente preexistente e condicionada a alguma estrutura do substrato (Figura 1a). Os escorregamentos rotacionais ocorrem em solos mais espessos, principalmente em solos argilosos saturados, ou em rochas muito fraturadas, e apresentam superfície de escorregamento curva (Figura 1b). Os escorregamentos em cunha são condicionados por descontinuidades no maciço rochoso e ocorre a abertura de fendas e separação de blocos (BIGARELLA; BECKER; SANTOS, 2007b; GUIDICINI; NIEBLE, 1976; INFANTI JUNIOR; FORNASARI FILHO, 1998).

Figura 1 – Escorregamento (a) translacional (b) rotacional

3.3 Estabilidade de taludes

Tanto os processos erosivos quanto os movimentos de massa envolvem uma interação de forças na qual ocorrem variações de tensões no solo. O equilíbrio de forças depende de duas componentes: a solicitante, que origina o movimento, e a resistente (BIGARELLA; BECKER; SANTOS, 2007b).

A relação entre essas componentes é expressa pelo Fator de Segurança (F), definido como a razão entre a resistência de uma unidade de solo ao cisalhamento ao longo de um plano de deslizamento e os esforços solicitantes que atuam nesse plano (GUIDICINI; NIEBLE, 1976; MORGAN; RICKSON, 1995):

$$F = \frac{R}{S}$$

Em que R representa a resistência ao cisalhamento e S o peso da unidade de solo e as cargas nela aplicadas.

A força que origina o escorregamento é a força peso, paralela ao plano. A tensão normal é a força normal aplicada em uma determinada unidade de área. Assim, a tensão solicitante, ou cisalhante, aumenta segundo a tensão normal (BIGARELLA; BECKER; SANTOS, 2007b; GUIDICINI; NIEBLE, 1976).

Já a força resistente é o atrito entre a unidade do solo e o plano de deslizamento. A resistência ao cisalhamento é a máxima tensão cisalhante que uma unidade de solo suporta sem sofrer ruptura, ou seja, a ruptura ocorre quando as tensões solicitantes são superiores que a resistência ao cisalhamento em um determinado plano (BIGARELLA; BECKER; SANTOS, 2007b; CRAIG, 2004).

A relação entre as duas tensões atuantes costuma ser expressa pelo critério de Mohr-Coulomb:

$$\tau = c + \sigma \times tg\varphi$$

Em que:

τ : Resistência ao cisalhamento

c : Coesão

σ : Tensão normal

φ : Ângulo de atrito

Quando o plano inclinado apresenta um ângulo menor que o de atrito, o maciço encontra-se estável. Por outro lado, quanto maior a inclinação do plano, maior a instabilidade apresentada pelo maciço (BIGARELLA; BECKER; SANTOS, 2007b).

Agentes e causas de movimentos de massa

Cada maciço possui uma propensão maior ou menor para a ruptura, a qual depende de aspectos condicionantes, ou agentes predisponentes, que são as características intrínsecas do maciço que favorecem o movimento de massa. Já os agentes efetivos, ou deflagradores, são aqueles diretamente responsáveis pelo desencadeamento do movimento de massa. O Quadro 1 apresenta alguns agentes condicionantes e deflagradores de movimentos de massa (ARAUJO; ALMEIDA; GUERRA, 2010; BIGARELLA; BECKER; SANTOS, 2007b; DURLO; SUTILI, 2005; GUIDICINI; NIEBLE, 1976).

Agentes condicionantes	Agentes deflagradores
Complexo geológico <ul style="list-style-type: none"> • Natureza petrográfica • Manto de intemperismo • Estruturas geológicas • Formas estratigráficas Complexo morfológico <ul style="list-style-type: none"> • Forma de relevo • Inclinação superficial Complexo climático-hidrológico <ul style="list-style-type: none"> • Clima • Regime de chuvas • Escoamento subterrâneo Gravidade Calor solar Tipo de vegetação	Pluviosidade Processos erosivos Terremotos Variação de temperatura Dissolução química Remoção da cobertura vegetal Mudança na geometria do talude Concentração de esforços Remoção de apoio lateral Condições de drenagem Umedecimento repentino do solo <i>Piping</i> Diminuição da resistência dos materiais devido ao intemperismo Lixiviação Lavagem de materiais cimentantes Expansão de argilominerais

Quadro 1 – Agentes condicionantes e deflagradores de movimentos de massa

As causas dos movimentos de massa podem ser separadas em internas, externas ou intermediárias e referem-se ao modo de atuação de um determinado agente. As causas internas levam o talude ao colapso sem que ocorram alterações em suas condições geométricas e são resultado da diminuição da resistência interna do maciço, como aumento da pressão hidrostática e diminuição da coesão e do ângulo de atrito interno devido à alteração do material. Já as causas externas aumentam as tensões de cisalhamento atuantes no maciço, sem que haja redução da resistência do material, como por exemplo, aumento do declive do talude, deposição de material na porção superior do talude e vibrações. Por fim, as causas intermediárias são aquelas relacionadas aos efeitos causados por agentes externos no interior do talude, tais como liquefação do material e erosão subsuperficial (GUIDICINI; NIEBLE, 1976).

Assim, os diferentes materiais e sua distribuição em um maciço, as condições de água subterrânea, a tipologia da ruptura e a configuração das descontinuidades são dados fundamentais para a avaliação da estabilidade de um talude (BIGARELLA; BECKER; SANTOS, 2007b).

Influência da água

O fluxo de água possui papel significativo na instabilização de um talude, visto que o aumento da umidade reduz a coesão do solo. Assim, é comum que em épocas de chuva ocorra uma intensificação de processos erosivos e movimentos de massa (GUIDICINI; NIEBLE, 1975; ROCHA, 2003).

Parte da água precipitada escoar superficialmente e parte infiltra no solo. Em épocas de maior precipitação, o aumento gradual da saturação do subsolo e da condutividade hidráulica acelera a frente de umedecimento no solo. O aumento da pressão hidrostática é insignificante se a água percola livremente, entretanto, ao encontrar uma barreira para o escoamento, o acúmulo da água gera um aumento de pressão e diminui a resistência ao cisalhamento nesse ponto. Além disso, caso a água entre nos planos de descontinuidade do maciço, as tensões solicitantes nesse ponto aumentam, o que também afeta a estabilidade da encosta (BIGARELLA; BECKER; SANTOS, 2007b; ROCHA, 2003).

A pressão do fluxo de água no solo é maior onde houver maior diferença de carga, dessa forma, na base do talude a velocidade e pressão do fluxo são maiores que no topo. A pressão nesse ponto pode provocar o carreamento de partículas do solo, provocando a erosão subsuperficial, processo com maior tendência de ocorrer em solos de baixa ou nenhuma coesão. Esse fator favorece a instabilização na base do talude, que pode entrar em colapso, e, conseqüentemente, levar ao solapamento do topo do talude (GUIDICINI; NIEBLE, 1976).

O aumento da saturação do solo também diminui a infiltração, de forma que quando a taxa de precipitação excede a de infiltração, a água começa a se acumular e o escoamento superficial se intensifica, aumentando, assim, o potencial erosivo (BIGARELLA; BECKER; SANTOS, 2007b; ROCHA, 2003).

A quantidade de água que percola o solo depende ainda da cobertura vegetal, devido à evapotranspiração da vegetação e à presença da serrapilheira (folhas e restos vegetais que cobrem o solo). A serrapilheira, de alta porosidade, absorve a água e retarda sua infiltração no solo. Além disso, mantém o solo úmido, de modo que em épocas de estiagem o protege da formação de rachaduras (BIGARELLA; BECKER; SANTOS, 2007b).

Influência do perfil de intemperismo

O perfil de intemperismo separa o manto de alteração em horizontes com diferentes propriedades e características de resistência e permeabilidade. Os horizontes podem ser classificados da seguinte forma (GUIDICINI; NIEBLE, 1976):

I – Solo residual:

Horizonte A: Camada superficial com presença de raízes e matéria orgânica. Zona onde ocorre lixiviação e eluviação.

Horizonte B: Camada em geral rica em argila e concentração de Fe, Al e Si. Nessa camada já não há estruturas herdadas da rocha de origem.

Horizonte C: Presença de estruturas herdadas da rocha de origem e material com textura siltosa e arenosa, frequentemente micácea e de baixa coesão. Também é chamado de saprolito.

II – Rocha alterada.

III – Rocha sã.

Quanto à influência das propriedades dos horizontes na resistência do solo, Rocha (2003) apresenta que a presença de matéria orgânica no horizonte A pode agir como um agregador do solo. Já o horizonte C, além da ausência de matéria orgânica, tende a ser mais siltoso, textura que dificulta a agregação do solo e diminui sua resistência ao cisalhamento. Igualmente, a permeabilidade do solo também varia no perfil de alteração, podendo apresentar valores diferentes em cada horizonte do solo.

Segundo Guidicini e Nieble (1976) é comum que movimentos de massa deixem expostos materiais de horizontes mais profundos, geralmente de granulação mais grosseira, baixa coesão e elevada permeabilidade, os quais passam a ser rapidamente erodidos, acentuando, assim, a instabilização das encostas.

Fendas de tração

As fendas de tração observadas no topo de taludes costumam ser indícios de instabilidade uma vez que podem ser geradas devido a pequenos movimentos de cisalhamento que ocorrem no interior do maciço terroso. Embora esses movimentos sejam de pequena dimensão, o efeito acumulado leva a um deslocamento mais expressivo na superfície do talude, gerando as fendas. Ou seja, uma vez que as fendas sejam visíveis na parte superior do talude, é possível admitir que no interior do maciço já ocorra um processo de ruptura. Dessa forma, esta é uma informação importante em análises de estabilidade e projetos de estabilização (GUIDICINI; NIEBLE, 1976).

3.3.1 Evolução de boçorocas e estabilidade de taludes

Guidicini e Nieble (1976) classificam as boçorocas como um tipo de movimento de massa complexo, o qual resulta da combinação de diferentes tipos de movimentos de massa e da ação simultânea ou sucessiva de diversos agentes e causas de instabilização.

A formação de boçorocas pode abranger vários fenômenos, tais como erosão superficial e subsuperficial e umedecimento e liquefação do solo, os quais desencadeiam o solapamento dos taludes, principal mecanismo pelo qual a boçoroca evolui e se alarga.

No caso do solapamento devido à erosão da parede do talude, o processo ocorre uma vez que os taludes ficam expostos a processos erosivos e, devido à diferença dos materiais entre topo e base, a parte inferior, mais friável, é removida mais rapidamente. Consequentemente, pode ocorrer uma ruptura segundo um plano de fraqueza que leva a um escorregamento envolvendo todo o talude. Quando há surgência de água nos taludes, esse processo é intensificado e acelerado. Com a ruptura, uma nova face do talude fica exposta a esse processo, que se repete continuamente. O material mobilizado é removido e transportado pelo escoamento superficial e levado a corpos d'água, gerando problemas de assoreamento a jusante (BIGARELLA; BECKER; SANTOS, 2007b; ROCHA, 2003; ROCHA et al., 2002).

As boçorocas tendem a se desenvolver em locais onde o horizonte C é mais espesso e o solum (horizontes A+B) é raso. A remoção da camada superior do solo deixa o horizonte C exposto, o qual é muito suscetível à erosão devido à sua baixa coesão. Devido à heterogeneidade das propriedades dos horizontes, o conhecimento do tipo de material existente em cada um é essencial para se compreender o processo de evolução de uma boçoroca (RESENDE¹, 1985 apud BIGARELLA; BECKER; SANTOS, 2007b, p. 930).

¹ RESENDE, M. Aplicações de conhecimentos pedológicos à conservação de solos. **Informe Agropecuário**. Belo Horizonte. 11 (128): 27-37. 1985.

3.4 Influência de solos lateríticos e saprolitos de gnaiss em processos erosivos e movimentos de massa

Solo laterítico

Segundo Bigarella, Becker e Santos (2007a), o termo ‘laterita’ não possui uma definição concreta, sendo empregado com diferentes sentidos. Em geral, corresponde a produtos de neoformação que contém hidróxidos de ferro e de alumínio como resultado do intemperismo de rochas cristalinas silicatadas. As formações costumam ter uma coloração avermelhada, morfologia endurecida e ser ricas em sesquióxidos de ferro, alumínio ou manganês.

Os solos ferruginosos e ferralíticos (lateríticos) se formam em regiões equatoriais, subequatoriais ou tropicais úmidas, ou seja, de clima quente e úmido, com precipitação anual maior que 800mm. Nesses locais, a ação do intemperismo sobre a rocha é intensa, havendo uma grande liberação de óxidos e sílica (BIGARELLA; BECKER; SANTOS, 2007a).

As carapaças formadas nos solos ferralíticos podem ter origem relacionada à erosão das camadas superficiais do solo e exposição do horizonte B, devido à migração ascendente de compostos de ferro e posterior precipitação de óxidos férricos (BIGARELLA; BECKER; SANTOS, 2007a).

Solos fracamente ferralíticos são originados de rocha rica em sílica e pobre em bases, como o granito e o gnaiss. Nesses solos, a sílica não é totalmente eliminada pela lixiviação e combina-se com a alumina, dando origem a uma quantidade considerável de caulinita nesses solos (BIGARELLA; BECKER; SANTOS, 2007a).

Bigarella, Becker e Santos (2007b) apontam que solos lateríticos, como os latossolos, podem apresentar uma maior tendência à erosão. No sudeste brasileiro, as regiões típicas de boçorocas abrangem em grande parte terrenos colinosos, sedimentares arenosos com latossolos (PRANDINI et al.², s/d apud BIGARELLA; BECKER; SANTOS, 2007b, p. 930).

² PRANDINI, F. et al. **Tipos especiais de ravinas, no mundo tropical boçorocas: diagnose, fundamentos da solução.** Inédito. s/d

Saprolito de gnaiss

Uma grande parte do território brasileiro situa-se em regiões de rochas graníticas e gnáissicas do embasamento cristalino. Essas regiões se apresentam muito suscetíveis à formação de boçorocas, cujo processo é acelerado ao se atingir o saprolito dessas rochas, que costuma ser mais erodível que as camadas superficiais, compostas, geralmente, de solos lateríticos (MORAIS, BACELLAR, SOBREIRA, 2007).

Morais, Bacellar e Sobreira (2007) analisaram a influência da erosão subsuperficial na evolução de boçorocas e os fatores que interferem na erodibilidade dos solos, com enfoque em solos saprolíticos provenientes de rochas do embasamento cristalino da região sul do Complexo Bação, interior do Quadrilátero Ferrífero, centro-sul de Minas Gerais. Na região, as rochas são majoritariamente gnáissicas de fino bandamento, seguidas de granitos, ambas predominantemente granodioríticas. O saprolito é majoritariamente siltoso e composto principalmente por quartzo, feldspato, caulinita, illita e muscovita. O solo laterítico que compõe os horizontes superficiais é principalmente argiloso, com uma espessura variável que chega a 10 metros, e composto por caulinita, oxi-hidróxidos de ferro e alumínio e quartzo.

O saprolito se mostrou menos resistente à erosão que solo laterítico, o que pode ser atribuído à agregação do solo laterizado pelos óxidos e hidróxidos de ferro. Além disso, o saprolito apresentou uma instabilidade à saturação, com ocorrência de escorregamentos rotacionais (MORAIS; BACELLAR; SOBREIRA, 2007).

As amostras se mostraram desagregáveis por abatimento e dispersão, mas, ao empregar um fluxo paralelo à superfície de um modelo de talude, os autores observaram que não houve erosão originada por carreamento ou piping, e sim o surgimento de trincas de tração na superfície, com posterior escorregamento rotacional.

Os autores concluíram que a erosão subsuperficial só ocorre na zona não saturada do talude, sendo formada inicialmente pelo escoamento superficial concentrado da água da chuva. Segundo os autores, essas erosões se mantêm estáveis apenas na zona não saturada, pois, devido à baixa coesão dos saprolitos os taludes solapam quando saturados, formando os escorregamentos rotacionais e não permitindo a evolução da erosão subsuperficial nessas condições. Segundo os autores, esses escorregamentos são os principais responsáveis pela evolução das boçorocas.

3.5 Estabilização de taludes em boçorocas

Os processos de estabilização de movimentos de massa podem ser agrupados segundo o objetivo de interesse, como eliminação de água do talude, controle da erosão e atenuação do dessecamento, da pressão da água e dos efeitos da gravidade (FREIRE³, 1965 apud GUIDICINI; NIEBLE, 1976, p. 142). Segundo Hoek e Londe⁴ (1974, apud GUIDICINI; NIEBLE, 1976, p. 142), os principais métodos de estabilização de taludes terrosos consistem na mudança na geometria do talude, na drenagem da água subterrânea e no reforço do maciço.

Alterar a geometria do talude consiste em reduzir sua altura ou sua inclinação. Não é necessariamente a medida mais efetiva, visto que ela não diminui apenas as forças solicitantes, mas também a tensão normal que atua na superfície, e, assim, a força de atrito resistente. Entretanto, a vantagem dessa medida é que seus efeitos são permanentes no sistema de forças atuantes, diferente das alterações decorrentes da drenagem e do reforço, que podem necessitar de manutenção para que se mantenham efetivas (GUIDICINI; NIEBLE, 1976).

Já a drenagem de águas subterrâneas, embora necessite de manutenção, sempre atuará melhorando a estabilidade do talude. Consiste principalmente em diminuir a água que infiltra no topo e na face do talude (GUIDICINI; NIEBLE, 1976). No que diz respeito às fendas de tração abertas no topo do talude, Guidicini e Nieble (1976) recomendam preenche-las com materiais porosos, como cascalho, e selar o topo com materiais impermeáveis, como a argila, de forma que de um lado a entrada direta da água superficial seja impedida, mas por outro seja permitida a drenagem para a face do talude, a qual deve ser protegida superficialmente.

Por fim, Guidicini e Nieble (1976) apresentam que o reforço do maciço para estabilização de taludes pode ser feito através de muros de arrimo, cortinas atirantadas, ancoragem da camada superficial de solo, sustentação por cabos de aço, entre outros métodos. Segundo os autores, em conjunto a um eficiente sistema de drenagem, esta pode ser a única solução possível em alguns casos, visto que o retaludamento pode vir a ser economicamente inviável.

³ FREIRE, E.S.M. Movimentos coletivos de solos e rochas e sua moderna sistemática. **Construção**. Rio de Janeiro. 1965.

⁴ HOEK, E., LONDE, P. Surface workings in rock. In: Congress of the International Society for Rock Mechanics, 3, Denver. **Proceedings**. Washington. 1974. v. 1, Parte A, tema 3, p. 613-654.

No caso de boçorocas, Bigarella, Becker e Santos (2007b) apontam que a solução adotada para cada uma deve ser embasada em suas características próprias, considerando estruturas geológicas, hidrologia, propriedades dos solos e topografia. A intervenção deve ser feita nos três principais causadores de instabilidade – água, declividade e cobertura do solo – e os procedimentos fundamentais consistem em isolamento da área, drenagem subterrânea, drenagem superficial, proteção das cabeceiras, sistematização ou retaludamento das encostas, reforço do solo e recomposição da cobertura vegetal (BIGARELLA; BECKER; SANTOS, 2007b; ROCHA, 2003).

A sistematização dos taludes refere-se à suavização das bordas de erosão, que costumam ser irregulares, solapadas e dificultam o estabelecimento e desenvolvimento da vegetação. Com a suavização dos taludes, a vegetação pode revestir de forma mais efetiva a superfície da encosta e conter a erosão (BIGARELLA; BECKER; SANTOS, 2007b).

O retaludamento consiste em mudar a geometria do talude, tornando-o mais suave e com a inclinação necessária para garantir sua estabilidade. Rocha (2003) apresenta que é essencial que cada caso seja analisado segundo os critérios de segurança e a viabilidade da obra. Se for realizado um retaludamento apenas considerando a condição mais crítica, a intervenção pode ser inviabilizada. Por outro lado, ao considerar uma condição mais amena, em épocas de chuva, com a saturação do solo, podem ocorrer escorregamentos. Segundo o autor, deve-se primeiro realizar um estudo da resistência ao cisalhamento do solo com diferentes umidades, e com essa informação determinar o ângulo de inclinação mais adequado do talude.

Como vários aspectos influenciam a resistência de cada horizonte, o ângulo de inclinação estável pode variar em um mesmo talude. Assim, uma solução proposta por Rocha (2003) é o retaludamento em bermas, segundo a resistência ao cisalhamento e inclinação ideal para cada horizonte do solo (Figura 2). Segundo o autor, quando os horizontes superficiais são pouco espessos não é necessário fazer a determinação de sua resistência ao cisalhamento para o retaludamento, e sim apenas daquele mais representativo, que estabelece a condição de estabilidade do talude (ROCHA, 2003).

Figura 2 – Visão esquemática de diferentes ângulos de corte para três horizontes de um solo (Adaptado de ROCHA, 2003)

3.6 O papel da vegetação na estabilização de processos erosivos e movimentos de massa

A vegetação se relaciona à ocorrência de processos erosivos e movimentos de massa uma vez que interfere nas propriedades do solo, como coesão, porosidade, ancoramento de linhas de fratura, interceptação da água da chuva, grau de saturação, velocidade do escoamento superficial e subsuperficial, infiltração e armazenamento de água no solo, além da proteção do solo contra vento e variações de temperatura (COELHO; PEREIRA, 2006; DURLO; SUTILI, 2005; FERNANDES; FREITAS, 2011; SAULI; CORNELINI; PRETI, 2005).

Dentre as vantagens que a vegetação proporciona, Fernandes e Freitas (2011) destacam as seguintes:

- Funções de cobertura:

- A parte aérea da planta representa uma cobertura da superfície que diminui o efeito da chuva, do vento e do escoamento superficial, diminuindo a erosividade desses agentes.

- Armação e ancoragem do solo:

- As raízes aumentam a coesão do solo, permitindo a estabilidade de taludes com declividade superior ao natural para este material, quando sem vegetação.
- Raízes mais profundas podem atravessar planos de descontinuidade paralelos à superfície aumentando a rugosidade desses planos, ancorando as camadas e diminuindo as chances de escorregamentos (Figura 3).

Figura 3 – Aumento de rugosidade entre planos devido a raízes (Adaptado de GRAY; SOTIR, 1996)

- Estruturação:

- As ações químicas e biológicas decorrentes da presença de vegetação contribuem no aumento da estabilidade do solo através da formação de agregados e compostos húmicos.

- Funções de coesão e drenagem:

- A vegetação diminui o teor de água no solo, aumentando a coesão e diminuindo o risco de fluidificação.

Os benefícios dependem do tipo de vegetação e do processo de degradação em cada local. Segundo Gray e Sotir (1996), gramíneas e herbáceas são mais efetivas para a prevenção da erosão superficial, influenciando na interceptação da água da chuva, retenção de sedimentos e diminuição do escoamento superficial. Já no caso de movimentos de massa, espécies lenhosas são mais indicadas, e seus benefícios envolvem o reforço e a contenção do solo pelas raízes e estacas, e a modificação da hidrologia devido à diminuição da umidade do solo decorrente da evapotranspiração.

Apesar dos benefícios que a vegetação traz para proteção dos solos, ocasionalmente ela pode contribuir com efeitos negativos, dependendo das condições do solo e do talude. O Quadro 2 apresenta alguns efeitos mecânicos e hidrológicos da vegetação na estabilidade de taludes.

Efeitos	Positivos	Positivos e Negativos	Negativos
Mecânicos	Aumento de coesão Aumento da resistência ao cisalhamento Ancoramento do solo Aprisionamento de horizontes profundos e de baixa coesão Redução da erodibilidade do solo	Sobrecarga devido ao peso da biomassa, com aumento das forças normais (efeito positivo) e paralelas (efeito negativo) ao declive.	Vento: transmissão dos momentos de flexão através do caule e raízes para o solo – efeito alavanca
Hidrológicos	Interceptação e evapotranspiração (redução da entrada de água no solo) Aumento da coesão do solo por bombeamento da água	Aumento de permeabilidade e infiltração	Concentração de escoamento superficial e estabelecimento de caminhos preferenciais de infiltração

Quadro 2 – Efeitos da vegetação na estabilidade do solo (adaptado de SAULI; CORNELINI; PRETI, 2005)

3.7 Bioengenharia de solos

O uso de materiais naturais para controlar problemas de erosão em taludes e margens de rios já ocorre há séculos em diferentes partes do mundo. A partir da década de 50, Hugo Schiechl descreveu em detalhes os métodos desenvolvidos que empregavam conceitos básicos de Bioengenharia de Solos. A partir daí, as técnicas deixaram de ser aplicadas empiricamente para fazerem parte de uma disciplina com rigor científico (GRAY; SOTIR, 1996; SAULI; CORNELINI; PRETI, 2005).

Segundo Gray e Sotir (1996), a estabilização biotécnica emprega estruturas inertes associadas a elementos biológicos para controlar processos erosivos e movimentos de massa. Tanto o material inerte quanto os elementos biológicos possuem importância funcional, de forma integrada e complementar. A análise do problema e do projeto é realizada embasada nos princípios mecânicos de engenharia, enquanto o conhecimento biológico é essencial para selecionar, propagar e estabelecer o material vegetal que será empregado na estabilização do solo.

A Bioengenharia de Solos é definida pelos autores como uma subárea da estabilização biotécnica. Nela, as plantas também podem ser empregadas com estruturas inertes, entretanto, o material vivo passa a ser o principal elemento estrutural e mecânico da intervenção. Para isso, as técnicas consideram os melhores arranjos geométricos para que as plantas façam o reforço do solo, drenos e barreiras, conferindo uma estabilidade suficiente para que a vegetação do entorno possa aos poucos ir se firmando e adquirindo este papel (GRAY; SOTIR, 1996; SAULI; CORNELINI; PRETI, 2005).

A bioengenharia de solos pode ser empregada em diferentes situações. Segundo Fernandes e Freitas (2011), alguns dos domínios mais relevantes atualmente para a aplicação das técnicas são margens de rios, áreas costeiras e dunares, zonas húmidas, zonas florestais destruídas pelo fogo, áreas de mineração, taludes, aterros e infraestruturas. Cada espécie tem sua contribuição na intervenção, assim, é importante selecionar e combinar corretamente as espécies adequadas para cada situação, de acordo com sua função técnica (FERNANDES; FREITAS, 2011).

O escopo da bioengenharia de solos se baseia principalmente nos seguintes aspectos (SAULI; CORNELINI; PRETI, 2005):

- Técnica e funcional: controle de erosão e estabilidade de taludes;
- Paisagística: restituição da paisagem do entorno;
- Ambiental: reconstrução de ecossistemas naturais utilizando-se espécies autóctones, compatibilidade a lugares sensíveis a alterações ambientais e valorização da biodiversidade;
- Econômica: estruturas alternativas e competitivas às obras tradicionais.

Durlo e Sutili (2005) defendem que as técnicas de bioengenharia de solos devem ser simples e de baixo custo, de forma que proprietários rurais, com as devidas informações, possam executá-las sem a necessidade da contratação de especialistas.

O Quadro 3 apresenta algumas vantagens e desvantagens das técnicas de bioengenharia de solos segundo Franti (1996) e Sauli, Cornelini e Preti (2005). A Figura 4 apresenta a variação das técnicas de bioengenharia de solos segundo a declividade do local.

Vantagens	Desvantagens
Baixa manutenção da vegetação uma vez que esta se estabelece	Dificuldade para instalação nos períodos em que o acesso ao local seja mais restrito
Baixo custo	Necessidade de disponibilidade de plantas locais com as adaptações necessárias
Benefícios à fauna e flora local	Necessidade de mão-de-obra qualificada e com experiência em uma técnica ainda não muito difundida
Melhoria da qualidade da água	Pouca aceitação e comercialização entre a sociedade e contratantes
Incremento da estabilidade do solo ao decorrer do tempo devido ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas	Limite de aplicação das técnicas dependendo do grau de complexidade do problema

Quadro 3 – Vantagens e desvantagens das técnicas de bioengenharia de solos

Figura 4 – Variação de técnicas de Bioengenharia de Solos segundo a declividade do local (Adaptado de SAULI; CORNELINI; PRETI, 2005)

3.8 Técnicas de bioengenharia de solos com potencial de aplicação em taludes de boçorocas

Como apresentado, existem diversas técnicas de bioengenharia de solos utilizadas com diferentes finalidades. O objetivo dessa seção é apresentar algumas técnicas com potencial de aplicação em boçorocas, principalmente em condições similares à da área de estudo.

Plantio

A maneira mais simples de se começar a proteger o solo é o plantio de espécies adequadas ao local e ao objetivo da intervenção. Pode ser feito manualmente ou com máquinas específicas, e fornece um rápido revestimento do solo. Para que a estabilização seja mais efetiva e em maior profundidade, é indicado o emprego combinado de espécies herbáceas, arbustivas e arbóreas (FERNANDES; FREITAS, 2011).

Uma espécie que tem sido amplamente empregada para controle de processos erosivos e estabilidade de taludes é o Capim Vetiver (*Vetiveria zizanioides*, gramínea exótica). Luque, R., Luque, O. e Posada (2011) analisaram a eficiência desse capim na recuperação de uma boçoroca na Venezuela. Na intervenção, foi feita uma sistematização dos taludes com posterior plantio de vetiver (Figura 5).

Após um período de chuvas intensas, os autores observaram escorregamentos em áreas próximas à boçoroca, enquanto que nas áreas tratadas com vetiver não houve processos de instabilização, exceto nas áreas onde ainda não havia bom desenvolvimento da vegetação.

Figura 5 – Uso de Vetiver em boçoroca - Venezuela (LUQUE, R.; LUQUE, O.; POSADA, 2011)

Os autores concluíram que o vetiver apresenta uma boa adaptação a qualquer condição de solo e à ancoragem em rochas e que, mesmo em época de seca, o vetiver sobrevive, embora o acompanhamento e nutrição do solo sejam importantes para a sobrevivência da vegetação. Recomendaram que o plantio seja feito segundo as curvas de nível, e não aleatoriamente. Nessa condição, observaram que houve bons resultados no controle da erosão e contenção de sedimentos nas barreiras, sendo viável o uso dessa espécie em declives superiores a 45°. Além disso, as mudas plantadas nos taludes da boçoroca foram satisfatoriamente ancoradas, com bom desenvolvimento radicular. Ainda assim, ressaltam que o monitoramento da intervenção é essencial para acompanhar o desenvolvimento das plantas e erosões.

Luque, R., Luque, O. e Posada (2011) apontam ainda que a associação do vetiver com amendoim forrageiro a montante dos taludes da boçoroca ajuda a diminuir o escoamento superficial e os sedimentos provenientes da microbacia da boçoroca. Por fim, os autores recomendam o uso do capim vetiver para controle de boçorocas de grande porte, destacando que os custos do projeto foram significativamente inferiores que outras técnicas rígidas de engenharia.

Apesar dos benefícios do uso dessa espécie, é sempre importante considerar espécies nativas para revegetação. É interessante conhecer quais espécies locais também apresentam propriedades para um eficiente controle da erosão e de movimentos de massa.

Considerando a carência de conhecimento de espécies nativas com propriedades adequadas para controle de erosão, o que leva ao emprego intenso de espécies exóticas na revegetação de boçorocas, Marques (2011) avaliou o desempenho de espécies nativas plantadas nos sedimentos acumulados dentro de uma boçoroca localizada em Ouro Preto. Foram estudados o Capim Flexinha (*Echinolaena inflexa*, gramínea do Cerrado), a Camaratuba (*Cratylia argentea*, leguminosa do Cerrado) e o Capim Vetiver.

Segundo a autora, as três espécies foram eficientes na retenção de partículas e mostraram-se tolerantes à baixa disponibilidade hídrica e de nutrientes, com alta taxa de sobrevivência mesmo no período de estiagem.

Quanto às espécies nativas, não foi observada uma boa associação entre a leguminosa e organismos fixadores de N_2 , entretanto, a espécie apresentou boa tolerância a condições adversas e sistema radicular extenso e ramificado, o que sugere que a Camaratuba pode contribuir em intervenções de revegetação e controle de processos erosivos.

Já o Capim Flexinha apresentou o sistema radicular mais eficiente e uma satisfatória redução do carreamento do solo por erosão superficial, podendo auxiliar no controle de processos erosivos. Essa espécie foi a que apresentou menor crescimento, entretanto, as áreas onde foi plantada apresentaram maiores concentrações de nitrogênio e matéria orgânica, o que contribui para o estabelecimento de outras espécies.

Assim, Marques (2011) conclui que os resultados de sobrevivência e características radiculares obtidos indicam um potencial dessas espécies nativas para controle de processos erosivos e estabilização do solo.

Estaca viva (Live staking)

Estacas vivas são partes de plantas, como ramos ou galhos, sem folhas ou ramificações, inseridas na terra. Instalada de forma correta, a estaca desenvolve raízes e folhas e cresce, originando uma nova planta (Figura 6). Um sistema empregando várias estacas é interessante para a estabilização do solo uma vez que se cria uma rede de raízes (MEGALE, 2011; USDA; 1992).

Figura 6 – Estacas vivas na implementação e após crescimento de raízes e ramos (STEINFELD et al., 2007)

Essa técnica é principalmente indicada para taludes instáveis que estão freqüentemente úmidos (USDA,1992), mas pode ser empregada em diversas combinações, como proteção de margens de corpos d'água, processos erosivos, instabilidade de taludes, drenagem de solos e em associação a estruturas como gabiões, solo envelopado e paliçadas, além de poder fixar outros elementos de controle, como as mantas orgânicas (Figura 7) (COUTO et al., 2010; FERNANDES; FREITAS, 2011; MEGALE, 2011).

Figura 7 – Revitalização do solo com estacas vivas – Rio das Velhas, Santa Luzia/MG (COUTO et al., 2010)

Possui a vantagem de apresentar resultados rapidamente, ser de fácil e rápida execução, baixo custo e melhorar as condições para o estabelecimento de outras plantas (MEGALE, 2011; USDA, 1992). Por outro lado, a estabilidade ocorre apenas quando houver o desenvolvimento do sistema radicular, e, por se tratar de elementos vivos e com dinâmicas próprias, não se pode assegurar o enraizamento adequado das estacas (FERNANDES; FREITAS, 2011).

Para que a técnica seja eficiente, a espécie empregada deve ser resistente às variações ambientais de temperatura e umidade e a pragas e doenças; apresentar altas taxas de transpiração e de crescimento vegetativo; possuir ramos flexíveis e resistentes; e, principalmente, ter um bom desenvolvimento da parte aérea e do sistema radicular, o qual deve ser fino e extenso. O desempenho da estaca depende da espécie, do modo de propagação, das interações fisiológicas e da temperatura, umidade e oxigênio do solo (COUTO et al., 2010; MEGALE, 2011).

Megale (2011) analisou o potencial de enraizamento e brotação e o desenvolvimento de estacas de espécies comuns na região de Itajubá, sul de Minas Gerais. Os substratos utilizados no experimento foram o horizonte C de um Latossolo Vermelho e areia de construção. As espécies estudadas foram Acalifa (*Acalipha wilkesiana*, arbusto exótico), Jasmim Amarelo (*Jasminum mesnyi*, arbusto exótico), Margaridinha (*Sphagneticola trilobata*, herbácea exótica), Caliantra (*Calliandra harrisii*, arbusto nativo) e Capim-elefante (*Pennisetum purpureum*, exótica), encontradas facilmente na região da pesquisa.

Segundo os resultados da autora, o Capim-elefante foi a que melhor produziu folhas. A melhor produção de raízes foi observada nessa mesma espécie, e na Margaridinha. No substrato areia, ambas as espécies apresentaram melhor desenvolvimento que as demais, embora tenha sido inferior ao observado no latossolo. Por fim, a autora indica que essas espécies podem ser recomendadas em taludes com exposição de saprolito.

Feixes vivos (Live fascine)

Os feixes vivos são feitos com ramos longos de espécies lenhosas que criam raízes facilmente. Os feixes são amarrados e colocados em trincheiras, ancorados com estacas vivas ou inertes. As trincheiras são feitas seguindo o contorno do talude e, após a instalação dos feixes, são preenchidas com solo até que apenas o topo dos feixes fique exposto (Figuras 8 e 9) (GRAY; SOTIR, 1996; USDA, 1992).

Seu principal efeito ao ser instalado não é o reforço do talude, mas a dissipação de energia do escoamento superficial e retenção de sedimentos, proporcionando uma estabilidade superficial. Ao formar raízes, auxilia na estabilização da cobertura, a profundidades de 0,5m a 1m (USDA, 1992).

A técnica pode ser empregada na estabilização de taludes, como cortes e aterros de rodovias, e para evitar o desenvolvimento de ravinas, controlar boçorocas e outras áreas com problemas de erosão, sendo recomendada para encostas com declividade inferior a 35° (FERNANDES; FREITAS, 2011; GRAY; SOTIR, 1996).

Entre as vantagens que o método oferece estão: proteção do talude contra escorregamentos rasos (até 0,5m de profundidade), redução imediata da erosão superficial, retenção do solo, diminuição do comprimento de rampa e melhor estabelecimento da vegetação ao criar um microclima que favorece o crescimento das plantas (USDA, 1992). É menos efetiva que a técnica de camada de ramos na prevenção de escorregamentos translacionais uma vez que o reforço do solo não alcança camadas mais profundas do talude (GRAY; SOTIR, 1996).

Figura 8 – Feixe vivo (Adaptado de USDA, 1992)

Figura 9 – Elaboração de feixe vivo

Camadas de ramos (Brush layering)

As camadas de ramos são usadas para controlar processos erosivos, reforçar o solo e estabilizar taludes que apresentem perda de solo ou escorregamentos superficiais (GRAY; SOTIR, 1996; USDA, 1992). Consiste em intercalar camadas de ramos vivos com camadas de solo. Para isso, escava-se um terraço na base da encosta e utilizam-se ramos de plantas para cobri-lo, de forma entrecruzada e aproximadamente perpendicular ao contorno da encosta, orientação mais efetiva para o reforço do solo. Após a colocação dos ramos, o terraço é preenchido com terra e uma nova bancada é escavada logo acima, processo repetido até que se chegue ao topo da encosta (Figura 10) (FERNANDES; FREITAS, 2011; GRAY; SOTIR, 1996; USDA, 1992).

A distância entre as fileiras pode variar de 1m a 1,5m de distância, dependendo do ângulo e da estabilidade do talude. Recomenda-se que os ramos tenham um comprimento de 10 cm a mais que a profundidade do terraço, de forma que a parte exterior dos ramos possa reduzir a velocidade do escoamento superficial, diminuir a superfície exposta à erosão e filtrar sedimentos (FERNANDES; FREITAS, 2011; GRAY; SOTIR, 1996; USDA, 1992).

Esquema da técnica (FERNANDES; FREITAS, 2011)

Colocação dos ramos (USDA, 1992)

Talude após instalação dos ramos (FERNANDES; FREITAS, 2011)

Talude após 2 anos (USDA, 1992)

Figura 10 – Exemplos de usos da camada de ramos

Com a aplicação da técnica, a superfície da encosta é dividida em fragmentos menores e o solo já é reforçado até uma profundidade de 1,5m, resistência que aumenta conforme as raízes se desenvolvem. Estabilizado o talude, ocorre um rápido estabelecimento da vegetação e uma boa retenção de sedimentos. Em casos de taludes muito secos, a infiltração aumenta, ao mesmo tempo em que se reduz o teor de umidade em ambientes muito saturados, além de proporcionar uma drenagem horizontal. A técnica pode ser empregada tanto em taludes com solo exposto quanto em combinação com outros métodos, como muros ou mantas orgânicas, para aumentar o reforço do solo (FERNANDES; FREITAS, 2011; GRAY; SOTIR, 1996; USDA, 1992). Uma desvantagem da camada de ramos é que os resultados podem ser deficientes em locais áridos ou com períodos de seca prolongados, devido à maior dificuldade da vegetação se estabelecer nessas condições (FERNANDES; FREITAS, 2011).

Paliçadas

As paliçadas são estruturas instaladas ao longo de um talude segundo a curva de nível (FERRARI, 2008). Podem ser construídas de diferentes maneiras, por exemplo, com estacas vivas inseridas no solo próximas umas às outras e unidas no topo por um tronco horizontal, ou com fileiras sobrepostas de troncos de madeira presos com estacas e com inserção de mudas entre os troncos (BONATI; MARONGIU, 2013; CORNELINI; SAULI, 2005).

São usadas para estabilizar taludes que sofram com erosão superficial, reduzir a declividade de boçorocas e conter sedimentos em sulcos, ravinas e boçorocas, os quais podem auxiliar no reforço da encosta (Figuras 11 e 12). Após o desenvolvimento da vegetação, esta se torna o principal componente estrutural, principalmente quando as estacas desenvolvem raízes (BONATI; MARONGIU, 2013; FERRARI, 2008).

Figura 11 – Paliçadas utilizadas para estabilização de encostas (a) (CORNELINI; SAULI, 2005) (b) (FERRARI, 2008)

Figura 12 – Paliçadas em taludes de boçoroca – Sacavém/MA (BEZERRA, 2008)

Sua construção é fácil e rápida, com efetividade imediata e geralmente se desenvolve bem. Existindo material disponível no local, é uma técnica de baixo custo. As desvantagens da técnica são seu tamanho limitado e a dependência de disponibilidade de material para construção no local (BONATI; MARONGIU, 2013).

No Brasil, é comum o uso e a recomendação da construção de paliçadas para controle e estabilização de boçorocas. Entretanto, geralmente a técnica é empregada com a finalidade de drenagem interna da boçoroca e não costumam ser aplicadas nos taludes (CHAVES et al., 2012; FILIZONA et al., 2011).

Geotêxteis biodegradáveis

Os geotêxteis biodegradáveis são formados por fibras ou filamentos contínuos distribuídos de forma a constituir uma manta de alta resistência. Couto et al. (2010) atribuem aos geotêxteis as funções de separação, evitando que partículas de tamanhos diferentes se misturem; drenagem, facilitando a percolação da água; proteção e aumento da resistência do solo.

Realizam o papel da serrapilheira, controlando a erosão superficial do solo e contendo os sedimentos, e são indicados em taludes onde não é possível preparar o solo adequadamente, uma vez que criam um microclima superficial adequado para o estabelecimento da vegetação (MORGAN; RICKSON, 1995).

Possuem ainda a vantagem de ser de simples e rápida execução, oferecer uma proteção imediata, e apresentar boa elasticidade e permeabilidade. Por outro lado, apresentam uma durabilidade limitada, de aproximadamente um a dois anos (BHATTACHARYYA et al., 2009; FERNANDES; FREITAS, 2011).

Algumas pesquisas têm sido feitas analisando a eficiência de geotêxteis biodegradáveis. Smets et al. (2009) compararam a taxa de erosão de uma parcela de solo exposto com parcelas protegidas por geotêxteis feitos com diferentes materiais biodegradáveis. Os autores observaram uma redução da taxa de erosão em uma média de 56% com o uso de geotêxteis feitos a partir da palmeira *Borassus* (palmeira africana), 59% com geotêxteis de Buriti (palmeira brasileira), e 66% com geotêxteis de bambu. Bhattacharyya et al. (2009) observaram que os geotêxteis feitos de *Borassus* e de Buriti reduzem o escoamento superficial. Ainda segundo os autores, os geotêxteis de buriti apresentam uma durabilidade de apenas um ano, enquanto os de *Borassus* duram aproximadamente dois anos.

No Brasil, Bezerra (2011) comparou a adoção de geotêxteis de buriti para controle de boçorocas com técnicas da engenharia tradicional. Segundo o autor, técnicas tradicionais, que utilizam majoritariamente concreto, ferro e máquinas de grande porte, causam maior impacto aos aspectos naturais e estéticos do ambiente e requerem um maior investimento de capital.

O trabalho foi realizado em Sacavém/MA e seguiu as seguintes etapas: retaludamento manual e com uso de retroescavadeira; construção de paliçadas de madeira na base de cada talude para conter o material inconsolidado e o substrato, e na parte superior das rampas, para diminuir a velocidade do escoamento superficial (Figura 12); utilização de sacos de estopa com areia, semente de braquiária e adubo de palmeiras para a drenagem; aplicação de insumos; instalação de geotêxteis (Figura 13).

Figura 13 – Implantação de geotêxteis de buriti em uma boçoroca de Sacavém/MA (BEZERRA, 2011)

O autor observou que a parcela com solo exposto se aproximou mais à condição de saturação e apresentou maior escoamento superficial e perda de sedimentos que a parcela com proteção dos geotêxteis. Os geotêxteis apresentaram resultados positivos na estabilização do local tratado, se mostrando ser uma alternativa boa e de baixo custo na contenção de processos erosivos. Segundo o autor, os geotêxteis representam uma barreira contra o impacto da água da chuva, diminuem o escoamento superficial e a remoção de partículas, auxiliam na retenção de sedimentos, adubo e sementes, diminuem a insolação direta na superfície, retêm umidade e fornecem matéria orgânica ao solo, colaborando com o estabelecimento e desenvolvimento da cobertura vegetal.

Bezerra, Guerra e Rodrigues (2011) analisaram a dinâmica do escoamento superficial em parcelas com solo exposto, com geotêxteis de buriti e com gramíneas, avaliando a eficiência do geotêxtil na diminuição do fluxo superficial e transporte de sedimentos. A pesquisa foi realizada em Uberlândia/MG, região com Latossolo Vermelho de textura argilo-arenosa. Segundo os autores, o uso do geotêxtil proporcionou uma proteção ao salpicamento do solo, escoamento superficial e remoção de partículas. Além disso, impediram a remoção das sementes de gramíneas inseridas na parcela e serviram de suporte ao seu desenvolvimento. Já na parcela com solo exposto, observou-se encrostamento da superfície, formação de rede de ravinas e erosão em pedestais, alta taxa de transporte de sedimentos e baixa umidade superficial do solo em períodos mais secos.

Para esses autores, os geotêxteis biodegradáveis podem ser aplicados em casos de estabilização de boçorocas, contenção de ravinas, prevenção de processos erosivos acelerados em taludes de estradas, e em projetos de engenharia que priorizem infiltração de águas.

A partir de uma perspectiva socioeconômica, a fabricação artesanal de geotêxteis a partir da fibra do buriti também traz como benefícios a geração de empregos e complementação de renda das comunidades, a estimulação de um extrativismo sustentável e de reflorestamento, e até um incentivo para exportar o produto para outros países (BEZERRA, 2011; BEZERRA; GUERRA; RODRIGUES, 2011; FULLEN; GUERRA⁵, 2002 apud BEZERRA, 2011).

⁵ FULLEN, M. A., GUERRA, A. J. T. **The potencial of palm (Borassus) mat geotextiles as a soil conservation technique.** In: IV Simpósio Nacional de Geomorfologia. São Luís, 2002.

Biorrolos (Fiber roll)

Os biorrolos são estruturas cilíndricas feitas com fibras naturais, como coco ou palha. Podem ser empregados para diminuir o comprimento de rampa de taludes, diminuindo o escoamento superficial, e conter sedimentos, devendo ser instalados seguindo a curva de nível (Figura 14) (STEINFELD et al., 2007).

Figura 14 – Proteção de taludes com biorrolos (BONTERRA IBERICA S.L., s.d.)

São mais recomendados para margens de corpos d'água (FERNANDES; FREITAS, 2011), entretanto, existem trabalhos que empregam os biorrolos para restauração de taludes, ravinas e boçorocas, ou outros locais que sofram com processos erosivos intensos e alta velocidade de escoamento superficial (BONTERRA IBERICA S.L., s.d.).

Possui como vantagens uma execução simples e rápida, retenção de sedimentos, elasticidade e permeabilidade. Como desvantagem, os biorrolos apresentam durabilidade limitada. Além disso, é importante que haja um monitoramento constante no primeiro ano para garantir a estabilidade da estrutura (FERNANDES; FREITAS, 2011).

4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo situa-se no município de Nazareno, região sul do Estado de Minas Gerais (Figura 15), e está inserida na unidade geomorfológica da superfície cristalina do Alto Rio Grande, na Bacia do Rio Grande (FERREIRA, 2005). O município possui uma área de 329.128 km² e aproximadamente 7.954 habitantes (IBGE, 2010). Os municípios limítrofes são São João del Rei, Lavras, Ibituruna, Conceição da Barra de Minas, Itutinga e São Tiago. O Rio das Mortes e o Rio Grande drenam o município, que também possui alguns córregos, como o Córrego do Cravo e o Ribeirão Marcela.

A Bacia do Rio Grande pertence à Bacia Hidrográfica do Rio Paraná e abrange 33 municípios em uma área de aproximadamente 9.000 km² e com uma população de 365.000 habitantes (FERREIRA, R.; FERREIRA, V., 2009b).

Fisicamente, a bacia pode ser dividida nas regiões Campos das Vertentes e Região Serrana. O Campo das Vertentes, onde está inserido o município de Nazareno (Figura 15), apresenta colinas de relevo ondulado a forte ondulado, com colúvio e material autóctone (FERREIRA, L.; FERREIRA, R.; FERREIRA, V., 2012).

A altitude no município de Nazareno varia de 839m a 1140m e o relevo é majoritariamente ondulado (Figura 16), com uma declividade que varia de 8% a 20% (HORTA, 2006).

Figura 15 – Localização do município de Nazareno-MG (FERREIRA et al, 2011)

Figura 16 – Relevo, vegetação e uso do solo na região

Clima

O clima da região é tropical de altitude com verão quente e úmido e inverno frio e seco, apresentando temperatura média anual de 19°C. A precipitação média anual varia de 1200 a 1500 mm, sendo o período entre Novembro e Março aquele de maior intensidade (FERREIRA et al, 2007).

Vegetação

A vegetação nativa na região do município é uma transição entre os biomas Mata Atlântica e Cerrado, entretanto, grande parte da vegetação foi substituída por áreas de cultivo e pastagem (FERREIRA, 2005). Essas atividades contribuem para a degradação do solo, principalmente devido à utilização sucessiva do fogo no manejo das pastagens e à ausência de manejo adequado do solo, práticas de correção de acidez e práticas conservacionistas, como terraços, plantio em nível e rotação de culturas. A baixa cobertura vegetal com florestas nativas e a falta de prática de reflorestamento também contribuem para a degradação da região (CARNIEL et al. ⁶, 1994 apud FERREIRA, R.; FERREIRA, V, 2009a, p. 7). A Figura 16 apresenta a cobertura vegetal na região.

⁶ CARNIEL, T. et al. **Atividade agrícola e recursos naturais na região sob influência da hidrelétrica de Itutinga/Camargos**. Belo Horizonte: CEMIG/ESAL, 1994. 65 p.

Geologia

A área situa-se na porção meridional do Cráton São Francisco, sendo constituída por rochas de origem plutônica, vulcânica e sedimentar que posteriormente passaram por processos metamórficos termo-tectônicos. Segundo o mapeamento geológico elaborado por Toledo (2002), a Boçoroca do Córrego do Cravo encontra-se no contato geológico entre o domínio das metavulcânicas de filiação komatiítica (pertencentes ao *Greenstone Belt* de Barbacena) e corpos de granitos, gnaisses e migmatitos indivisos. A Figura 17 apresenta o mapa geológico da área de estudo.

O domínio das metavulcânicas de filiação komatiítica, se refere à Faixa de Nazareno, a qual pertence uma faixa de sucessão metavulcano-sedimentar maior que se estende de Tiradentes a Itumirim e cuja origem associa-se ao período paleoproterozóico ou arqueno. A Faixa de Nazareno é composta por metakomatiito, serpentina-clorita-Ca-anfibolito xisto, talco/clorita xisto, serpentinito, anfibolito e gondito. Sua delimitação ao norte é abrupta e definida por uma falha vertical dextral de expressão regional. Já ao sul, o contato da Faixa com os corpos máfico-ultramáficos diferenciados e com os granitos, gnaisses e migmatitos é irregular (TOLEDO, 2002).

Figura 17 – Contexto geológico próximo à área urbana de Nazareno/MG (SAMPAIO, 2014 adaptado de CODEMIG, 2013)

Os granitos, gnaisses e migmatitos indivisos são corpos plutônicos com origem provável no Paleoproterozóico. Os tipos litológicos encontrados na região são gnaiss bandado tonalítico com feições migmatíticas, biotita granodiorito gnaiss, biotita granito foliado, biotita granito. A região sudoeste do município de Nazareno, onde está inserida a Boçoroca do Córrego do Cravo, caracteriza-se pela presença de biotita granito foliado e biotita granodiorito gnaiss (Figura 18).

Foto: Lígia Sampaio

Figura 18 – Gnaiss encontrado próximo à área de estudo

O biotita granito foliado é o litotipo dominante no contato dessa unidade com a sucessão vulcano-sedimentar. Toledo (2002) descreve esse granito como de coloração branca, granulação média a grossa e foliação determinada pela orientação de grãos de biotita. Sua textura é inequigranular xenoblástica, com grãos de tamanhos diferentes e contornos irregulares. As rochas são compostas por plagioclásio, quartzo, feldspato potássico e biotita, com minerais acessórios tais como granada, epidoto, mica branca, minerais opacos, apatita, allanita e zircão.

Já o biotita granodiorito gnaiss possui uma composição granodiorítica e caráter gnáissico. São descritos como gnaisses homogêneos, cinzentos, granulação média e fortemente foliados. Sua foliação é marcada pela orientação preferencial da biotita e bandas quartzo-feldspáticas lhe atribuem o caráter gnáissico. Apresenta textura granoblástica e é composto principalmente por plagioclásio, quartzo e microlina e, em menor quantidade, por biotita, mica branca, clorita, epidoto, minerais opacos, titanita, apatita, allanita e zircão.

Toledo (2002) apresenta que a área deve ter sido afetada por grandes eventos termotectônicos nos períodos Arqueano, Trasmazônico e Brasiliano, formando um complexo cenário de deformações. Segundo a autora, acredita-se que a fase de deformação principal atingiu a região de Nazareno e que nesse período ocorreu um dobramento generalizado formando uma foliação de feição planar com orientação N60-90°E e mergulho íngreme para o sudeste ou noroeste. Essa feição é dominante na região e aparece nas rochas de sucessão vulcano-sedimentar.

Solos

As principais unidades de solos existentes no município de Nazareno são Latossolo Vermelho-Amarelo (58%), Cambissolo (31%), Latossolo Vermelho (7%) e Gleissolo (2%). Cerca de 2% da área do município corresponde à lâmina d'água (HORTA et al., 2009). A Figura 19 apresenta o mapa de solos do município (HORTA, 2006).

Figura 19 – Mapa de solos do município de Nazareno/MG (Adaptado de HORTA, 2006)

Os solos foram originados da alteração de gnaiss granítico e de xisto, predominantes na região. O material proveniente do gnaiss granítico é o principal precursor dos Latossolos e Cambissolos, e o horizonte C gerado a partir da alteração desse material é altamente suscetível à erosão (Figura 20). Já a alteração do xisto deu origem ao Latossolo Vermelho. O horizonte C proveniente desse material é menos suscetível a erosão que aquele originado a partir do gnaiss granítico, e o solo apresenta uma maior fertilidade natural, o que facilita o estabelecimento da vegetação quando o solo é exposto (FERREIRA, 2005).

Figura 20 – Latossolo e saprolito expostos em erosão próxima à área de estudo

O Latossolo Vermelho-Amarelo da região é distrófico, alítico e muito intemperizado. O relevo onde esse tipo de solo ocorre é ondulado, de suave a forte, aparecendo principalmente em uma altitude entre 871 e 1045m. Sua textura é majoritariamente argilosa e apresenta certa suscetibilidade à erosão. A vegetação predominante nessa unidade de solo é o cerrado tropical, com alguns pontos de floresta tropical subcaducifólia. Apesar de apresentar certa aptidão para o cultivo, o solo possui uma acidez média e baixa fertilidade, de forma que o estabelecimento natural da vegetação em áreas que sofreram processos erosivos é limitado (BARUQUI et al., 2006; FERREIRA, 2005; HORTA, 2006; HORTA et al., 2009).

O Latossolo Vermelho ocorre principalmente ao norte do município de Nazareno. É muito intemperizado, sendo profundo e apresentando horizontes A e B homogêneos, com espessura maior que 1m e textura argilosa. Ocorre em altitudes de 925 a 991m e, assim como o Latossolo Vermelho-Amarelo, se relaciona com o bioma cerrado (FERREIRA, 2005; HORTA, 2006; HORTA et al., 2009).

O Cambissolo ocorre majoritariamente no sul de Nazareno, em relevo ondulado e forte ondulado, a altitudes que variam entre 917 e 1031m. Na área de domínio desse tipo de solo também ocorre predominância de cerrado. O solo apresenta textura siltosa e argilosa, com maiores valores na relação silte/argila, conferindo um caráter mais erodível ao solo. A alta concentração de alumínio e a acidez no solo o tornam menos fértil, dificultando o estabelecimento da vegetação em locais erodidos (FERREIRA, 2005; HORTA, 2006; HORTA et al., 2009).

O Gleissolo corresponde a solos minerais, hidromórficos e mal drenados. É originado em várzeas e planícies aluviais a partir de materiais transportados, dessa forma, suas propriedades são definidas pelo material de origem. Em Nazareno, estes solos costumam apresentar altos teores de Al, baixa saturação por bases e argilas de baixa atividade (HORTA, 2006; HORTA et al., 2009).

Motta et al.⁷ (2001 apud SILVA, 2006, p. 15) estimaram a erodibilidade dos solos predominantes na bacia do Ribeirão Marcela, em Nazareno, e encontraram maiores valores para o Cambissolo, seguido pelo Latossolo Vermelho-Amarelo e o Latossolo Vermelho. A distribuição dos solos na área total ocupada pelas principais boçorocas é de 47,7% para Cambissolo, 31,6% para Latossolo Vermelho-Amarelo e 20,7% para Latossolo Vermelho (FERREIRA et al., 2011). A Boçoroca do Córrego do Cravo insere-se na unidade Latossolo Vermelho-Amarelo (Figura 19).

Uso e ocupação

O solo da região é principalmente utilizado para agricultura e pastagem. O uso e ocupação do solo na bacia da Boçoroca do Córrego do Cravo consistem principalmente em cultura de café, vegetação de cerrado, área urbana e estradas. A montante da boçoroca existe uma estrada de terra e um cafezal, os quais podem ser agentes que influenciam no desenvolvimento dessa erosão. As Figuras 21 e 22 apresentam imagens de satélite da região e a Figura 23 o mapa de uso e ocupação da Bacia do Córrego do Cravo, elaborado por SAMPAIO (2014). A Figura 24 mostra a proximidade da boçoroca à área urbana.

⁷ MOTTA, P.E.F. et al.. **Levantamento pedológico detalhado, erosão dos solos, uso atual e aptidão agrícola das terras de microbacia piloto na região sob influência do reservatório da Hidrelétrica de Itutinga/Camargos-MG**. Lavras: UFLA/CEMIG, 2001. 51 p.

Figura 21 – Área urbana de Nazareno e Boçoroca do Córrego do Cravo (destaque em vermelho)

Figura 22 – Estrada de terra e áreas de cultivo próximas à cabeceira da Boçoroca do Córrego do Cravo

Figura 23 – Uso e ocupação da Bacia do Córrego do Cravo, Nazareno/MG (SAMPAIO, 2014)

Foto: Joel Sígolo

Figura 24 – Vista da cidade de Nazareno a partir da Boçoroca do Córrego do Cravo

Processos erosivos na região

A vulnerabilidade do solo, conjugada a um relevo mais montanhoso, favorece a ocorrência de processos erosivos intensos na região (FERREIRA, R.; FERREIRA, V., 2009b). A erosão hídrica, aparente com a ocorrência de inúmeras boçorocas, é o principal problema de degradação do solo na Bacia do Alto Rio Grande. Sua origem está ligada à mineração de ouro do século XVIII, à construção de estradas rurais sem planejamento, à divisão de propriedades por meio de valas e ao uso inadequado do solo (FERREIRA, R.; FERREIRA, V., 2009a).

Até o ano de 2009, foram identificadas 69 boçorocas em uma área de 345 ha no município de Nazareno (FERREIRA, R.; FERREIRA, V., 2009a). Ferreira et al. (2011) e Ferreira et al. (2002) atribuem as erosões de Nazareno aos seguintes fatores: solos altamente erodíveis; clima da região, cujo período de seca dificulta a manutenção da vegetação, deixando o solo desprotegido; antigas estradas construídas sem planejamento; áreas de mineração; valos; desmatamento; agropecuária extensiva; percepção do solo como fonte infinita de matéria prima por parte das comunidades locais; êxodo rural; e ocupação desordenada do território. Outro fator que contribui para a degradação do solo na região é a divergência entre o uso atual e sua real aptidão agrícola (GIAROLA et al.⁸, 1997 apud FERREIRA, FERREIRA, FERREIRA, 2012). A Figura 25 mostra algumas boçorocas existentes no município e região.

Figura 25 – Boçorocas existentes na região: a) Boçoroca observada da estrada que liga Nazareno a São João del Rei b) Boçoroca da Sapolândia c) Boçoroca da Copasa d) Boçoroca da Copasa com depósito de resíduos

⁸ GIAROLA, M.F.B.; CURTI, N.; SIQUEIRA, J.O.; CHAGAS, C.S.; FERREIRA, M.M. **Solos da região sob influência do reservatório da hidrelétrica de Itutinga/Camargos (MG): Perspectiva ambiental**. Lavras: CEMIG/UFLA/FAEPE, 1997. 101p.

Os sedimentos gerados pelos processos erosivos acarretam no assoreamento dos recursos hídricos, comprometendo o abastecimento de água e o aproveitamento dos reservatórios de Itutinga, Camargos e Funil (FERREIRA, R.; FERREIRA, V., 2009a). A erosão e a diminuição da disponibilidade hídrica prejudicam diretamente 84% das propriedades rurais da região dos Campos das Vertentes, das quais ocorrem boçorocas com nascentes em 78% (CARNIEL et al.⁹, 1994 apud FERREIRA, R.; FERREIRA, V., 2009a, p. 7).

Ferreira, L., Ferreira, R., e Ferreira, V. (2012) expõem que, como algumas boçorocas fazem parte da paisagem há mais de século, existe uma naturalização dessa situação. Dessa forma, não existe cobrança da população aos órgãos responsáveis e é comum na região empresas que não realizam a mitigação de seus passivos ambientais.

Programa Maria de Barro

O Programa Maria de Barro atua nas bacias hidrográficas do Alto Rio Grande (GD1) e Rio das Mortes (GD2), regiões com altos índices de boçorocas. Uma de suas prioridades é que a recuperação das áreas não tenha apenas uma perspectiva técnica, ecológica, jurídica e econômica, mas que abranja também uma dimensão educacional, política, cultural e social, através de um empoderamento da comunidade como agente ativo e responsável pelo meio que o cerca (FERREIRA, R.; FERREIRA, V., 2009b).

Como norteadores das ações desenvolvidas pelo projeto, estão o uso de técnicas e soluções simples e de baixo custo, integrando a tecnologia com a realidade e conhecimentos locais de forma que sejam eficientes e justifiquem o investimento público, sejam acessíveis e viáveis a pequenos agricultores familiares, e que possam ser adaptadas em outras boçorocas (FERREIRA, R.; FERREIRA, V., 2009a, 2009b).

Até 2008, o projeto já havia realizado intervenções em boçorocas da região em uma área de 35 ha. Esses locais foram posteriormente transformados em parques municipais, com o objetivo de se ter espaços de educação ambiental, pesquisas científicas e compartilhamento de informações técnicas (FERREIRA, R.; FERREIRA, V., 2009a).

A intervenção da Boçoroca do Córrego do Cravo foi financiada pelo BNDES como parte do projeto Controle e Estabilização de Voçorocas de Nazareno (FERREIRA, R.; FERREIRA, V., 2009b).

⁹ CARNIEL, T. et al. **Atividade agrícola e recursos naturais na região sob influência da hidrelétrica de Itutinga/Camargos**. Belo Horizonte: CEMIG/ESAL, 1994. 65 p.

Técnicas utilizadas pelo Projeto Maria de Barro

Antes da intervenção nas boçorocas, são definidos cinco ambientes de características específicas (FERREIRA, R.; FERREIRA, V., 2009a):

- Área de contribuição: Área a montante da boçoroca, da qual provêm as águas geradoras da erosão;

- Taludes instáveis: Encostas com declividade acima de 45°, de difícil acesso e onde ocorreram escorregamentos recentes. Nesses taludes há pouca cobertura vegetal, a qual é principalmente de pequeno porte e não estabilizada o suficiente para controlar os processos erosivos. São visíveis rachaduras no topo e parede do talude, e na base do talude costuma haver surgência de água. O solo exposto consiste basicamente do saprolito, com menos de um metro de horizontes A e B.

- Taludes estáveis: Encostas ramificadas com melhores drenagens e declividade menor que os taludes instáveis. Apresentam cobertura vegetal que varia desde vegetação rasteira a vegetação densa, com presença de árvores. A base dos taludes pode ser úmida devido à proximidade ao lençol freático.

- Áreas de deposição: Representam as áreas inferiores das encostas onde se acumulam os materiais erodidos e mobilizados. Apresentam uma declividade suave e o grau de estabilização depende dos movimentos nos taludes. Nos locais já estabilizados, pode existir uma vegetação rasteira. Geralmente são locais úmidos durante todo o ano;

- Baixadas úmidas: Locais de baixa declividade e sujeitos a alagamento.

As intervenções consistem em proteção da área, controle do escoamento, contenção das encostas e manejo da vegetação (FERREIRA, R.; FERREIRA, V., 2009a):

- Proteção da área: Isolamento do entorno da boçoroca através de cercamento;

- Controle do escoamento: Direcionamento do escoamento superficial e subsuperficial até bacias de captação e exutório da boçoroca através de canais;

- Canais: Dimensionados a partir da vazão das águas pluviais e escavados no topo da boçoroca, sendo protegidos com cobertura vegetal segundo a necessidade. No interior da boçoroca utilizam-se sacos de ráfia preenchidos com solo e cimento;

- Bacias de captação: construídas segundo o Projeto Barraginhas da EMBRAPA Sete Lagoas/MG (Figura 26);

- Condução de águas subsuperficiais: drenos de bambu enterrados nas áreas de drenagem das boçorocas;

- Contenção das encostas: Retaludamento nas áreas de grande instabilidade através da conformação das bordas e cortes, segundo a necessidade de cada talude, e realizado através de máquinas ou manualmente (Figura 27). Posteriormente, e em paralelo à revegetação dos taludes, são construídos diques no interior da boçoroca para dissipação de energia da água e retenção de sedimentos. Também são empregadas barreiras de paliçadas. Em locais de surgência de água subterrânea, utilizam-se paliçadas para proteger as nascentes. Paliçadas e sacos de ráfia empilhados também são instalados em locais de maior instabilidade e áreas de deposição, formando uma barreira aos movimentos de massa;

- Manejo da vegetação: Enriquecimento da cobertura vegetal através de plantio manual de sementes e mudas (Figura 28);

Figura 26 – Bacia de captação de água (FERREIRA, s.d.)

Foto: Projeto Maria de Barro

Foto: Projeto Maria de Barro

Figura 27 – Exemplo de técnicas de retaludamento manual em boçoroca

Figura 28 – Exemplo de técnica de plantio de mudas (FERREIRA, s.d.)

Intervenções realizadas na Boçoroca do Córrego do Cravo

Foram realizadas as seguintes intervenções na Boçoroca do Córrego do Cravo (FERREIRA, 2010):

Proteção da boçoroca:

Realizada com instalação de cercas ao redor da área.

Controle do escoamento superficial:

Foi feita a captação e condução de água ao redor da boçoroca. Para a drenagem superficial, foram feitos canais de drenagem de 0,5m de profundidade e 0,8m de largura (Figura 29), e construídas bacias de contenção de águas pluviais, conectadas pelos canais. Tais medidas de controle foram dimensionadas com base nos índices pluviométricos regionais, da vazão aproximada da água conduzida para o interior da boçoroca e de experiência de campo (FERREIRA, 2010, RELATÓRIO [...], 2007).

Na parte interna da boçoroca foram utilizados sacos de ráfia e paliçadas para dissipar a energia da água nos caminhos preferenciais (Figuras 30 e 34).

Figura 29 – Canal de drenagem

Foto: Projeto Maria de Barro

Figura 30 – Sacos de ráfia utilizados na parte interna da boçoroca

Contenção de encostas:

No interior da boçoroca foram construídas paliçadas com altura entre 0,8m e 1,5m e largura entre 1,5 e 3,0m. Tais paliçadas foram instaladas antes do retaludamento para que o transporte de sedimentos para os corpos d'água fosse menor. Dessa maneira, algumas paliçadas ficaram aterradas, contribuindo na drenagem subsuperficial e na resistência à movimentação do solo (FERREIRA, 2010).

O retaludamento foi feito com arredondamento das cristas de erosão e suavização da declividade para aproximadamente 70°, segundo a inclinação observada do terreno (Figura 31). Nos taludes considerados estáveis não foi feito o retaludamento (FERREIRA, 2010).

Manejo da vegetação:

O plantio foi realizado nas áreas de instabilidade com espécies nativas e exóticas. Foi realizada uma adubação orgânica e o plantio de mudas de espécies arbóreas e de sementes de gramíneas e leguminosas em berços abertos manualmente nos taludes (Figura 32) (FERREIRA, 2010).

As Figuras 33 e 34 apresentam as intervenções realizadas no talude onde ocorreu o escorregamento translacional e no talude contíguo.

Figura 31 – Retaludamento manual em talude da Boçoroca do Córrego do Cravo a) Quebra das cristas de talude a partir de degraus b) Degraus suavizados e novos degraus sendo feitos, a esquerda c) Talude suavizado

Foto: Projeto Maria de Barro

Figura 32 – Plantio de vegetação através de abertura de berços

Foto: Projeto Maria de Barro

Figura 33 – Intervenções no talude onde ocorreu o escorregamento translacional e talude contíguo

Foto: Projeto Maria de Barro

Figura 34 – Intervenções realizadas no talude onde ocorreu o escorregamento translacional: A - Paliçada B - Drenagem com sacos de rafia C - Suavização manual do talude

Segundo Ferreira, R. e Ferreira, V. (2009b), durante o período de intervenção já se observou uma redução de perda de solo, de deposição de resíduos e de queimadas na boçoroca e, um ano após a finalização do projeto, a boçoroca já apresentava uma vegetação bem estabelecida e em desenvolvimento.

A intervenção foi finalizada em 2009. Entretanto, em Janeiro de 2012 ocorreram escorregamentos no local após chuvas intensas que atingiram a região. Ocorreram dois escorregamentos maiores, um rotacional e um translacional, e outros menores. Em Setembro do mesmo ano ocorreu um incêndio que queimou a maior parte da vegetação da boçoroca. Em 2013 os taludes foram revegetados.

A Figura 35 apresenta uma sequência de fotos da boçoroca de Janeiro de 2007 a Setembro de 2012. A Figura 36 apresenta a boçoroca em Julho de 2013, a partir de outro ângulo. A Figura 37 apresenta a evolução dos dois escorregamentos no período entre Julho de 2012 e Julho de 2013.

Figura 35 – Boçoroca do Córrego do Cravo (a) Janeiro/2007 (b) Janeiro/2010 (c) Julho/2012 (d) Setembro/2012

Figura 36 – Boçoroca do Córrego do Cravo em Julho de 2013

Figura 37 – Escorregamentos translacional e rotacional (a) Julho/2012 (b) Setembro/2012 (c) Novembro/2012 (d) Julho/2013

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Campanhas de campo

Foram realizadas três campanhas de campo para reconhecimento da área, análise dos pontos de interesse e coleta de amostras. Nessas visitas, também se obteve material sobre o histórico da boçoroca, o projeto de intervenção realizado e fotografias com o Projeto Maria de Barro.

Foram definidos quatro pontos de interesse, com diferentes condições de estabilidade, para realizar uma análise detalhada: o escorregamento rotacional, o escorregamento translacional, um talude estável contíguo ao escorregamento translacional e um ponto próximo a erosões subsuperficiais e afundamentos.

Nesses pontos, foram observados os seguintes aspectos: cobertura vegetal; características hidrológicas; morfologia; dimensões e direção do talude; foliações e bandamentos; rupturas, planos de fraqueza e sulcos; perfil de alteração; atributos desfavoráveis à estabilidade dos taludes; medidas de controle adotadas. Os dados foram obtidos com o auxílio de topofil, trena, bússola, clinômetro e GPS (Figuras 38, 39 e 40).

Figura 38 – Medição das dimensões de um talude com o uso de topofil (centro da imagem) e trena (seta à direita da imagem)

Figura 39 – Topofil empregado para auxiliar nas medições

Figura 40 – Medição de direção de bandamentos

5.2 Amostragem

Escorregamento rotacional

No escorregamento rotacional foi coletada uma amostra deformada no topo do talude e, devido à dificuldade de coletar amostras indeformadas precisamente no topo, as demais amostras foram coletadas em um local próximo (Figura 41). Para isso, foi escavada uma vala onde se coletou uma amostra deformada e cinco indeformadas, quatro para ensaio de erodibilidade e uma para massa específica.

Figura 41 – Vala aberta para amostragem na parte superior do escorregamento rotacional

No saprolito da base do talude, onde o material não foi mobilizado, coletou-se uma amostra deformada, duas indeformadas para ensaio de erodibilidade (Figura 42a) e uma indeformada para ensaio de massa específica (Figura 42b). No material que foi mobilizado pelo escorregamento, foi coletada uma amostra deformada.

Escorregamento translacional

Devido a dificuldades de acesso, não foi possível chegar precisamente ao topo do escorregamento translacional. Dessa forma, as amostras foram coletadas em outro ponto da parte superior desse talude, que aparentava ser uma transição entre o saprolito e o solo laterizado assim como se observou no topo do escorregamento (Figura 43). Foram coletadas uma amostra deformada e duas indeformadas para ensaio de erodibilidade (Figura 44).

Figura 43 – Coleta de amostra no topo do talude onde ocorreu o escorregamento translacional

Na base do talude foram coletadas amostras no saprolito e no material mobilizado. Devido à friabilidade do solo, foi possível coletar apenas uma amostra indeformada para o ensaio de erodibilidade, no saprolito, além de três amostras deformadas, uma no saprolito e duas no material mobilizado.

Figura 44 – Amostras indeformadas para o ensaio de erodibilidade

Talude estável adjacente ao escorregamento translacional

No topo do talude coletou-se uma amostra deformada e uma indeformada, para ensaio de erodibilidade. Na base desse talude, a declividade e a densa vegetação na parte acessível não possibilitaram a coleta de amostras indeformadas, dessa forma, neste ponto coletaram-se apenas duas amostras deformadas.

Material próximo a afundamentos

Nos pontos de erosão subsuperficial e afundamentos observou-se uma heterogeneidade horizontal de materiais. Foram coletadas quatro amostras deformadas, quatro amostras indeformadas para análise de erodibilidade e uma amostra indeformada para determinação de massa específica (Figura 45).

Figura 45 – Amostras indeformadas coletadas em ponto próximo a um afundamento

As Figuras 46 e 47 apresentam os pontos amostrados na boçoroca. O Quadro 4 apresenta as amostras coletadas em cada ponto com a respectiva localização.

Figura 46 – Localização dos pontos de coleta (a) escorregamento rotacional (b) escorregamento translacional (ao fundo) e talude adjacente (à esquerda)

Figura 47 – Pontos amostrados na Boçoroca do Córrego do Cravo

	Ponto	Coordenadas UTM (23K) Altitude	Descrição	Tipo de amostra	Foto
ROTACIONAL	Topo	E541118 N7653235 911m	Latossolo. Friável, de coloração vermelho escuro.	D(1) E(4) M(1)
	Base	E541110 N7653258 898m	Saprolito de baixa coesão, provável alteração de gnaiss-migmatito. Material heterogêneo com bandamento.	D(1) E(2) M(1)
		E541137 N7653266	Material mobilizado pelo escorregamento	D(1)	
TRANSLACIONAL	Topo	E541038 N7653350 897m	Material de transição entre saprolito e latossolo. Cor vermelho claro.	D(1) E(2)
	Base	E540996 N7653426 916m	Saprolito de gnaiss. Material muito fraturado, com bandamentos.	D(1) E(1)
		E 541036 N 7653437	Material mobilizado pelo escorregamento	D(2)	
ESTÁVEL	Topo	E541055 N7653381 956m	Talco-xisto intemperizado (alto grau de alteração).	D(1) E(1)
	Base	E541058 N7653398 909m	Mistura de talco-xisto, quartzo, saprolito.	D(2)
EROSÃO INTERNA	RX	E541046 N7653459 906m	Material roxo, com bandamento roxo escuro, branco e amarelo. Muito resistente, com possível presença de ferro e magnetita.	D(1)
	RXRS	E541046 N7653459 906m	Transição entre o material roxo, resistente, e o rosa, mais friável. Coloração rosa, com manchas amarelas e brancas.	D(1) E(1)
	RS	E541046 N7653459 906m	Solo friável, de coloração rosa variegado (branco, bege e preto), com concentração de diferentes materiais (biotita).	D(1) E(1)
	BCO	E541046 N7653459 906m	Solo arenoso, de textura sacaroidal. Friável, quartzoso, de coloração branca.	D(1) E(3) M(1)
D = Deformada E = Anel de erodibilidade M = Anel de massa específica (1) = Número de amostras					

Quadro 4 – Amostras coletadas para ensaios de laboratório

5.3 Ensaios de laboratório

5.3.1 Ensaios geotécnicos

Os seguintes ensaios foram realizados de acordo com a normatização da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT): determinação de massa específica, conforme a ABNT NBR 6508; granulometria, conforme a ABNT NBR 7181; limite de liquidez (LL), conforme a ABNT NBR 6459; e limite de plasticidade (LP), conforme a ABNT NBR 7180 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984b, 1984d, 1984a, 1984c). Os ensaios de massa específica, limite de liquidez e limite de plasticidade foram realizados com secagem prévia ao ar. Os resultados foram trabalhados e analisados segundo as respectivas Normas.

O ensaio de erodibilidade foi realizado segundo Pejon (1992) em conjunto com Ligia de Freitas Sampaio (SAMPAIO, 2014). As amostras indeformadas foram obtidas através da cravação de um cilindro de PVC rígido com 40 mm de diâmetro e 20 mm de altura. Antes da realização do ensaio, as amostras foram secas ao ar durante 7 dias.

A primeira etapa do ensaio consiste na absorção de água da amostra. O equipamento utilizado consiste em um recipiente cilíndrico, de mesmas dimensões que o tubo de PVC, conectado a um tubo de vidro horizontal graduado. O conjunto foi preenchido com água e na extremidade do recipiente colocou-se uma pedra porosa saturada (Figura 48).

Foto: Ligia Sampaio

Figura 48 – Equipamento utilizado para ensaio de erodibilidade - absorção de água

A amostra foi pesada com o tubo de PVC e colocada sobre a pedra porosa, momento em que se iniciou a contagem de tempo. A leitura do volume de água absorvida foi feita em intervalos de tempo até o momento em que se observou que a água havia atingido o topo da amostra. O índice de absorção (S) foi obtido através de um gráfico do volume de água absorvido por unidade de área da base do corpo de prova (q) em função da raiz quadrada do tempo:

$$S = \frac{q}{\sqrt{t}}$$

Na segunda etapa do ensaio, imergiu-se a amostra, ainda no tubo de PVC, em um tanque de água de forma que seu topo ficasse na vertical. A amostra foi colocada acima de um recipiente menor para coleta do material que se desprende da superfície livre (Figura 49). Após 24 horas, retirou-se as amostras do tanque, secando-as em estufa. A partir da massa seca, determinou-se a perda de peso em porcentagem em relação ao material inicial seco da amostra (P).

Figura 49 – Ensaio de erodibilidade - perda de peso por imersão

O índice de erodibilidade (E) das amostras analisadas foi calculado a partir da equação proposta por Pejon (1992):

$$E = 40 \times \frac{S}{P}$$

O valor de E menor que 1 indica que o material apresenta alta erodibilidade. No caso de um valor maior que 1, o material tem baixa erodibilidade.

5.3.2 Ensaio mineralógicos

Foram realizados quatro ensaios mineralógicos para, em análise conjunta, identificar os argilominerais presentes nas amostras. Foram realizados os ensaios: análise térmica diferencial (ATD), análise térmica gravimétrica (ATG), difração de raios-X (DRX) e adsorção de azul de metileno.

A análise térmica diferencial e a análise térmica gravimétrica foram realizadas empregando-se o equipamento BP Engenharia, com uma velocidade de aquecimento de 12,5°C/min e amostras passadas na peneira #200, com secagem prévia. Os resultados foram analisados conforme Mackenzie (1937) e Santos (1975).

A difração de raio-X foi realizada no equipamento Rigaku, modelo Ultima IV, com monocromador de grafite e tubo de cobre com comprimento de onda de 1.54Å. Foi realizada varredura normal 2theta/theta com ângulo variando de 5° a 100°, a velocidade de 2°/min. Na preparação do ensaio, as amostras foram passadas na peneira #400 e separadas em três lâminas orientadas, submetidas a tratamentos diferentes: secagem natural; saturada com etilenoglicol; e à temperatura de 550°C por uma hora.

O ensaio de adsorção de azul de metileno foi realizado de acordo com Pejon (1992) e é realizado para a caracterização do comportamento físico-químico da fração fina dos solos.

Para a realização do ensaio, as amostras foram preparadas com secagem prévia ao ar e passadas na peneira #10. Antes do ensaio, determinou-se o teor de umidade da amostra para obtenção do valor da massa seca utilizada.

Pesou-se entre 1g e 3g de amostra, colocou-se em um becker de 100mL e adicionou-se 10mL de água destilada. Posicionou-se o becker sobre um agitador magnético de forma a manter a suspensão em agitação por aproximadamente três minutos. Adicionou-se uma quantidade de solução de azul de metileno (concentração de 1,5 g/L) ao becker e manteve-se a suspensão em agitação por mais 3 minutos.

Em seguida, com auxílio de um bastão de vidro, retirou-se uma gota da suspensão colocando-a sobre um papel de filtro para cristais finos (Watmann's 42). Se a gota formasse uma mancha azul escura, o resultado era considerado negativo e repetia-se o procedimento com adição de mais solução de azul de metileno.

Ao apresentar uma auréola azul claro, o resultado era considerado positivo. Nesse caso, esperavam-se mais 3 minutos e repetia-se o teste. No caso de novo resultado positivo, o ensaio era finalizado, caso contrário, adicionava-se mais 0,5 mL de azul de metileno e repetia-

se o procedimento até atingir o resultado positivo. Para determinação do volume de azul de metileno utilizado, empregou-se uma bureta graduada.

Com os valores da massa seca e do volume de azul de metileno adicionado calcularam-se os seguintes parâmetros:

Capacidade de troca catiônica (CTC)

A equação utilizada para a determinação da capacidade de troca catiônica é apresentada a seguir:

$$CTC = \frac{V \times C \times 100}{M}$$

CTC: Capacidade de troca catiônica da amostra (meq/100g)

V: Volume da solução de azul de metileno utilizado (mL);

C: Concentração da solução de azul de metileno (N);

M: Massa de solo seco (g).

Para determinar a capacidade de troca catiônica da fração argila, divide-se a CTC do solo pela porcentagem de argila na amostra. Assim:

$$CTC_{arg} = \frac{CTC}{\%arg}$$

A identificação dos argilominerais foi feita segundo os Quadros 5 e 6.

Argila	CTC (meq/100g)
Caolinita	3 – 15
Haloisita 2H ₂ O	5 – 10
Haloisita 4H ₂ O	10 – 40
Ilita	10 – 40
Montmorilonita	80 – 150
Clorita	10 – 40
Atapulgita	20 – 30
Vermiculita	100 – 150

Quadro 5 – Intervalos de CTC (BEALIEU¹⁰, 1979 apud PEJON, 1992)

¹⁰ BEAULIEU, J. **Identification géotechnique de matériaux argileux naturels par la mesure de leur surface au moyen du bleu de méthylène**. 1979. 133p. Tese (Doutorado) - Univ. de Paris-Sud, Orsay, 1979

Mineral	CTC (cmol/kg)	SE (m ² /g ¹)
Caulinita	3-15	10-20
Haloisita	5-50	21-43
Ilita	10-40	70-120
Clorita	10-40	79-150
Vermiculita	100-150	300-500
Esmectita	60-150	700-800
Alofana	25-70	70-300

Quadro 6 – Intervalos de CTC e SE (RESENDE ET AL, 1997)

Superfície específica (SE)

O cálculo para a determinação da superfície específica é realizado a partir da seguinte equação:

$$SE = \frac{SE_A \times V}{M}$$

SE: Superfície específica (m²/g);

SE_A: Superfície específica recoberta por 1mL da solução de azul de metileno na concentração de 1,5 g/L (3,67 m²/mL);

V: Volume da solução de azul de metileno utilizado (mL);

M: Massa do solo seco (g).

Os valores obtidos foram analisados segundo o Quadro 6.

Valor da adsorção do azul de metileno (Vb)

O valor de adsorção de azul de metileno foi calculado conforme apresentado pela equação a seguir:

$$Vb = \frac{1,5 \times V \times 100}{M \times 1000}$$

Vb: Valor da adsorção do azul de metileno (g/100g de solo);

V: Volume da solução de azul de metileno utilizado (mL);

M: Massa do solo seco (g).

Lautrin¹¹ (1987 apud PEJON, 1992) associa este parâmetro com a mineralogia das argilas. A Figura 50 apresenta a relação entre a composição mineralógica da fração argila e a adsorção do azul de metileno.

Figura 50 – Influência da mineralogia das argilas sobre a adsorção de azul de metileno (LAUTRIN, 1987 apud PEJON, 1992)

Atividade da fração argila

A caracterização da atividade da fração argila através da quantidade de azul de metileno adsorvido por 100 gramas de argila é feita a partir da seguinte expressão:

$$Acb = \frac{100 \times Vb}{\%Arg}$$

Acb: Atividade da fração argila (g/100g);

Vb: Valor de azul de metileno adsorvido (g/100g de solo);

% Arg: Porcentagem de argila na amostra

¹¹ LAUTRIN, D. Une procédure rapide d'identification des argiles. **Bull. Labo. P. et. Ch.** 152, pp.75-84, Nov/Déc. 1987.

Lautrin¹² (1989 apud PEJON, 1992) elaborou o diagrama apresentado na Figura 51 que caracteriza a atividade da fração fina dos solos e estima sua composição.

Figura 51 – Diagrama da atividade das argilas pelo método do azul de metileno (LAUTRIN, 1989 apud PEJON, 1992)

¹²LAUTRIN, D. Utilisation pratique des paramètres dérivés de l'essai au bleu de méthylène dans les projets de génie civil. **Bull. Labo. P. et. Ch.** 152, pp.53-65, Fevr/Mars. 1989.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Caracterização da boçoroca

A boçoroca é caracterizada pelo contato bem definido entre o saprolito e o solo laterítico (Figura 52). Na maior parte da área, a base dos taludes encontra-se com material mobilizado e, em muitos pontos da boçoroca, o solo laterizado já foi inteiramente removido (Figura 53).

Além dos escorregamentos maiores, foram observados outros taludes com problemas de estabilidade, como sulcos, trincas ou escorregamentos menores (Figura 54). Também foi possível identificar três cursos d'água e dois pontos com água parada (Figura 55).

A porção norte da boçoroca está mais estabilizada e apresenta uma vegetação bem desenvolvida. Entretanto, mesmo nesse ponto foi possível observar a presença de afundamentos (Figura 56).

Figura 52 – Solo laterítico e saprolito expostos em talude da boçoroca

Figura 53 – Talude da boçoroca em saprolito

Figura 54 – Taludes com problemas de estabilidade

Figura 55 – Corpos d'água (a) Canal interno (b) Área alagada

Figura 56 – Porção norte da boçoroca e afundamento observado no meio da vegetação

6.1.1 Talude com escorregamento rotacional

A parte da boçoroca onde ocorreu o escorregamento rotacional apresenta uma evolução em anfiteatro, como mostra a Figura 57. Neste ponto, o solo laterizado ainda está presente com uma espessura significativa. O Quadro 7 resume as principais características descritivas desse talude obtidas nas visitas de campo.

Figura 57 – Evolução em anfiteatro da boçoroca (escorregamento rotacional em destaque)

TALUDE - ESCORREGAMENTO ROTACIONAL		
Coordenadas geográficas: 541110E 23K 7653258N		
Cobertura vegetal Plantio: Herbáceas - Braquiária, aveia preta, nabo forrageiro, capim gordura	Características hidrológicas Topo do talude: umidade baixa Meio do talude: umidade média Base do talude: umidade elevada A jusante do material mobilizado: afloramento de água	
Morfologia Forma da encosta Perfil da encosta côncavo e linhas de nível côncavas		
Morfometria Altura 19m Largura 26,5m		
Direção do plano do talude N303° Rumo de mergulho 33°SW Declividade 90°		
Perfil de alteração		
Latossolo - Material laterítico, vermelho, seco, com presença de fissuras		
Saprolito de gnaiss - Material heterogêneo de baixa coesão, úmido, com bandamentos de coloração amarela, branca e rosa, vertical e direção N28°. Presença de raízes e fissuras que formam caminhos preferenciais		
Solo		
Textura Siltosa e argilosa	Origem Residual	Coesão De baixa a alta
Propriedades desfavoráveis à estabilidade do talude Caminhos preferenciais gerados pelas raízes da vegetação Desconfinamento do solo Aumento do escoamento superficial devido à plantação de café a montante do talude Concentração de água devido à forma côncava da encosta		
Medidas de controle adotadas no projeto de intervenção		
Tipo	Observação	
Canal de drenagem no topo do talude	Em visita a campo, observou-se que o canal estava rompido na altura do topo do talude	
Suavização do talude	Talude com alta declividade	
Plantio de vegetação por berços	Vegetação estabilizada

Quadro 7 – Caracterização descritiva do talude onde ocorreu o escorregamento rotacional

O topo do talude corresponde a um latossolo bastante evoluído, laterizado, de coloração vermelho escuro. Embora apresente grande resistência, são observadas trincas e fendas de tração no local (Figuras 58 e 59). O Quadro 8 apresenta os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais realizados com as amostras coletadas no local.

A Figura 60 apresenta a análise granulométrica das amostras. A Figura 61 apresenta os resultados obtidos no ensaio de Casagrande, para determinação do limite de liquidez. A Figura 62 apresenta as curvas de ATD.

Figura 58 – Trincas na parte superior do talude onde ocorreu o escorregamento rotacional

Figura 59 – Fendas de tração no topo do talude

ESCORREGAMENTO ROTACIONAL – TOPO DO TALUDE				
ENSAIOS FÍSICOS				
Índices Físicos				
ρ_s (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	Sr (%)
2,71	1,08	1,51	60,2	42,1
2,72				
2,73				
Granulometria				
Argila (%)	Silte (%)	Areia fina (%)	Areia média (%)	Areia grossa (%)
60	20	12	6	2
58	23	11	5	3
55	21	14	8	2
Limites de consistência				
LL (%)	LP (%)		IP (%)	
46	37		9	
46	35		11	
46	36		10	
Erodibilidade				
E	$Indicativo$			
0,350	Alta erodibilidade			
ENSAIOS MINERALÓGICOS				
Azul de metileno				
CTC_{Arg} (meq/100g)	SE (m ² /g)	Vb (g/100g)	Acb (g/100g)	$Atividade$
2,75	12,87	0,53	0,88	Não argiloso
3,14	14,22	0,58	1	Inativas
2,78	11,95	0,49	0,89	Não argiloso
Argilominerais identificados				
Azul de metileno		Caulinita		
ATD		Caulinita, Goethita, Gibbsita		

Quadro 8 – Caracterização laboratorial do solo laterítico encontrado no topo do talude onde ocorreu o escorregamento rotacional

Figura 60 – Análise granulométrica - Topo do talude onde ocorreu o escorregamento rotacional

Figura 61 – Limite de liquidez (Casagrande) - Topo do talude onde ocorreu o escorregamento rotacional

Figura 62 – ATD - Topo do talude onde ocorreu o escorregamento rotacional

A base do talude corresponde a um saprolito de gnaiss, muito friável, heterogêneo e com presença de bandamentos (Figura 63). O Quadro 9 apresenta os resultados dos ensaios realizados com esse material.

A Figura 64 apresenta a análise granulométrica das amostras. A Figura 65 apresenta os resultados obtidos no ensaio de Casagrande, para determinação do limite de liquidez. A Figura 66 apresenta as curvas da ATD e a Figura 67 os gráficos obtidos no ensaio de DRX.

Figura 63 – Bandamento no saprolito da base do talude rotacional

ESCORREGAMENTO ROTACIONAL – BASE DO TALUDE				
ENSAIOS FÍSICOS				
Índices Físicos				
ρ_s (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	Sr (%)
2,71	1,25	1,17	53,8	63,3
Granulometria				
<i>Argila</i> (%)	<i>Silte</i> (%)	<i>Areia fina</i> (%)	<i>Areia média</i> (%)	<i>Areia grossa</i> (%)
4	78	15	3	0
Limites de consistência				
<i>LL</i> (%)		<i>LP</i> (%)		<i>IP</i> (%)
52		30		22
Erodibilidade				
<i>E</i>		<i>Indicativo</i>		
0,043		Alta erodibilidade		
ENSAIOS MINERALÓGICOS				
Azul de metileno				
<i>CTC</i> Arg (meq/100g)	<i>SE</i> (m ² /g)	<i>Vb</i> (g/100g)	<i>Acb</i> (g/100g)	<i>Atividade</i>
64,40	20,12	0,82	20,55	Nocivas
Argilominerais identificados				
Azul de metileno		Interestratificado (Caulinita, Esnectita)		
ATD		Caulinita		
DRX		Haloisita, Ilita, Caulinita, Quartzo, Muscovita, Biotita, Micas		

Quadro 9 – Caracterização laboratorial do saprolito presente na base do talude onde ocorreu o escorregamento rotacional

Figura 64 – Análise granulométrica - Base do talude onde ocorreu o escorregamento rotacional

Figura 65 – Limite de liquidez (Casagrande) - Base do talude onde ocorreu o escorregamento rotacional

Figura 66 – ATD - Base do talude onde ocorreu o escorregamento rotacional

(a)

(b)

(c)

Figura 67 – DRX - Base do talude onde ocorreu o escorregamento rotacional.
Tratamentos: (a) Natural (b) Etilenoglicol (c) 550°C

Os resultados obtidos com o material mobilizado no escorregamento rotacional estão apresentados separadamente dos demais resultados do talude uma vez que pode haver mistura do material do topo com o da base do talude. Assim, o Quadro 10 apresenta os resultados dos ensaios realizados com a amostra coletada no material mobilizado pelo escorregamento.

A Figura 68 apresenta a análise granulométrica das amostras. A Figura 69 apresenta os resultados obtidos no ensaio de Casagrande, para determinação do limite de liquidez. A Figura 70 apresenta as curvas de ATD e ATG e a Figura 71 apresenta os resultados do ensaio de DRX.

ESCORREGAMENTO ROTACIONAL – MATERIAL MOBILIZADO				
ENSAIOS FÍSICOS				
Índices Físicos				
ρ_s (g/cm ³)				
2,66				
Granulometria				
<i>Argila</i> (%)	<i>Silte</i> (%)	<i>Areia fina</i> (%)	<i>Areia média</i> (%)	<i>Areia grossa</i> (%)
14	62	13	11	0
Limites de consistência				
<i>LL</i> (%)		<i>LP</i> (%)		<i>IP</i> (%)
48		32		16
ENSAIOS MINERALÓGICOS				
Azul de metileno				
<i>CTCArg</i> (meq/100g)	<i>SE</i> (m ² /g)	<i>Vb</i> (g/100g)	<i>Acb</i> (g/100g)	<i>Atividade</i>
17,68	19,33	0,79	5,64	Normais
Argilominerais identificados				
Azul de metileno		Caulinita, Haloisita, Ilita		
ATD		Caulinita, Gibsita		
DRX		Caulinita, Haloisita, Ilita, Quartzo, Micas, Feldspato K, Feldspato Na-Ca, Gibsita, Muscovita, Biotita		

Quadro 10 – Caracterização laboratorial do material mobilizado no escorregamento rotacional

Figura 68 – Análise granulométrica - Material mobilizado no escorregamento rotacional

Figura 69 – Limite de liquidez (Casagrande) - Material mobilizado no escorregamento rotacional

(a)

(b)

Figura 70 – (a) ATD e (b) ATG - Material mobilizado no escorregamento rotacional

(a)

(b)

(c)

Figura 71 – DRX do material mobilizado no escorregamento rotacional. Tratamentos: (a) Natural (b) Etilenoglicol (c) 550°C.

O topo do talude consiste em uma camada espessa de solo laterítico. Os ensaios realizados com as amostras coletadas nesse ponto indicaram presença de caulinita e óxidos de alumínio e ferro, os quais aumentam a coesão do solo e conferem estabilidade (BIGARELLA; BECKER; SANTOS, 2007a; MORAIS; BACELLAR; SOBREIRA, 2007). Por outro lado, essa camada forma uma crosta que diminui a infiltração e aumenta, assim, o escoamento superficial. Esse aspecto, somado à alta erodibilidade do material indicada nos ensaios, pode estar auxiliando na erosão do solo.

O escoamento superficial nesse ponto, em direção ao talude, também pode ser acentuado devido à estrada que separa a área da boçoroca do cafezal. Embora no topo do talude exista um canal de drenagem, em visita a campo observou-se que ele estava rompida na direção da cabeceira do talude, de forma que a água possivelmente se desvia para o talude.

Além disso, a forma da encosta é côncavo-côncava, fator que concentra ainda mais a água na base do talude. Esses aspectos, em conjunto, podem estar aumentando a umidade na base do talude, saturando o saprolito. Assim, o grau de saturação na base do talude é maior que o do topo, como indicado nos resultados dos ensaios.

A base do talude é um saprolito de gnaiss com presença de argilominerais nocivos. Esse material é muito siltoso, suscetível à erosão e, segundo Moraes, Bacellar e Sobreira (2007), pouco estável quando saturado, favorecendo a ocorrência de escorregamentos rotacionais.

As características do perfil de intemperismo e do processo que ocorre se assemelham às condições analisadas por Moraes, Bacellar e Santos (2007). Assim, supõe-se que o modelo proposto pelos autores possa se aplicar nesse ponto. Segundo eles, o saprolito proveniente de rocha gnaiss, ao saturar, se instabiliza, levando ao aparecimento de fendas de tração no latossolo do topo do talude e posterior colapso do material com o escorregamento rotacional. A Figura 72 apresenta um esquema do processo que possivelmente ocorre neste ponto.

Figura 72 – Possível processo de como ocorre o escorregamento rotacional

6.1.2 Talude com escorregamento translacional

No talude onde ocorreu o escorregamento translacional, o material do topo é uma transição entre o solo laterítico e o saprolito. O restante do talude consiste em um material de coloração clara, variando entre branco, rosa e roxo, com finos bandamentos. O material é muito fraturado e observaram-se sulcos no talude (Figura 73). O Quadro 11 resume as principais características descritivas desse talude obtidas nas visitas de campo.

Figura 73 – Material observado no escorregamento translacional

ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL		
Coordenadas geográficas: 540996E 23K 7653426N		
Cobertura vegetal Plantio de herbáceas. Presença de algumas arbustivas no topo do talude.	Características hidrológicas Talude: seco A jusante da base do talude há um corpo d'água	
Morfologia Forma da encosta Perfil da encosta retilíneo, linhas de nível convexas.		
Morfometria Altura 30m Largura 17m	Direção do plano do talude N103° Rumo do mergulho 13°NE Declividade 25°	
Perfil de alteração		
Transição entre latossolo e saprolito – Material friável, de coloração laranja. Pequena espessura.		
Saprolito de gnaiss – Material friável, de coloração branca e roxa com bandamentos.		
Solo		
Textura Siltoso	Origem Residual	Coesão Baixa
Propriedades desfavoráveis à estabilidade do talude Desconfinamento do solo Presença de planos de ruptura Infiltração de água nos sulcos Saturação do solo		
Medidas de controle adotadas no projeto de intervenção		
Tipo	Observação	
Suavização do talude	A inclinação do talude pode não estar adequada para esse tipo de material	
Plantio de herbáceas	Pouco desenvolvimento da vegetação	
Drenagem lateral, na parte interna da boçoroca, com sacos de ráfia e paliçada	Observou-se que a paliçada estava rompida, supõe-se que seja devido à queimada que atingiu a boçoroca em 2012

Quadro 11 – Caracterização descritiva do talude onde ocorreu o escorregamento translacional

O Quadro 12 apresenta a caracterização laboratorial do material coletado próximo ao topo do talude onde ocorreu o escorregamento translacional.

ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL - TOPO				
ENSAIOS FÍSICOS				
Índices Físicos				
ρ_s (g/cm ³)				
2,60				
Granulometria				
<i>Argila</i> (%)	<i>Silte</i> (%)	<i>Areia fina</i> (%)	<i>Areia média</i> (%)	<i>Areia grossa</i> (%)
56	20	14	8	2
Limites de consistência				
<i>LL</i> (%)		<i>LP</i> (%)		<i>IP</i> (%)
47		38		9
Erodibilidade				
<i>E</i>		<i>Indicativo</i>		
28,90		Não erodível		
ENSAIOS MINERALÓGICOS				
Azul de metileno				
<i>CTCArg</i> (meq/100g)	<i>SE</i> (m ² /g)	<i>Vb</i> (g/100g)	<i>Acb</i> (g/100g)	<i>Atividade</i>
3,40	14,86	0,61	1,08	Inativas
Argilominerais identificados				
Azul de metileno		Caulinita, Óxidos		
ATD		Caulinita, Goetita, Gibsita		

Quadro 12 – Caracterização laboratorial do material presente do topo do escorregamento translacional

A Figura 74 apresenta a análise granulométrica da amostra, a Figura 75 apresenta os resultados obtidos no ensaio de Casagrande, para determinação do limite de liquidez e a Figura 76 apresenta a curva de ATD.

Figura 74 – Análise granulométrica - Topo do escorregamento translacional

Figura 75 – Limite de liquidez (Casagrande) - Topo do escorregamento translacional

Figura 76 – ATD - Topo do escorregamento translacional

O Quadro 13 apresenta os resultados dos ensaios realizados com o saprolito do talude onde ocorreu o escorregamento translacional.

ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL – SAPROLITO				
ENSAIOS FÍSICOS				
Índices Físicos				
ρ_s (g/cm ³)				
2,69				
Granulometria				
Argila (%)	Silte (%)	Areia fina (%)	Areia média (%)	Areia grossa (%)
5	88	6	1	0
Limites de consistência				
LL (%)	LP (%)		IP (%)	
59	38		21	
Erodibilidade				
Ep	Indicativo			
0,038	Alta erodibilidade			
ENSAIOS MINERALÓGICOS				
Azul de metileno				
CTCArg (meq/100g)	SE (m ² /g)	Vb (g/100g)	Acb (g/100g)	Atividade
74,18	28,96	1,18	23,68	Nocivas
Argilominerais identificados				
Azul de metileno		Interestratificado (Caulinita, Haloisita, Esmectita)		
ATD		Caulinita		

Quadro 13 – Caracterização laboratorial do saprolito do talude onde ocorreu o escorregamento translacional

A Figura 77 apresenta a análise granulométrica das amostras. A Figura 78 apresenta os resultados obtidos no ensaio de Casagrande, para determinação do limite de liquidez. A Figura 79 apresenta a curva de ATD obtida com essa amostra.

O Quadro 14 apresenta os resultados dos ensaios realizados com o material mobilizado no escorregamento translacional.

ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL – MATERIAL MOBILIZADO				
ENSAIOS FÍSICOS				
Índices Físicos				
ρ_s (g/cm ³)				
2,69				
2,68				
Granulometria				
Argila (%)	Silte (%)	Areia fina (%)	Areia média (%)	Areia grossa (%)
8	64	14	14	0
8	61	15	16	0
Limites de consistência				
LL (%)	LP (%)		IP (%)	
49	35		14	
43	30		13	
ENSAIOS MINERALÓGICOS				
Azul de metileno				
CTCArg (meq/100g)	SE (m ² /g)	Vb (g/100g)	Acb (g/100g)	Atividade
38,13	23,82	0,97	12,17	Ativas
33,11	20,69	0,82	10,57	Ativas
Argilominerais identificados				
Azul de metileno		Caulinita, Haloisita, Ilita, Clorita		
ATD		Caulinita		
DRX		Haloisita, Muscovita, Feldspato K, Feldspato Na-Ca, Quartzo, Micas, Ilita, Gibsita, Clorita, Dolomita, Caulinita.		

Quadro 14 – Caracterização laboratorial do material mobilizado no escorregamento translacional

A Figura 80 apresenta a análise granulométrica das amostras. A Figura 81 apresenta os resultados obtidos no ensaio de Casagrande, para determinação do limite de liquidez. A Figura 82 apresenta as curvas de ATD e ATG e a Figura 83 os gráficos obtidos no ensaio de DRX.

Figura 80 – Análise granulométrica – Material mobilizado no escorregamento translacional

Figura 81 – Limite de liquidez (Casagrande) - Material mobilizado no escorregamento translacional

(a)

(b)

Figura 82 – (a) ATD e (b) ATG - Material mobilizado no escorregamento translacional

(a)

(b)

(c)

Figura 83 – DRX - Material mobilizado no escorregamento translacional.
Tratamentos: (a) Natural (b) Etilenoglicol (c) 550°C

O talude consiste basicamente na exposição do saprolito proveniente do gnaiss, sem vegetação bem estabelecida. No topo é visível apenas uma camada de transição entre o saprolito e o latossolo, a qual apresenta textura argilosa e presença de caulinita e óxidos de ferro e alumínio.

Observou-se em campo que o saprolito é muito friável e apresenta planos preferenciais de ruptura. Além disso, segundo os ensaios de laboratório, o material é siltoso, de alta erodibilidade e com presença de argilominerais ativos.

Na parte inferior do talude, onde está o material mobilizado, foram observados sulcos de erosão formados pelo escoamento superficial. Também se observou que em frente à base do talude o solo é muito úmido e há afloramento de água. Essas condições podem colaborar na saturação do saprolito e consequente solapamento do talude.

A Figura 84 apresenta o processo de escorregamento segundo os planos preferenciais.

Figura 84 – Possível processo de como ocorre o escorregamento translacional

6.1.3 Áreas sem escorregamentos

6.1.3.1 Talude estável adjacente ao escorregamento translacional

O Quadro 15 apresenta as características descritivas do talude observadas nas visitas de campo.

Observando-se este talude e outro contíguo, identificaram-se foliações de mesmo rumo de mergulho (Figura 85). O topo desses taludes apresenta uma morfologia mais arredondada e suave que a maior parte dos taludes da boçoroca.

Na parte superior do talude, o talco-xisto apresentou foliação na direção N33° (Figura 86) e alinhamento dos blocos de quartzo com direção N28° (Figura 87). O topo desse talude é retilíneo e não foram observadas trincas, sulcos ou afundamentos.

O Quadro 16 apresenta os resultados dos ensaios laboratoriais realizados com o material do topo do talude estável.

Figura 85 – Taludes com foliações

Figura 86 – Talco-xisto presente na parte superior do talude adjacente ao escorregamento translacional

Figura 87 – Alinhamento de blocos de quartzo

TALUDE ESTÁVEL – TOPO				
ENSAIOS FÍSICOS				
Índices Físicos				
ρ_s (g/cm ³)				
2,83				
Granulometria				
<i>Argila</i> (%)	<i>Silte</i> (%)	<i>Areia fina</i> (%)	<i>Areia média</i> (%)	<i>Areia grossa</i> (%)
5	84	8	2	1
Limites de consistência				
<i>LL</i> (%)		<i>LP</i> (%)		<i>IP</i> (%)
44		26		18
Erodibilidade				
<i>Ep</i>		<i>Indicativo</i>		
15,31		Não erodível		
ENSAIOS MINERALÓGICOS				
Azul de metileno				
<i>CTC</i> Arg (meq/100g)	<i>SE</i> (m ² /g)	<i>Vb</i> (g/100g)	<i>Acb</i> (g/100g)	<i>Atividade</i>
17,66	6,90	0,28	5,64	Normais
Argilomienrais identificados pelos ensaios de Azul de Metileno e ATD				
Azul de metileno		Haloisita, Ilita, Clorita, Caulinita		
ATD		Goetita, Gibsita		

Quadro 16 – Caracterização laboratorial do topo do talude estável

A Figura 88 apresenta a análise granulométrica das amostras. A Figura 89 apresenta os resultados obtidos no ensaio de Casagrande, para determinação do limite de liquidez. A Figura 90 apresenta a curva de ATD.

Figura 88 – Análise granulométrica - Topo do talude estável

Figura 89 – Limite de liquidez (Casagrande) - Topo do talude estável

Figura 90 – ATD - Topo do talude estável

Na parte inferior do talude, o material observado era uma mistura de saprolito, talco-xisto e quartzo (Figura 91). O Quadro 17 apresenta os resultados dos ensaios realizados com as amostras coletadas nesse ponto.

Figura 91 – Saproilito, talco-xisto e blocos de quartzo observados na base do talude

TALUDE ESTÁVEL – BASE				
ENSAIOS FÍSICOS				
Índices Físicos				
ρ_s (g/cm ³)				
2,76				
2,713				
Granulometria				
Argila (%)	Silte (%)	Areia fina (%)	Areia média (%)	Areia grossa (%)
38	49	8	3	2
23	69	5	2	1
Limites de consistência				
LL (%)	LP (%)		IP (%)	
45	33		12	
52	31		21	
ENSAIOS MINERALÓGICOS				
Azul de metileno				
CTCArg (meq/100g)	SE (m ² /g)	Vb (g/100g)	Acb (g/100g)	Atividade
5,04	14,96	0,61	1,61	Inativas
12,09	21,71	0,89	3,86	Pouco ativas
Argilominerais identificados				
Azul de metileno		Caulinita, Haloisita, Ilita		
ATD		Caulinita, Gibsita, Goetita		
DRX		Micas, Quartzo, Ilita, Muscovita, Feldspato K, Feldspato Na-CA, Gibsita, Caulinita, Clorita, Goetita, Talco		

Quadro 17 – Caracterização laboratorial da base do talude estável

A Figura 92 apresenta a análise granulométrica das amostras. A Figura 93 apresenta os resultados obtidos no ensaio de Casagrande, para determinação do limite de liquidez. A Figura 94 apresenta as curvas da ATD e ATG e a Figura 95 os gráficos obtidos no ensaio de DRX.

Figura 92 – Curva granulométrica - Base do talude estável

Figura 93 – Limite de liquidez (Casagrande) - Base do talude estável

(a)

(b)

Figura 94 – (a) ATD (b) ATG – Base do talude estável

(a)

(b)

(c)

Figura 95 – DRX - Base do talude estável com diferentes tratamentos: (a) Natural (b) Etilenoglicol (c) 550°C

Embora muito próximo ao escorregamento translacional, esse talude apresenta características bastante distintas e está aparentemente estável. O topo do talude consiste de uma transição entre saprolito e latossolo cortada por camadas de talco-xisto e quartzito. O solo não é erodível e apresenta boa coesão.

O quartzo é bastante resistente aos processos de intemperismo e confere estabilidade ao talude. Igualmente, o material proveniente do talco-xisto (silicato de magnésio hidratado) não se decompõe facilmente, é menos suscetível à erosão e colabora na estabilidade. Além disso, apresenta boa fertilidade, ajudando no estabelecimento da vegetação. Os argilominerais presentes nas amostras são estáveis, com presenças óxidos que aumentam a agregação do solo.

Uma vez que na base do talude também há saprolito, o qual é suscetível a solapamentos quando saturado, outro aspecto que auxilia na estabilidade desse ponto são as condições hídricas. A morfologia do talude, convexo-convexa, não favorece a concentração de água e na base não se observou afloramento de água ou elevada umidade do solo. Além disso, próximo ao topo do talude existe uma bacia de captação que contribui na diminuição de água escoada em direção ao talude.

6.1.3.2 Materiais próximos a afundamentos

Foram observados diversos pontos de afundamentos, formados pelo colapso do topo de erosões subsuperficiais. Ao longo desses afundamentos, foram observadas trincas que muitas vezes seguiam em direção à base dos taludes, formando caminhos preferenciais e aumentando a instabilidade da encosta (Figura 96).

Foram coletadas amostras próximas a um desses afundamentos (Figura 97). Neste ponto, observou-se uma variabilidade horizontal e vertical das propriedades do solo e a presença de bandamentos. Foram identificados três tipos diferentes de material, nomeados como BCO, RS e RX.

O material BCO é branco, arenoso e friável, de aspecto sacaroidal, e observou-se a presença de quartzo (Figura 98a). O material RS é rosado, homogêneo, mas com partes de concentração de materiais e possível presença de biotita (Figura 98b). O material RX apresentou uma coloração mais escura, entre roxo e marrom, com manchas brancas e amarelas. É muito resistente e aparenta conter ferro e magnetita (Figura 98c). Esse material apresentou bandamento com direção de mergulho de N43°, rumo de mergulho de 47°NW e inclinação de 80° (Figura 99).

O Quadro 18 apresenta as características descritivas dos materiais coletados próximos a esses afundamentos. Os resultados dos ensaios realizados estão apresentados no Quadro 19. O material RXRS refere-se à transição entre o material RX e o material RS.

Figura 96 – Afundamentos observados ao longo da boçoroca

Figura 97 – Afundamento adjacente ao ponto analisado

Figura 98 – Materiais analisados próximo a afundamento (a) BCO
(b) RS (c) RX

Figura 99 – Bandamentos no material RX

MATERIAL HETEROGÊNEO PRÓXIMO A EROSÕES SUBSUPERFICIAIS		
Coordenadas geográficas: 541046E 23K 7653459N		
Cobertura vegetal Herbáceas	Características hidrológicas Seco	
Variabilidade horizontal do material		
RX: Material resistente, roxo com bandamentos.	RS: Material rosa, friável, concentração de diferentes materiais (quartzo, biotita)	BCO: Material branco, friável, quartzoso, sacaroidal
RS: Material rosa, mais friável e menos resistente.		
Solo		
Textura Siltoso e arenoso	Coesão Variável – de muito coeso a muito friável	
Propriedades desfavoráveis à estabilidade do talude Heterogeneidade do material Presença de material muito friável		
Medidas de controle adotadas no projeto de intervenção		
Tipo	Observação	
Suavização dos taludes	Talude aparentemente estável, mas com presença de	
Plantio de herbáceas	afundamentos	
Observações		
Distância aproximada de 0,5m entre os materiais.

RX	RS	BCO

Quadro 18 – Caracterização descritiva de ponto próximo à erosão subsuperficial

MATERIAIS ENCONTRADOS PRÓXIMOS À EROÇÃO SUBSUPERFICIAL					
ENSAIOS FÍSICOS					
Índices Físicos					
	ρ_s (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	Sr (%)
RX	2,82	-	-	-	-
RXRS	2,76	-	-	-	-
RS	2,63	-	-	-	-
BCO	2,66	1,40	0,9	47,5	36,4
Granulometria					
	<i>Argila</i> (%)	<i>Silte</i> (%)	<i>Areia fina</i> (%)	<i>Areia média</i> (%)	<i>Areia grossa</i> (%)
RX	9	79	9	2	1
RXRS	7	69	14	7	3
RS	5	60	19	13	3
BCO	7	44	14	24	11
Limites de consistência					
	<i>LL</i> (%)		<i>LP</i> (%)		<i>IP</i> (%)
RX	56		37		19
RXRS	49		26		23
RS	38		23		15
BCO	32		20		12
Erodibilidade					
	<i>E</i>	<i>Indicativo</i>			
RS	0,04	Alta erodibilidade			
BCO	0,03	Alta erodibilidade			
ENSAIOS MINERALÓGICOS					
Azul de metileno					
	<i>CTCArg</i> (meq/100g)	<i>SE</i> (m ² /g)	<i>Vb</i> (g/100g)	<i>Acb</i> (g/100g)	<i>Atividade</i>
RX	40,52	28,48	1,16	12,93	Ativas
RXRS	28,00	15,31	0,63	8,94	Ativas
RS	35,08	13,7	0,56	11,2	Ativas
BCO	18,49	10,10	0,41	5,90	Normais
	Argilominerais identificados				
	Azul de metileno		ATD		
RX	Haloisita, Ilita		Caulinita		
RXRS	Haloisita, Ilita, Clorita, Caulinita		Caulinita		
RS	Haloisita, Ilita, Clorita, Caulinita		Caulinita		
BCO	Haloisita, Ilita, Caulinita		Caulinita		

Quadro 19 – Caracterização laboratorial dos materiais coletados próximo a erosão subsuperficial

A Figura 100 apresenta a análise granulométrica das amostras. A Figura 101 apresenta os resultados obtidos no ensaio de Casagrande, para determinação do limite de liquidez. A Figura 102 apresenta as curvas de ATD.

Figura 100 – Análise granulométrica - Materiais coletados próximos a erosão subsuperficial

Figura 101 – Limite de liquidez (Casagrande) - Materiais coletados próximos à erosão subsuperficial

Figura 102 – ATD - Materiais coletados próximos a erosão subsuperficial

Segundo os ensaios, os materiais analisados apresentam características favoráveis à instabilidade do solo. Todas as amostras são siltosas e a maioria possui argilominerais mais ativos. O ensaio de erodibilidade indicou que as amostras RS e BCO são altamente erodíveis. Além disso, apesar de estarem próximas umas às outras, apresentaram uma grande variabilidade quanto à resistência, coesão e limite de liquidez, o que também pode influenciar na estabilidade do maciço.

Devido à dificuldade de acesso, não foi possível analisar uma quantidade significativa de pontos para melhor entendimento do processo. Assim, considerando as características do material, a ausência de pontos de afloramento de água, e a proximidade do local à estrada que leva à boçoroca, levanta-se a hipótese de que esta estrada deve concentrar o escoamento superficial que, ao encontrar fissuras no terreno ou materiais mais permeáveis, infiltra e forma pequenos sulcos. Devido à baixa coesão e alta heterogeneidade de materiais, acredita-se que a água escava o solo internamente de maneira irregular, até o topo solapar (Figura 103). O modelo pode seguir aquele sugerido por Moraes, Bacellar e Sobreira (2007), os quais analisaram, em local com características semelhantes, erosões subsuperficiais que ocorrem apenas na parte não saturada de taludes, decorrentes do escoamento superficial concentrado da água da chuva.

Esses afundamentos foram observados em diversos pontos na porção norte da boçoroca, a qual está aparentemente estável, com vegetação bem estabelecida. As raízes da vegetação devem estar mantendo o solo agregado e evitando que os buracos colapsem. Entretanto, internamente pode haver avanço dos buracos, com risco do talude solapar e deixar o saprolito exposto, reativando a boçoroca neste local.

Figura 103 – Possível processo de como ocorre a evolução dos afundamentos

6.2 Considerações sobre as primeiras intervenções realizadas para estabilização dos taludes

Após a observação em campo dos pontos de instabilidade, identificaram-se algumas questões que merecem atenção especial na realização dos próximos projetos de estabilização.

Além dos agentes deflagradores, existem agentes condicionantes para que um movimento de massa ocorra. Dessa forma, torna-se necessária a identificação desses agentes para que eles sejam contemplados nos projetos de estabilização. O talude onde ocorreu o escorregamento translacional, por exemplo, apresenta planos preferenciais de ruptura que devem ser considerados no projeto de estabilização.

As encostas que apresentam sua base com certa umidade também podem ser definidas como taludes estáveis caso apresentem mais características que as enquadrem em tal categoria, segundo a classificação adotada na intervenção. Entretanto, essa condição sozinha já pode favorecer a instabilização do maciço. Dessa forma, tais locais devem ser analisados mais detalhadamente antes de serem classificados como estáveis, visto que estão mais suscetíveis à ocorrência de escorregamentos.

No projeto de recuperação, os taludes foram suavizados com o arredondamento das cristas da boçoroca conforme a inclinação encontrada no terreno, a qual pode chegar a 70°. Tal medida pode ser insuficiente em determinados taludes, que correm o risco de se instabilizar novamente caso a declividade adotada não seja adequada para o tipo de material presente. O solo laterítico e o saprolito de gnaiss, materiais mais abundantes na boçoroca, apresentam particularidades e ângulos de estabilidade diferentes, que devem ser considerados no projeto. Observou-se que ambos os taludes onde foram observados os escorregamentos apresentaram uma inclinação muito elevada, assim, esse pode ser um fator influente na ocorrência desses movimentos de massa.

Não foi feita uma análise da eficiência das intervenções de drenagem, entretanto, observou-se que o canal do topo do talude onde ocorreu o escorregamento rotacional estava rompido, fator que pode ter contribuído para a instabilização desse talude. Além disso, na lateral do talude não se observou canais de drenagem. Dessa forma, não há direcionamento do escoamento, o qual pode estar sendo encaminhado em direção ao talude. Entende-se que haja limitações de espaço físico para tal intervenção, devido à proximidade ao cafeeiro, por outro lado, sua ausência pode prejudicar a estabilidade do talude.

Tanto os canais de drenagem quanto as bacias de captação devem ser constantemente monitorados para que não haja problemas de rompimentos dos canais nem de uso indevido das bacias, como os pontos observados. No caso do descarte de esterco na bacia de captação, além de provocar a concentração de matéria orgânica, que pode contaminar o solo e a água subterrânea, também leva ao aterramento, de forma que a bacia pode vir a perder sua função de captação da água de chuva.

Como apresentado, a intervenção adotou práticas de suavização dos taludes e drenagem, mas não considerou a implantação de estruturas de reforço do maciço terroso. Tal medida seria interessante, visto que ela poderia auxiliar na estabilização dos taludes, principalmente nos pontos onde é mais difícil realizar o retaludamento e a declividade é acentuada.

Quanto ao plantio de sementes e mudas, observou-se que este foi feito sem uma posterior proteção do solo que fizesse o papel de serrapilheira. Assim, o solo fica constantemente exposto ao sol e à chuva, de forma a expor-se ao escoamento superficial, erosão e variação de temperatura e umidade. Consequentemente, o solo pode vir a ressecar, rachar ou ainda ter as sementes e os sedimentos carregados pela água. O talude onde ocorreu o escorregamento translacional, por exemplo, apresenta um material muito friável, de baixa coesão. Nele, foram observados sulcos e trincas formando caminhos preferenciais que podem ter sua origem relacionada a uma falta de proteção superficial do solo.

Grande parte da vegetação encontrada na boçoroca é a braquiária. Essa espécie exótica é bastante resistente, de fácil propagação e difícil controle, sendo considerada uma espécie invasora. Dessa forma, pode ser interessante para os próximos projetos que sejam consideradas espécies com propriedades biotécnicas de proteção do solo que sejam preferencialmente nativas e contribuam para o aumento da biodiversidade local.

A porção norte da boçoroca apresenta uma vegetação bem desenvolvida e não há escorregamentos visíveis. Aparentemente não houve intervenção nessa parte da boçoroca, o que pode ser devido a essas características do local. Contudo, nesse ponto foram observados afundamentos que devem ser analisados e considerados nos cuidados da área. Dessa forma, ressalta-se a importância de uma análise global para que todos os sinais de instabilidade sejam investigados e, caso necessário, atendidos nas intervenções, pois, ainda que aparentemente pequenos, podem vir a causar problemas maiores futuramente.

6.3 Sugestões de intervenções com técnicas de bioengenharia de solos

O controle de boçorocas abrange principalmente o isolamento da área, a drenagem superficial e subsuperficial, a estabilização dos taludes e a proteção da cobertura vegetal. Sampaio (2014) apresenta propostas de macrodrenagem para a Boçoroca do Córrego do Cravo, assim, o enfoque dado neste trabalho é a estabilização dos taludes.

Dimensionar métodos de estabilização exige um estudo e análise da estabilidade dos taludes mais aprofundados, com mais trabalho de campo e ensaios, como o de cisalhamento direto. A proposta desse tópico, portanto, é indicar algumas intervenções nos pontos analisado com base no que foi estudado de técnicas de bioengenharia de solos aplicadas em boçorocas e em regiões com características similares as da área de estudo.

Escorregamento rotacional

O talude onde ocorreu o escorregamento rotacional é muito íngreme e apresenta fendas de tração, indicando uma instabilização no interior do maciço. Assim, propõe-se um retaludamento em bermas para diminuir essa alta declividade. Para isso, seria importante a determinação da inclinação ideal de cada horizonte do talude (solo laterítico e saprolito) através de ensaios de cisalhamento direto e cálculos de estabilidade, conforme apresentado por Rocha (2003).

Ao longo do talude, sugere-se a adoção de biorrollos, para diminuir o comprimento de rampa e, assim, o escoamento superficial e a erosão do solo. Esses biorrollos devem ser instalados seguindo a curva de nível da encosta.

Para fazer o papel de serrapilheira, também protegendo o solo da erosão superficial e auxiliando a manter a umidade do solo e o desenvolvimento da vegetação, indica-se a adoção de geotêxteis biodegradáveis.

Para fixar os biorrollos e geotêxteis, podem ser utilizadas estacas vivas. Megale (2011) apresenta que o Capim-elefante (*Pennisetum purpureum*) e a Margaridinha (*Sphagneticola trilobata*) são espécies com potencial para serem utilizadas em taludes com exposição de saprolito. Uma vez que ambas as espécies são exóticas, é importante analisar seu comportamento para que não se tornem plantas invasoras e prejudiquem o desenvolvimento de outras espécies.

Em todo o talude, sugere-se o plantio de espécies nativas do Cerrado, tanto para estabilização do solo, como para recuperação de biodiversidade local. Dentre as possíveis espécies a serem usadas, Marques (2011) apresenta que o Capim Flexinha (*Echinolaena inflexa*) e a Camaratuba (*Cratylia argentea*) possuem potencial para controle de processos erosivos e estabilização do solo.

Na base do talude sugere-se a instalação de paliçadas como estrutura de reforço da encosta e para conter o material inconsolidado e o substrato.

Também é importante nesse ponto o controle do fluxo de água superficial e subsuperficial. Sampaio (2014) propõe a adoção de trincheiras de infiltração, entre o topo do talude e o cafeeiro, para o controle das águas superficiais, e feixes vivos, para direcionar o escoamento subsuperficial e auxiliar na drenagem interna na base do talude.

A Figura 104 apresenta um esquema, sem escala, da proposta sugerida para este ponto da boçoroca.

Figura 104 – Proposta de intervenção no talude onde ocorreu o escorregamento rotacional

Escorregamento translacional

Como o talude consiste da exposição do saprolito, sugere-se o retaludamento em pequenos terraços, preferencialmente com uma inclinação compatível à resistência ao cisalhamento desse material. Para auxiliar na drenagem do talude e no ancoramento dos planos preferenciais de ruptura, indica-se o emprego de camadas de ramos.

Assim como apresentado no escorregamento rotacional, recomenda-se o uso de geotêxteis biodegradáveis e estacas para fixá-los, paliçadas na base do talude, plantio de espécies nativas com potencial de estabilização do solo e drenagem subsuperficial na base do talude conforme sugerido por SAMPAIO (2014).

A Figura 105 apresenta um esquema, sem escala, da proposta sugerida para este ponto da boçoroca.

Figura 105 – Proposta de intervenção no talude onde ocorreu o escorregamento translacional

Áreas sem escorregamento

Talude adjacente ao escorregamento translacional

O talude contíguo ao escorregamento translacional não apresenta problemas de instabilidade, assim, nesse ponto, apenas recomenda-se o incremento da cobertura vegetal com espécies que auxiliem no reforço do solo, tais como o Capim Flexinha e a Camaratuba.

Recomenda-se, também, um monitoramento constante da bacia de captação situada no topo do talude, uma vez que se observou deposição de esterco nesse ponto.

Área com presença de afundamentos

Na área onde foram observados os afundamentos é necessário um estudo mais detalhado do processo que ocorre para identificar sua causa, se é a concentração do escoamento superficial ou a ocorrência piping.

No caso de serem originadas devido à concentração do fluxo de água superficial, é necessária uma obra de drenagem superficial. Sampaio (2014) recomenda um canal de drenagem beirando a boçoroca neste ponto, entre a feição erosiva e a estrada de terra localizada próxima a essa área.

Já se a origem desse processo for o piping, será necessária a instalação de uma drenagem subsuperficial.

Outras sugestões

Nos demais taludes que apresentam trincas e pequenas movimentações, indica-se o reforço do solo com plantio de vetiver, capim-flexinha e camaratuba, e com o uso de feixes vivos, estacas vivas ou geotêxteis biodegradáveis.

Nos taludes estáveis, aconselha-se o plantio de espécies nativas, principalmente aquelas com potencial de controlar processos erosivos, a fim de se reforçar o solo e incrementar a biodiversidade.

A montante da boçoroca recomenda-se a associação do vetiver com amendoim forrageiro, segundo Luque, R., Luque, O. e Posada (2011), para diminuir o escoamento superficial e os sedimentos provenientes da microbacia.

Em todas as intervenções aqui indicadas, é essencial que haja um monitoramento contínuo do desenvolvimento da vegetação para que as técnicas sejam bem sucedidas.

Para futuras intervenções, recomenda-se ainda considerar um retaludamento em bermas, segundo a inclinação estável para o horizonte exposto.

7 CONCLUSÕES

A região de Nazareno apresenta uma alta incidência de boçorocas, o que decorre das características do solo e do uso e ocupação dado a ele. A Boçoroca do Córrego do Cravo apresentou uma heterogeneidade de materiais, entretanto, na maior parte da feição observou-se uma camada superior de solo altamente laterizado sobre um saprolito de origem gnáissica.

Os ensaios apontaram que o solo laterítico é majoritariamente argiloso, com argilominerais estáveis e alta presença de caulinita e óxidos de alumínio e ferro, conferindo uma resistência ao material. Por outro lado, também indicaram uma alta erodibilidade desse material. Já nos pontos de transição entre o latossolo e o saprolito, os ensaios apontaram que o material não era erodível.

O saprolito de gnaiss é siltoso e os ensaios mineralógicos indicaram, além da caulinita, a presença de argilominerais mais ativos. O material é bastante friável, de baixa resistência e alta erodibilidade.

Concluiu-se que os escorregamentos maiores devem ter ocorrido devido à saturação do saprolito gnáissico e consequente instabilização de todo o maciço. A alta declividade de ambos os taludes e a presença de planos preferenciais de ruptura no saprolito também são fatores que contribuem para a ocorrência dos movimentos de massa.

Os afundamentos observados na porção norte da boçoroca ocorreram próximos a uma área de variabilidade vertical e horizontal dos materiais, o que pode explicar a erosão subsuperficial irregular nesse ponto, com posterior solapamento dos materiais mais resistentes. Esses materiais são siltosos e apresentam argilominerais ativos, fatores que acentuam a instabilidade nesse ponto. Supõe-se que as erosões nesse ponto ocorrem devido à concentração do escoamento superficial, que, ao encontrar um material de menor resistência, escava o solo de maneira irregular.

No talude estável contíguo ao escorregamento translacional, os seguintes aspectos devem influenciar em sua estabilidade: presença de talco-xisto e de quartzito no maciço, presença de argilominerais pouco ativos, solo não erodível, bacia de captação de água no topo do talude e ausência de afloramento de água na base.

A intervenção realizada na boçoroca é uma interessante aplicação de técnicas de baixo custo e impacto ambiental, e controlou o avanço acelerado da feição erosiva, entretanto, apresentou algumas carências quanto à estabilização dos taludes.

Existem diferentes técnicas de bioengenharia de solos que empregam materiais vivos para controle de processos erosivos e estabilização de taludes, entretanto, ainda não há tantos trabalhos realizados em boçorocas, em especial em regiões com características pedológicas e climáticas como as da área analisada.

Os principais estudos encontrados para estas condições envolvem o uso de geotêxteis biodegradáveis, paliçadas, estacas vivas e plantio de espécies nativas do Cerrado com propriedades biotécnicas de estabilização do solo. Essas técnicas, sozinhas, ou em associação com outros métodos, podem ser utilizadas na Boçoroca do Córrego do Cravo a fim de estabilizar os escorregamentos, reforçar os pontos vulneráveis e incrementar a biodiversidade no local, mantendo a proposta de utilizarem-se técnicas de baixo custo e maior integração ambiental.

As propostas apresentadas neste trabalho podem ser aplicadas a outras erosões com características semelhantes às que ocorrem na região. Assim, espera-se que a caracterização dos solos, a análise dos processos observados na boçoroca e a compilação de técnicas de estabilização com bioengenharia de solos realizadas contribuam no entendimento das feições erosivas que ocorrem na região e na elaboração de projetos de controle para futuras intervenções.

8 RECOMENDAÇÕES

Para a estabilização dos taludes com o ângulo de inclinação adequado ao horizonte exposto, recomenda-se a realização de ensaio de cisalhamento direto. O estudo da resistência ao cisalhamento deve ser feito em diferentes umidades, para que seja determinada a inclinação mais adequada, conforme apresentado por Rocha (2003).

Recomenda-se também que seja feita uma análise mais detalhada da área onde ocorreram os afundamentos, para melhor entendimento do processo e elaboração de propostas de controle.

Por fim, sugere-se que sejam feitas mais pesquisas e trabalhos com técnicas de bioengenharia de solos para controle de boçorocas de grande porte, em especial em regiões de características pedológicas e climáticas como as da área de estudo e com vegetação de Cerrado, de forma que haja cada vez mais alternativas de baixo custo e alto valor ambiental adequadas a este problema e esta região.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: solo - determinação do limite de liquidez: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984a.
- _____. **NBR 6508**: grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - determinação da massa específica: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984b.
- _____. **NBR 7180**: solo - determinação do limite de plasticidade: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984c.
- _____. **NBR 7181**: solo - análise granulométrica: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984d.
- ARAUJO, G. H. S.; ALMEIDA, J. R.; GUERRA, A. J. T. **Gestão ambiental de áreas degradadas**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010. 322p.
- BARUQUI, A. M. et al. Levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos da zona Campos das Vertentes. Dados eletrônicos. Boletim de pesquisa e desenvolvimento. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006
- BHATTACHARYYA, R. et al. Utilizing palm-leaf geotextile mats to conserve loamy sand soil in the United Kingdom. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 130. Elsevier. p. 50-58, 2009.
- BEZERRA, J. F. R. **Geomorfologia e reabilitação de áreas degradadas por erosão com técnicas de bioengenharia de solos na Bacia do Rio Bacanga, São Luís – MA**. 2011. 249 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.
- _____. **Sacavem Rehabilitation**. LAGESOLOS. UFRJ. 2008. Disponível em: <http://www.lagesolos.ufrj.br/?op=rehabilitation> Acesso: 13/12/2014.
- BEZERRA, J. F. R., GUERRA, A. J. T., RODRIGUES, S. C. Aplicação de geotêxteis biodegradáveis na redução do escoamento superficial e controle da erosão superficial, Uberlândia/MG. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. v. 12, n. 2. p. 92-104, 2011.
- BIGARELLA, J. J., BECKER, R. D., SANTOS, G. F. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. v. 2. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2007a.

- BIGARELLA, J. J., BECKER, R. D., SANTOS, G. F. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. v. 3. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2007b.
- BONATI, G., MARONGIU, I. **Natural Resource Management Hand book: Soil Bio-engineering techniques for Slope protection and Stabilization**. CESVI: Kujand, 2013. 41p.
- BONTERRA IBERICA S.L. **Biorrollos**. s.d. Disponível em: http://www.controlerosion.es/?page_id=8 Acesso: 14 Dez. 2014.
- CHAVES, T. A. et al. **Recuperação de áreas degradadas por erosão no meio rural**. Manual Técnico, 34. Niterói: Programa Rio Rural, 2012. 19 p.
- COELHO, A. T.; PEREIRA, A. R. **Efeitos da vegetação na estabilidade de taludes e encostas**. Belo Horizonte: DEFLO Bioengenharia, 2006. Boletim Técnico Ano 1. Nº 2.
- COUTO, L. et al. **Técnicas de bioengenharia para revegetação de taludes no Brasil**. Viçosa: CBCN, 2010. 118p.
- CORNELINI, P., SAULI, G. **Manuale di indirizzo delle scelte progettuali per interventi di Ingegneria Naturalistica**. Roma: PODIS Ministero dell'Ambiente, 2005. 389p.
- CRAIG, R. F. **Craig's Soil Mechanics**. 7ª ed. Londres: Spon Press, 2004. 447p.
- DURLO, M. A.; SUTILI, F. J. **Bioengenharia: Manejo Biotécnico de Cursos de Água**. Porto Alegre: EST Edições, 2005. 189p.
- FAO. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Land Resources. Land degradation assessment**. Disponível em: <http://www.fao.org/nr/land/degradation/en/> Acesso em 18 Jul. 2012.
- FERNANDES, J. P., FREITAS, A. R. M. **Introdução à Engenharia Natural**. v. 2. Lisboa: EPAL, 2011. 107 p.
- FERRARI, R. **Quaderni di cantiere** Volume 15: Palizzata Viva. Roma: Regione Lazio, 2008. 32p.
- FERREIRA, R. R. M. **Apostila técnica de reabilitação de voçorocas**. s.d.
- _____. **Relatório de Recuperação Ambiental BNDES**. Meta 2: Voçorocas de Nazareno. Nazareno: Projeto Maria de Barro, 2010.

- FERREIRA, V. M. **Voçorocas no município de Nazareno, MG: origem, uso da terra e atributos do solo**. 2005. 84 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005.
- FERREIRA, V. M. et al. Influência antrópicas e atributos de solo: interrelações em ambientes de voçorocas na mesorregião Campo das Vertentes-MG. **Geografia**, Rio Claro, v. 36, n. 1, pp. 209-219, Jan/Abr. 2011. Disponível em: <http://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/ageteo/article/view/4915>. Acesso em: 15 Jul. 2012.
- FERREIRA, R. R. M. et al. Atributos físicos de Cambissolo sob diferentes manejo de pastagens em sistema extensivo: influência na dinâmica das águas pluviais. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 31, 2007, Gramado. **Anais...** Gramado. 2007.
- FERREIRA, R. R. M; FERREIRA, V.M. (Coord.). **Apostila Técnica de Estabilização de Voçorocas**. Nazareno: Centro Regional Integrado de Desenvolvimento Sustentável, 2009a. 20p.
- FERREIRA, R. R. M; FERREIRA, V.M. (Coord.). **Maria de Barro - Tecendo a Rede Voçorocas**. Nazareno: Centro Regional Integrado de Desenvolvimento Sustentável, 2009b. 84p.
- FERREIRA, L. R. M., FERREIRA, R. R. M., FERREIRA, V. M. **Águas do Alto Rio Grande**. Nazareno: Centro Regional Integrado de Desenvolvimento Sustentável, 2012. 96p.
- FRANTI, T. G. **G96-1307 Bioengineering for Hillslope, Streambank and Lakeshore Erosion Control**. 1996. Historical Materials from University of Nebraska-Lincoln Extension. Paper 1342. Disponível em: <http://digitalcommons.unl.edu/extensionhist/1342>. Acesso em: 26 Jul. 2012.
- GRAY, D. H.; SOTIR, R. B. **Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization** – a practical guide for erosion control. New York: Wiley & Sons Inc. 1996. 378 p.
- GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. São Paulo. Edgard Blucher. 1976.
- HORTA, I. M. F. **Levantamento dos solos e ocupação da superfície do município de Nazareno, MG**. 2006. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

- HORTA, I. M. F. et al. Levantamento de reconhecimento com apoio digital dos solos do município de Nazareno-MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, vol.33, pp. 1940-1947, 2009. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-70542009000700042&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 20 Jul. 2012.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cidades@**. 2010.
- INFANTI JUNIOR, N.; FORNASARI FILHO, N. Processos de Dinâmica Superficial. In: OLIVEIRA, A. M. S; BRITO, S. N. A. **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998.
- KELLEY, H. W. Keeping the Land Alive. Soil erosion - its causes and cures. In: FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Soils Bulletin No. 50**. Roma: FAO,1990.
- LUQUE, R.; LUQUE, O.; POSADA, G. Experiences in the stabilization of a large gully at springs area property from Agua Minalba - Venezuela. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON VETIVER, 5., 2011, Lucknow. **Proceeding...** The Vetiver Network International, 2011. Disponível em: < <http://www.vetiver.org/ICV5%20PROCEEDINGS-table.htm> >.
- MACKENZIE, M. C. **The Differential thermal investigation of clays**. Mineralogical Society. London. 1937. 456p.
- MARQUES, T. E. D., **Uso de gramíneas em consórcio com leguminosas para recuperação de voçorocas**. 2011. 77 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Biomas Tropicais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.
- MEGALE, C. M. S. **Avaliação do enraizamento e brotação na propagação de espécies potenciais para revegetação e estabilização de taludes**. 2011. 57 p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2011.
- MORAIS, F.; BACELLAR, L. A. P.; SOBREIRA, F. G. Avaliação da susceptibilidade de solos gnáissicos à erosão subsuperficial. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, 19 (2): p. 233-241, dez. 2007
- MORGAN, R. P. C.; RICKSON, R. J. **Slope Stabilization and Erosion Control: A Bioengineering Approach**. E&F Spon, Londres, 1995

- PEJON, O.J. **Mapeamento geotécnico da folha Piracicaba (escala 1:100.000): estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação dos atributos.** 1992. 224 p. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992.
- RELATÓRIO de estruturas de contenção em taludes em área erodida: Voçoroca Córrego do Cravo. Nazareno, 2007.
- RESENDE, M.et al. **Pedologia: base para distinção de ambientes.** 2 ed. Viçosa, MG: NEPUT, 1997. 367p.
- ROCHA, W.W. **Resistência ao cisalhamento e estabilidade de taludes de voçorocas em solos da região de Lavras (MG).** 2003. 101p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003.
- ROCHA et al. Resistência ao cisalhamento e grau de intemperismo de cinco solos na região de Lavras (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 297-303, 2002
- SAMPAIO, L.F. **Estudo geológico-geotécnico dos processos erosivos e proposta de macrodrenagem: Voçoroca do Córrego do Cravo (Nazareno-MG)** 2014. 223p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.
- SANTOS, P.S. **Tecnologia de argilas, aplicada às argilas brasileiras.** São Paulo: Edgard Blücher, Ed. da Universidade de São Paulo, 1975. V.1. 340 p.
- SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Energia e Saneamento. **Controle de erosão: bases conceituais e técnicas; diretrizes para o planejamento urbano e regional; orientações para o controle de boçorocas urbanas.** São Paulo: DAEE/IPT, 1989. 92p.
- SAULI, G., CORNELINI, P., PRETI, F. **Manuale di Ingegneria Naturalistica.** v. 3. Sistemazione dei versanti. Regione Lazio. Roma. 2005.
- SILVA, P.M.O. **Modelagem do escoamento superficial e da erosão hídrica na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, Alto Rio Grande, MG.** 2006. 155p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.
- SMETS, T. et al. Concentrated flow erosion rates reduced through biological geotextiles. **Earth Surface Processes and Landforms**, 34, p. 493-502, 2009.
- STEINFELD, D. et al. **Roadside Revegetation Manual: An Integrated Approach to Establishing Native Plants.** 2007. 424p.

TOLEDO, C.L.B. **Evolução geológica das rochas máficas e ultramáficas no Greenstone Belt Barbacena, região de Nazareno, MG.** 2002. 308 p. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

USDA. Natural Resources Conservation Service. Soil bioengineering for upland slope protection and erosion reduction. In:_____ **Part 650, 210-EFH, Engineering Field Handbook.** Washington, 1992. cap. 18. 53p. Disponível em: <<http://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=17555.wba>>.