

FABIANA LARA COSTA RIBEIRO

**ANÁLISE DE PROCESSOS EROSIVOS SUPERFICIAIS NA ÁREA DAS
MINAS ALEGRIA NORTE E ALEGRIA SUL**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2016

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

T

Ribeiro, Fabiana Lara Costa, 1986-
R484a Análise de processos erosivos superficiais na área das minas
2016 Alegria Norte e Alegria Sul / Fabiana Lara Costa Ribeiro. –
Viçosa, MG, 2016.
 xiii, 102f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexos.

Orientador: Eduardo Antônio Gomes Marques.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.87-96.

1. Mecânica do solo. 2. Solo - Erosão. 3. Ensaio de
Inderbitzen. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Engenharia Civil. Programa de Pós-graduação em Engenharia
Civil. II. Título.

CDD 22. ed. 624.15136

FABIANA LARA COSTA RIBEIRO

**ANÁLISE DE PROCESSOS EROSIVOS SUPERFICIAIS NA ÁREA DAS
MINAS ALEGRIA NORTE E ALEGRIA SUL**

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

APROVADA: 26 de fevereiro de 2016.

Ana Maria Stephan

Roberto Francisco de Azevedo
(Coorientador)

Eduardo Antonio Gomes Marques
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar sempre comigo, me carregando em seus braços nos momentos mais difíceis e por me proporcionar esta vitória!

Ao meu irmão, Felipe Lara Gomes Costa (*in memoriam*), por seu exemplo de perseverança (sempre!). À você dedico esse trabalho!

Aos meus pais, Marco Antônio Gomes Costa e Denise A. Lara Costa, que para mim são sinônimo de amor e exemplo de força! Obrigada por sempre acreditarem em mim!

Ao meu marido e amigo Adelmo Cardoso Ribeiro Junior, pela paciência, pelo apoio e amor incondicionais! Ao meu filho Heitor Costa Ribeiro, por me fazer descobrir o maior amor que poderia existir e pela alegria e esperança que simboliza pra mim!

Ao colega Vitor Reis pelo apoio nas atividades de campo.

Ao Paulo Capelão e ao amigo Eduardo Cândido pelas experiências compartilhadas no laboratório.

Ao professor Roberto Azevedo pela atenção e colaboração.

Ao Samuel pela solicitude e paciência e envolvimento ao acompanhar o andamento do trabalho, representando a Samarco S.A.

Ao meu orientador, Eduardo Antonio Gomes Marques, pela habilidade e excelência em educar e orientar, pela compreensão, pela amizade, pelas risadas e pela oportunidade!

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Civil, pela oportunidade.

À Samarco S.A. por tornar possível a realização deste trabalho tanto através da autorização da realização da pesquisa em suas minas quanto pela disponibilização de recurso financeiro e mão de obra de apoio.

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo.

Aos professores da Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil (DEC) por todos os ensinamentos compartilhados. Aos funcionários do DEC, em especial à Cilene, pela atenção e carinho.

OBRIGADA!

BIOGRAFIA

FABIANA LARA COSTA RIBEIRO, filha de Marco Antônio Gomes Costa e Denise Afonsina Lara Costa, nasceu em 28 de julho de 1986, na cidade de Goiânia, Goiás.

Ingressou no curso de Engenharia Agrônômica em março de 2005 pela Universidade Federal do Viçosa, em Viçosa-MG, concluindo-o em dezembro de 2009.

Em março de 2013, ingressou no programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), onde obteve o título de Mestre em Engenharia Civil em 26 de fevereiro de 2016.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABELAS.....	viii
RESUMO.....	ix
ABSTRACT.....	x
1.Introdução.....	1
1.1.Contextualização do Problema.....	1
1.2.Objetivos.....	3
1.3.Organização da Dissertação.....	4
2.Revisão Bibliográfica.....	5
2.1.A Atividade Mineral no Brasil.....	5
2.2.Erosão dos Solos.....	9
2.2.1.Agentes Erosivos.....	14
2.2.2.Erosividade da Chuva.....	15
2.2.3.Erodibilidade.....	16
2.2.4.Tipos de Erosão.....	21
2.3.Ensaio de Inderbitzen.....	23
3. Caracterização da Área de Estudo.....	28
3.1 Considerações Iniciais.....	28
3.2 Localização.....	28
3.3 Clima.....	29
3.4 Aspectos Pedológicos, Geológicos e Geomorfológicos.....	30
3.5 Relevo.....	33
3.6.Hidrografia.....	33
3.7.Uso e ocupação do solo.....	35
4. Metodologia.....	36
4.1.Trabalho de campo.....	36
4.1.1.Identificação dos Materiais Amostrados.....	36
4.1.2.Amostragem.....	40
4.2.Trabalho de Laboratório.....	41
4.2.1.Preparo das Amostras.....	41
4.2.2.Caracterização Física.....	43

4.2.3.Mineralogia.....	44
4.2.4.Análises Químicas.....	44
4.2.5.Ensaio de Inderbitzen.....	45
4.2.5.1.Análises Estatísticas.....	51
4.2.6. Ensaio de Cisalhamento Direto.....	52
5.Resultados e Discussões.....	55
5.1.Ensaio para Avaliação Indireta da Erodibilidade.....	55
5.1.1.Caracterização física.....	55
5.1.2.Mineralogia e Análises Químicas.....	62
5.1.3.Ensaio de Cisalhamento Direto.....	65
5.2.Ensaio para Avaliação Direta da Erodibilidade.....	70
5.2.1.Ensaio de Inderbitzen.....	70
6.Conclusões	82
6.1.Sugestões para Trabalhos Futuros.....	84
Referências Bibliográficas.....	86
Anexo I.....	96
Anexo II.....	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Produção de bens minerais no Brasil em 2014.....	6
Figura 2: Principais depósitos minerais no Brasil.....	7
Figura 3: Enfoque de estudos sobre erosão por diferentes áreas do conhecimento.	11
Figura 4: Nomograma de Wischmeier <i>et al.</i> (1971).	13
Figura 5: Concepção original do aparelho do Ensaio de Inderbitzen. (1961).....	24
Figura 6: Equipamento de Inderbitzen.....	26
Figura 7: Localização da área de estudo.	29
Figura 8: Vista parcial das minas de Alegria Norte (esquerda) e Alegria Sul (direita).	29
Figura 9: Precipitação mensal para o ano de 2014.....	30
Figura 10: Hidrografia da área de estudo – Alegria Norte.....	34
Figura 11: Hidrografia da área de estudo – Alegria Sul.....	35
Figura 12: Pontos amostrados na Alegria Norte (IA)	38
Figura 13: Pontos amostrados na Alegria Sul (IM, IG e IE).....	38
Figura 14: Itabirito especularítico (IE).....	39
Figura 15: Itabirito martítico (IM).	39
Figura 16: Itabirito goethítico (IG).	40
Figura 17: Itabirito anfibolítico (IA).....	40
Figura 18: Procedimentos para amostragem: a) Escavação de um bloco no qual será apoiado o PVC para a retirada da amostra; b) Cilindro de PVC totalmente cheio do material amostrado e c) Amostra em fase final de preparo. Porção superior do cilindro envelopada com filme plástico. Base do bloco pronta para ser destacada para posterior retirada do PVC do local de amostragem.....	42
Figura 19: Amostra indeformada, moldada e pesada antes do ensaio de cisalhamento direto.	43

Figura 20: Amostra indeformada, moldada para a realização do ensaio de Inderbitzen.	43
Figura 21: a) Espectrômetro de microfluorescência de raios X (μ -EDX 1300, Shimadzu, Kyoto, Japão); b) Aparelho aberto para introdução das amostras; c) Amostras acondicionadas no aparelho, prontas para o início das análises e d) Amostra em formato de pastilha, utilizada nas análises.	46
Figura 22: a) Aparelho de Inderbitzen e b) Corpo de prova fixado tangencialmente à rampa.....	47
Figura 23: Balde identificado no qual se coletou a água e o material carreados.	49
Figura 24: Etapas de realização do ensaio de Inderbitzen	50
Figura 25: Pesagem do material que restou no amostrador após o ensaio.....	51
Figura 26: Material coletado nos baldes para sedimentação e depois transferido para vasilhas de alumínio levadas à estufa por 24 horas.....	51
Figura 27: Conjunto de peneiras utilizadas.....	52
Figura 28: Corpo de prova moldado com o auxílio de um amostrador quadrado.....	54
Figura 29: Curvas granulométricas dos Itabiritos anfibolítico, martítico, goethítico e especularítico.....	58
Figura 30: Envoltória de Resistência do IG natural	67
Figura 31: Envoltória de Resistência do IG inundado	67
Figura 32: Envoltória de Resistência do IM natural.	68
Figura 33: Envoltória de Resistência do IM inundado.....	68
Figura 34: Envoltória de Resistência do IE natural.	69
Figura 35: Envoltória de Resistência do IE inundado.....	69
Figura 36: Envoltória de Resistência do IA natural.	70
Figura 37: Envoltória de Resistência do IA inundado	70
Figura 38: Gráfico de perda de solo seco acumulado da amostra de IG vazão mínima.	72

Figura 39: Gráfico de perda de solo seco acumulado da amostra de IG vazão máxima.	73
Figura 40: Gráfico de perda de solo seco acumulado da amostra de IM vazão mínima.	73
Figura 41: Gráfico de perda de solo seco acumulado da amostra de IM vazão máxima.	74
Figura 42: Gráfico de perda de solo seco acumulado da amostra de IE vazão mínima.	74
Figura 43: Gráfico de perda de solo seco acumulado da amostra de IE vazão máxima.	75
Figura 44: Gráfico de perda de solo seco acumulado da amostra de IA vazão mínima.	75
Figura 45: Gráfico de perda de solo seco acumulado da amostra de IA vazão máxima.	76
Figura 46: Taxa de erodibilidade dos materiais para vazão mínima e vazão máxima.	77
Figura 47: Curva granulométrica itabirito goethítico (IG).	97
Figura 48: Curva granulométrica itabirito martítico (IM).	97
Figura 49: Curva granulométrica itabirito especularítico (IE).	98
Figura 50: Curva granulométrica itabirito anfibolítico (IA).	98
Figura 51: Análise mineralógica IG.	99
Figura 52: Análise mineralógica IM.	100
Figura 53: Análise mineralógica IE.	101
Figura 54: Análise mineralógica IA.	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Critérios adotados por Santos (2001) ao relacionar Índice de Plasticidade (IP) e Coeficiente de uniformidade (Cu).....	21
Tabela 2: Índices físicos dos itabiritos estudados.	56
Tabela 3: Limites de consistência dos itabiritos, análise granulométrica, classificação SUCS e da Carta de Plasticidade.	57
Tabela 4: Coeficiente de uniformidade e coeficiente de curvatura.....	59
Tabela 5: Passante na peneira #200 (0,075mm) e passante na peneira #40 (0,425mm).	61
Tabela 6: Comportamento dos solos com base no peso específico e índice de vazios.	62
Tabela 7: Comportamento dos solos com base na plasticidade e coeficiente de uniformidade.	62
Tabela 8: Comportamento dos solos com base na granulometria.....	63
Tabela 9: Caracterização química dos itabiritos.	64
Tabela 10: Caracterização mineralógica dos itabiritos.	64
Tabela 11: Critério de laterização	66
Tabela 12: Valores do intercepto coesivo (c) e ângulo de atrito interno dos solos (ϕ) na condição natural e inundada, e umidade do material antes e após a realização do ensaio.....	66
Tabela 13: Fator de variação da coesão (Δc).	71
Tabela 14: Taxa de erodibilidade (kg.ha ⁻¹ min ⁻¹).....	77
Tabela 15: P-valor obtido no Teste t-student para verificar diferenças significativas entre os resultados de vazão máxima e mínima.	78
Tabela 16: Granulometria material carregado – vazão mínima.	80
Tabela 17: Granulometria material carregado – vazão máxima.	80

RESUMO

RIBEIRO, Fabiana Lara Costa, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2016. **Análise de processos erosivos superficiais, transporte e sedimentação de partículas de solo e rocha intemperizada na área das minas alegria norte e sul.** Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques.

A extração mineral desempenha papel fundamental na economia brasileira porém, um dos entraves ambientais deste setor está relacionado às áreas degradadas que expõem o solo ao desencadeamento de processos erosivos. Este estudo analisou alguns dos fatores determinantes para a ocorrência dos processos erosivos superficiais e a susceptibilidade dos solos à erosão hídrica nas minas Alegria Norte e Alegria Sul, em Mariana, estado de Minas Gerais. Foram estudados quatro tipos de solos residuais originados de itabirito: Itabirito Anfibolítico (IA), Itabirito Goethítico (IG), Itabirito Martítico (IM), Itabirito Especularítico (IE). Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas do terço inferior de taludes e corte da mina. Foram realizados ensaios de caracterização geotécnica, mineralógica e química, a partir dos quais avaliou-se indiretamente a erodibilidade dos solos. Para a avaliação direta, ensaios de Inderbitzen foram realizados, para os quais foram determinadas duas vazões: vazão mínima (1 L.min^{-1}) e vazão máxima (7 L.min^{-1}). A avaliação indireta permitiu concluir que o IG, IM e IE, constituídos basicamente por areia fina e silte, são mais susceptíveis à erosão do que o IA, que apresentou maior quantidade de argila. Essa característica também se relacionou à maior quantidade de quartzo nos solos nos solos IG, IM e IE resultando em um menor peso específico dos grãos e, conseqüentemente, maior erodibilidade. Os critérios baseados na plasticidade, em sua maioria, se relacionaram bem à susceptibilidade dos itabiritos à erosão hídrica. Porém, o mesmo não se observou quanto o índice de vazios dos itabiritos. Observou-se boa correspondência ao relacionar o coeficiente de uniformidade (C_u) à erodibilidade, assim como os óxidos de ferro e alumínio. Estes, juntamente com a argila, atuam como agente cimentante das partículas, resultando na formação de agregados e estruturação do solo, refletindo diretamente no potencial erodível do solo. O grau de laterização apresentou boa correspondência com a erodibilidade dos itabiritos. Todas as amostras foram classificadas como laterizadas, sendo estabelecida a seguinte sequência crescente de resistência à erosão: IM, IG, IE e IA. O critério baseado no fator de variação da coesão (Δ_c) não foi validado para os itabiritos estudados. Entretanto, admite-se a importância do estudo deste parâmetro na análise de erodibilidade dos solos. Por se tratar de materiais inconsolidados, os itabiritos apresentaram faixas de valores de coesão bem diferentes dos solos estruturados estudados por outros autores, que validaram esse critério. Foi proposta uma nova faixa de valores para a correlação entre o Δ_c e a erodibilidade dos itabiritos IG, IM, IE, IA: baixa erodibilidade para $\Delta_c < 60\%$; média erodibilidade para $60\% \leq \Delta_c \leq 75\%$ e alta erodibilidade para $\Delta_c \geq 75\%$. Análises estatísticas permitiram concluir que a produção de sedimentos para a vazão máxima não difere daquela resultante da vazão mínima para o IM e o IA, mas difere para as amostras de IG e o IE. Observou-se ainda que a produção de sedimentos para as amostras IG, IM e IE não diferem entre si, mas diferem do IA. Por fim, obteve-se a seguinte sequência decrescente de erodibilidade dos materiais: IG, IM, IE e IA.

ABSTRACT

RIBEIRO, Fabiana Lara Costa, M. Sc., Federal University of Viçosa, February, 2016.
Analysis of surface erosion, transport and sedimentation of particles of soil and weathered rock in the area of mines North and South Alegria. Adviser: Eduardo Antonio Gomes Marques.

Mining plays a key role in the Brazilian economy. However, one of the environmental obstacles of this sector is related to the degraded areas that expose the soil initiating erosion. This study analyzed some determining factors that leads to the occurrence of surface erosion and the susceptibility of soils to the erosion at Alegria North and South mines, in the city of Mariana, state of Minas Gerais. Four types of itabirites residual soil were studied: Amphibolitic itabirite (IA), Goethitic itabirite (IG), Martitic itabirite (IM), Espicularitic itabirite (IE). Disturbed and undisturbed samples were collected in the lower portion of mine cut slopes. Geotechnical, mineralogical and chemical characterization were performed, from which the susceptibility to the soil erosion was indirectly evaluated. To directly evaluate the erodibility, Inderbitzen tests were performed for two outflows: minimum (1 L.min⁻¹) and maximum flow (7 L.min⁻¹). The indirect assessment concluded that IG, IM and IE, mainly composed by fine sand and silt are more susceptible to erosion than IA, which showed more quantities of clay. This characteristic is also related to the greater amount of quartz in the soils IG, IM e IE, resulting in a lower specific weight of solids and, consequently, greater erodibility. The criteria based on plasticity, mostly correlates well with the itabirites susceptibility to hydric erosion. However, this did not happened when compared to itabirites void ratio. It was demonstrated that C_u showed a good correspondence with the erosion susceptibility in a similar way that was observed for iron and aluminum oxides, which act as a cementing agent, in a similar way of clay particles, resulting in the formation of aggregates and soil structures. The laterization degree has presented good agreement with itabirites erodibility. All samples were classified as lateritic, determining the following increasing sequence of resistance to erosion: IM, IG, IE e IA. The criterion based on the cohesion variation factor (Δ_c) has not been validated for the studied itabirites. Nevertheless its well known the importance to this variable for the study of soils erodibility. By dealing with unconsolidated materials, the itabirites residual soils present very different cohesion values ranges from the structured soils studied by other authors, who have validated this criterion. It was proposed a new values range to the correlation between the Δ_c and the itabirites erodibility: low erodibility to $\Delta_c < 60\%$; average erodibility to $60\% \leq \Delta_c \leq 75\%$ and high erodibility to $\Delta_c \geq 75\%$. Statistical analysis have shown that the sediment yield for the maximum flow rate does not differ from that resulting from the minimum flow to IM and IA, but differs to IG and IE. It was also observed that the sediment yield of IG, IM and IE do not differ among themselves, but differ from IA. Based on these results, the erodibility decreasing sequence of the studied materials is: IG, IM, IE and IA.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização do Problema

Atuando como base de sustentação para a maioria dos segmentos industriais, a extração mineral, atualmente, desempenha papel fundamental na economia brasileira, não apenas como geradora de empregos e impostos, mas também como fator determinante para o desenvolvimento de elevado número de cidades e microrregiões.

Entretanto, uma situação comumente observada na mineração é a paisagem comprometida pelas áreas da jazida, que se apresentam sem cobertura vegetal, favorecendo o desenvolvimento de processos erosivos. Estes são potencializados por forças ativas, como as características da chuva, declividade, comprimento dos taludes ou encostas com elevado desnível topográfico (comum em áreas de mineração) e a capacidade do solo em absorver a água; e por forças passivas, como a resistência que o solo exerce à ação erosiva da água.

Segundo Camapum de Carvalho *et al.* (2006, p.42 *apud* Camapum de Carvalho *et al.* 2012):

Os processos erosivos constituem-se numa forma natural de modelagem do relevo e atuam de modo conjugado aos processos pedogenéticos. De maneira geral, sob condições naturais, estes dois processos atuam equilibradamente, havendo certa equivalência entre a quantidade de solo erodida e a quantidade produzida. Denomina-se comumente este fenômeno de erosão natural ou erosão geológica. Quando se dá o rompimento deste equilíbrio devido à interferência do homem, e não é permitida ao solo a recuperação natural, dá-se origem à erosão acelerada ou erosão antrópica.

A água, enquanto solvente e meio de transporte de substâncias químicas, atua sobre as propriedades e o comportamento do solo, influenciando na estabilidade dos maciços e no processo de evolução das erosões (Camapum de Carvalho, 2012).

Existe uma relação inversamente proporcional entre a infiltração e a erosão de superfície. O escoamento superficial superior à infiltração do solo, gera sulcos que se

aprofundam progressivamente por todo o terreno, caso as estruturas de drenagem e de recepção das águas de chuva não estejam devidamente projetadas, perdendo sua eficiência. Como consequência desse processo tem-se a desagregação, o transporte e sedimentação de partículas sólidas nas drenagens fluviais mais próximas, resultando no seu assoreamento e prejudicando a qualidade da água utilizada para abastecimento, por exemplo. Nesses casos, lagoas de decantação (bacias de retenção) podem desempenhar bem o papel na sedimentação de material particulado, tornando-se necessária a manutenção regular, para evitar seu preenchimento completo e o possível rompimento.

Outro processo que pode resultar em assoreamento de drenagens é a instabilização de taludes da mina, liberando partículas e podendo gerar problemas de segurança operacional.

De acordo com Carvalho (2008), a proteção de obras civis, estabilização de taludes, construção de estradas e acessos, proteção de margens de rios e de reservatórios, e várias outras obras são alguns dos objetos de estudo da erosão, no ramo da engenharia. Nas atividades de extração mineral outro objeto de estudo referente aos processos erosivos relaciona-se aos impactos ambientais frequentemente gerados por esta atividade.

O correto diagnóstico dos mecanismos de eclosão e evolução dos processos erosivos, através de pesquisas geológico-geotécnicas, pode contribuir para a adoção de medidas preventivas e corretivas econômicas e eficientes (Prandini, 1985).

Em geotecnia, as pesquisas no estudo da erodibilidade e dos fatores que condicionam a resistência a erosão ainda são muito escassas se comparadas com a importância dos problemas geotécnicos por eles gerados. Segundo Bastos (1999), sua quantificação direta esbarra em dificuldades práticas devido à pequena magnitude das tensões envolvidas e da necessidade de se representar complexas condições ambientais.

Para que se obtenham soluções dos processos erosivos é preciso ir além das fronteiras disciplinares, alcançando uma visão holística ou completa e integradora do real, por meio da transdisciplinaridade e multidisciplinaridade, as quais, além da interação interdisciplinar, primam pela junção e construção de um novo contexto metodológico (Camapum de Carvalho, 2009 *apud* Jesus, 2013).

Essa pesquisa, com o objetivo de analisar alguns dos fatores determinantes para a ocorrência dos processos erosivos superficiais e a susceptibilidade dos solos à erosão hídrica nas minas Alegria Norte e Alegria Sul, propõe o estudo de quatro tipos de solos originados de itabiritos: itabirito anfibolítico (IA), itabirito especularítico (IE), itabirito martítico (IM) e itabirito goethítico (IG). Todos esses materiais apresentam elevada erodibilidade, classificada de forma qualitativa, e geram elevada carga de sedimentos que deve ser contida em bacias de acumulação (“sumps”), evitando-se o assoreamento dos cursos de água existentes a jusante das áreas de lavra.

Para isso, realizou-se ensaios geotécnicos para análise direta e indireta da erodibilidade do solo. Para a análise indireta procedeu-se à caracterização física, mineralógica e mecânica do material estudado. A análise direta ocorreu pela metodologia de Inderbitzen (1961) com o uso do equipamento na versão adaptada por Stephan (2010). O ensaio de Inderbitzen determina o grau de erosão por meio da simulação do escoamento superficial da água da chuva no solo.

As informações levantadas e analisadas no presente estudo constituem produtos inéditos e singulares, específicos para a situação estudada, e outras nas quais ocorram materiais geológicos semelhantes, contribuindo para a elaboração de planos para tomada de decisões, priorizando ações que possam evitar/reduzir os danos ambientais listados anteriormente.

1.2. Objetivos

O principal objetivo desta dissertação foi analisar a erodibilidade solos nas minas Alegria Norte e Alegria Sul (de propriedade da SAMARCO MINERAÇÃO S/A.), localizadas nos municípios de Mariana e Ouro Preto, estado de Minas Gerais, Brasil.

Para alcançar o objetivo principal tem-se os seguintes objetivos específicos:

- ✓ Avaliar a erodibilidade dos solos e rochas extremamente intemperizadas, de forma direta, através de ensaios de Inderbitzen;
- ✓ Correlacionar a erodibilidade dos solos e rochas extremamente intemperizadas com os parâmetros geotécnicos desses materiais;
- ✓ Identificar quais materiais se apresentam mais susceptíveis à erosão e, portanto, contribuem com maior carga de sedimentos;

✓ Compor um banco de dados e informações sobre a erodibilidade dos materiais geológicos estudados.

1.3. Organização da dissertação

O presente trabalho foi dividido em 6 capítulos, incluindo este de introdução.

No Capítulo 2 foi realizada uma revisão da bibliográfica sobre a atividade de extração mineral no Brasil, a erosão e a erodibilidade dos solos, apresentando algumas definições e critérios para determinação da perda de solo de maneira direta e indireta.

A caracterização da área de estudo encontra-se no Capítulo 3, enquanto a metodologia, incluindo os trabalhos de campo (identificação e amostragens dos materiais) e os ensaios de laboratório realizados, encontram-se no Capítulo 4.

No Capítulo 5 apresentam-se os resultados observados nos ensaios de caracterização física que determinam as propriedades índices (compostas pelos índices físicos, granulometria e limites de consistência), resistência (cisalhamento direto) e erosão (Inderbitzen), além da análise química e mineralógica e sua discussão.

Por fim, encontram-se no Capítulo 6 as conclusões deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A atividade mineral no Brasil

O setor mineral apresenta expressiva importância no cenário econômico brasileiro, com vasta cadeia produtiva dos segmentos ligados à metalurgia, usinagem e produção de manufaturados metálicos, sendo a base de outras atividades relevantes no país, como a indústria automobilística, de construção civil e de bens de capital.

A extração mineral desempenha papel fundamental na economia brasileira, não só como geradora de empregos (diretos e indiretos) e impostos, como também representa fator determinante para o desenvolvimento de elevado número de cidades e microrregiões. Contribuindo de maneira decisiva para o bem estar e a melhoria da qualidade de vida das presentes e futuras gerações, a mineração tem sido fundamental para o desenvolvimento de uma sociedade equânime, desde que operada com responsabilidade social (Farias, 2002).

Na Conferência Rio +20, realizada em 2012, alguns pontos importantes sobre o tópico “mineração” foram considerados, dos quais pode-se citar (IBRAM, 2014):

- a) A responsabilidade que têm de conduzir essas atividades maximizando os benefícios sociais e econômicos;
- b) Necessidade de enfrentar os impactos ambientais e sociais negativos que delas possam decorrer;
- c) A forte demanda dos Governos quanto à capacidade para desenvolver, administrar e regular as indústrias de mineração de seus países no interesse do desenvolvimento sustentável; e
- d) A importância das estruturas legais e regulatórias, de políticas e práticas sólidas e efetivas para a mineração, que tragam benefícios econômicos e sociais e incluam salvaguardas que reduzam os impactos ambientais, bem como conservem a biodiversidade e os ecossistemas, inclusive no pós fechamento das minas.

O Brasil, detentor de vasto território e de notável diversidade geológica, conquistou posição de destaque no cenário global, tanto em reservas quanto em produção mineral, tendo atingido no ano de 2014 o valor de US\$ 40 bilhões, o que corresponde a cerca de 5% do PIB Industrial do país (IBRAM, 2015).

A Figura 1 a seguir mostra, em toneladas, o que isso representa, enquanto a Figura 2 ilustra a localização dos principais depósitos minerais no Brasil.

Bens Minerais	Valores em toneladas
Agregados Construção Civil	673.000.000
Minério de Ferro	400.000.000
Bauxita	32.000.000
Alumínio Primário	962.000
Fosfato	6.800.000
Potássio Concentrado	460.000
Zinco Concentrado	250.000
Cobre	219.000
Liga de Nióbio	80.000
Níquel Contido	80.000
Ouro	80

Figura 1: Produção de bens minerais no Brasil em 2014.
Fonte: IBRAM,2015.

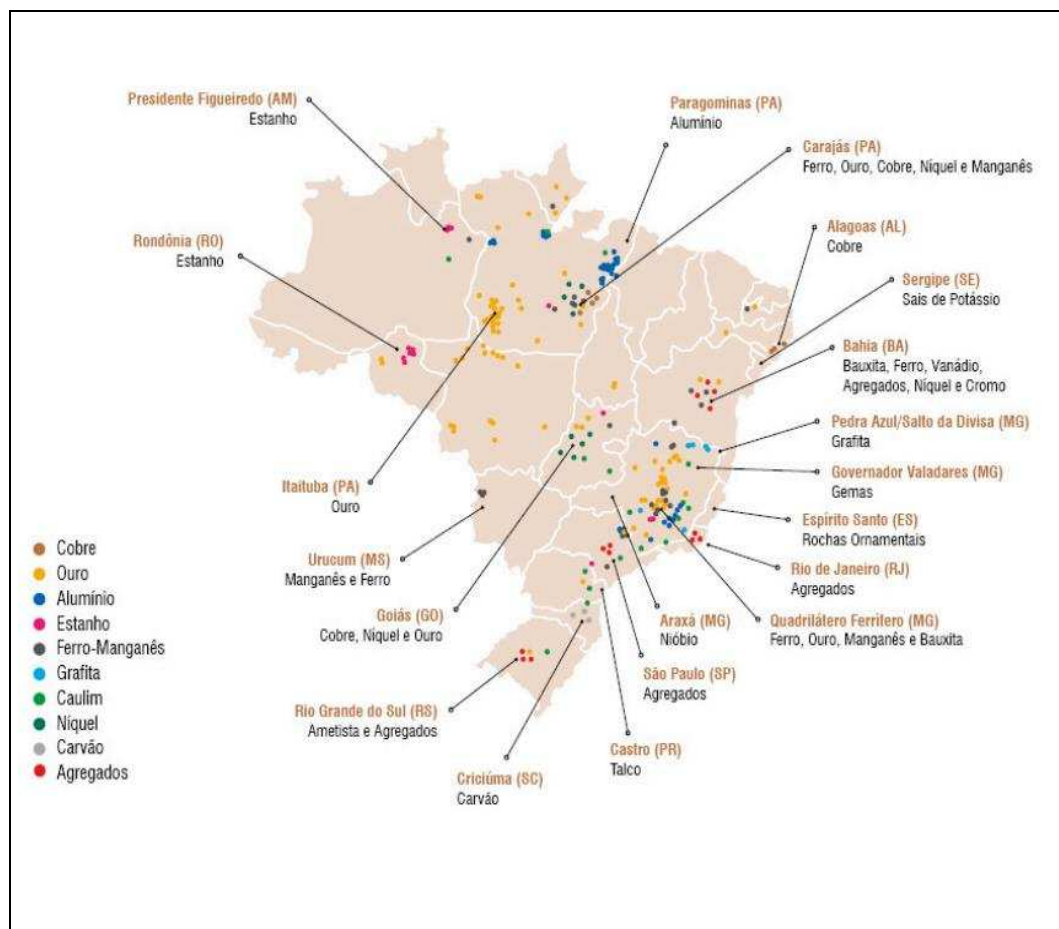


Figura 2: Principais depósitos minerais no Brasil
 Fonte: DNPM, elaboração IBRAM, 2015

Ainda segundo dados do IBRAM, no ano de 2014, no comércio exterior, a indústria extrativa mineral brasileira contribuiu com mais de US\$ 34 bilhões em exportações de minérios, sendo somente o minério de ferro responsável por US\$ 25,8 bilhões deste valor.

De acordo com a Secretaria do Comércio Exterior – SECEX, do Ministério do Desenvolvimento, da Indústria e do Comércio Exterior, em 2014, o minério de ferro permaneceu liderando a pauta de exportações na conta de Produtos Básicos, correspondendo a 11,4%, seguido da soja com 10,34% (IBRAM, 2015).

Entretanto, como não são apenas os aspectos positivos que caracterizam esse setor, torna-se relevante considerar também os entraves vivenciados pelo mesmo, relacionados, basicamente, à questões ambientais.

Como exemplo dos principais impactos ambientais decorrentes dessa atividade tem-se (IPT, 1992 *apud* Farias, 2002):

- a) desmatamento e queimadas;
- b) alteração nos aspectos qualitativos e no regime hidrológico dos cursos d'água;
- c) queima de mercúrio metálico ao ar livre;
- d) desencadeamento de processos erosivos;
- e) mortalidade da ictiofauna;
- f) fuga de animais silvestres;
- g) poluição química provocada pelo mercúrio metálico na hidrosfera, biosfera e na atmosfera.

De um modo geral, a mineração no Brasil está sujeita a um conjunto de regulamentações em que os três níveis de poder possuem atribuições com relação à mineração e meio ambiente. Com destaque para o nível Federal, pode-se citar vários órgãos que possuem a responsabilidade de definir as diretrizes e regulamentações, bem como atuar na concessão, fiscalização e cumprimento da legislação mineral e ambiental: MMA (Ministério do Meio Ambiente), MME (Ministério de Minas e Energia), SMM/MME (Secretaria de Minas e Metalurgia), DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral), CPRM (Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais - Serviço Geológico do Brasil), ANA (Agência Nacional de Águas), CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente), CNRH (Conselho Nacional de Recursos Hídricos) e IBAMA (Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis).

Os Estados e municípios também têm poder constitucional para legislar sobre mineração e meio ambiente. Além dos órgãos do poder executivo, nos três níveis, o Ministério Público Federal e o Ministério Público Estadual também fiscalizam e emitem normas e diretrizes, sendo a maioria delas conflitantes entre si (Farias, 2002). Tal conflito resulta da falta de delimitação das fronteiras de responsabilidade entre as três esferas do poder, no que se refere à atividade mineral.

Nesse cenário, observam-se vários aspectos que representam graves obstáculos na aplicação da legislação ambiental vigente, tais como:

- 1) A legislação ambiental é relativamente recente e, em muitos casos, conflita com a legislação mineral;
- 2) O CONAMA tem estabelecido várias resoluções que, em muitos casos, estão aumentando as restrições à atividade mineral;
- 3) Falta de profissionais, estrutura e equipamentos dos órgãos envolvidos nas atividades de licenciamento e fiscalização, principalmente os estaduais;
- 4) O item anterior reflete em atrasos na análise dos processos de licenciamento e liberação de licenças, bem como de ineficiência na fiscalização das atividades minerárias;
- 5) A existência de mais de um órgão licenciador e fiscalizador da atividade mineral, com legislações e normas conflitantes entre si, acaba por acarretar atrasos e prejuízos aos empreendedores;
- 6) O Ministério Público tem aumentado a sua atuação na área ambiental. Porém, suas determinações, muitas vezes, colocam o minerador e os órgãos federais, estaduais e municipais em situação de impasse.

Entretanto, apesar de todos esses entraves, observa-se que o minerador brasileiro tem feito esforços para acompanhar as demandas atuais em torno da questão ambiental. As empresas estão, em sua maioria, aplicando técnicas mais modernas e ambientalmente mais satisfatórias.

2.2. Erosão dos solos

O processo erosivo é o fenômeno de desgaste das rochas e solos, que inclui processos como desagregação, deslocamento ou transporte das partículas por ação da água ou outros agentes, como o vento (Carvalho, 2008). Os sedimentos erodidos se

depositarão nas depressões, nas planícies, nos rios, nos mares e lagos. Esse processo será tanto mais intenso quanto menor for a proteção do solo.

Neste contexto insere-se o intemperismo, que é o processo de modificação e diminuição de rochas, por processos mecânicos (físicos) e químicos. Por exemplo, variações de temperatura, resultantes do intemperismo físico, provocam trincas nas rochas através das quais a água se infiltra, atacando quimicamente os minerais. A presença de compostos e elementos químicos nas águas superficiais e subterrâneas promove o ataque químico do material, através da hidratação, hidrólise, oxidação, lixiviação, troca de cátions, carbonatação etc.

Todos esses fenômenos que envolvem a produção de sedimentos (erosão, deslocamento e deposição) são processos naturais que sempre ocorreram através dos tempos geológicos, sendo responsáveis pela forma atual da superfície da Terra. No entanto, a componente antrópica altera este processo natural, em geral, acelerando sua ação e aumentando sua intensidade, caracterizando a *erosão hídrica acelerada* (Bastos, 1999). Com o aumento da população e do uso dos recursos naturais, essa influência aumenta da mesma forma, sendo as consequências piores quanto menor é o cuidado com a conservação do solo.

Segundo Basso *et al.* (2014), foi na Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente realizada em Estocolmo em 1972, o primeiro momento em que o tema erosão, suas causas e consequências foi abordado pela comunidade internacional.

Ainda, conforme esse mesmo autor, a erosão, juntamente com a erodibilidade, passou então a ser estudada em diversas áreas de conhecimento, como Agronomia, Geologia, Geografia e Engenharia Civil (Hidráulica e Geotecnia) (Figura 3) por autores como Bastos (1999), Lacerda *et al.* (2001), Guerra (2002), Surtegaray (2003), Guerra e Mendonça (2004), entre outros.

No âmbito da Engenharia Geotécnica, destacam-se os trabalhos de Maciel Filho (1997), Dias *et al.* (1998), Bastos (1999), Fragassi (2001), Koetz (2003), Jacintho *et al.* (2006), Camapum de Carvalho *et al.* (2006b) e inúmeros outros trabalhos publicados em periódicos e anais de congressos, fóruns, simpósios, conferências e livros (Basso *et al.*, 2014).

ÁREA DO CONHECIMENTO		ENFOQUE
AGRONOMIA	Física dos Solos	Estudo de características físicas, químicas e mineralógicas que influenciam a erodibilidade dos solos dos horizontes superficiais e estudo de modelos de previsão da perda de solo;
	Manejo e Conservação do Solos	Estudo do impacto de técnicas de cultivo e manejo no processo erosivo;
HIDRÁULICA	Hidráulica de Canais	Estudo da erosão localizada dos solos pelo fluxo d'água em estruturas hidráulicas (p.ex. canais em terra);
GEOLOGIA	Geologia de Engenharia	Estudos concentrados no diagnóstico ambiental da erosão, nas condicionantes geológicas e geomorfológicas à erosão regional e no relato de obras para controle da erosão;
ENGENHARIA	Engenharia Geotécnica	Ainda limitada abordagem ao problema da erosão. Poucos trabalhos na modelagem dos mecanismos de erosão e em critérios de avaliação da erodibilidade de solos.

Figura 3: Enfoque de estudos sobre erosão por diferentes áreas do conhecimento.
Fonte: Bastos, 1999.

A maioria dos estudos de erosão do solo é de base empírica. Geralmente, o método de estudo envolve o uso de parcelas experimentais de erosão ou canais em laboratório para observar o mecanismo do processo erosivo e coletar dados de perda de solo em função de características da precipitação, do solo e do escoamento superficial. Esses dados são, então, analisados estatisticamente, visando ajustar equações para predição das perdas de solo. Devido às diferenças das condições hidrológicas naturais que podem existir entre eventos de precipitação, vários anos de registro de dados são necessários para se ajustar uma equação confiável de predição da erosão do solo.

A equação de predição de erosão mais amplamente conhecida é a Equação Universal de Perdas de Solo - EUPS (Wischmeier e Smith, 1978) (Equação 1), que é de base empírica e não leva em consideração, de forma individualizada, os processos físicos envolvidos na erosão do solo, como o desprendimento e transporte de partículas de solo. A EUPS apenas discrimina a significância dos diferentes fatores que regem o processo erosivo. Dentre esses fatores, estão incluídos a precipitação, o comprimento da

encosta, a declividade da encosta, a erodibilidade do solo, o cultivo (uso do solo) e as práticas agrícolas.

Sua representação clássica é a seguinte:

$$A = R.K.L.S.C.P \quad (1)$$

Em que: A é a taxa de erosão; R é o fator erosividade da chuva; K é o fator erodibilidade do solo; L é o fator comprimento de rampa; S é o fator inclinação da rampa; C é o fator cobertura vegetal e P é o fator de práticas de cultivo e manejo.

A EUPS foi desenvolvida para predizer valores médios de perdas de solo por arraste em áreas específicas e sob condições de uso do solo e práticas de gerenciamento definidas (Kuntschink, 1996). A mesma avalia os efeitos do clima, propriedades do solo, topografia, nível de colheita-produtividade, administração de resíduo, práticas especiais de conservação e outras variáveis que causam a erosão do solo, mas não consegue estimar deposição de sedimentos nem perdas de solo por erosão em voçorocas.

A maior limitação ao uso desses modelos está na dificuldade em se trabalhar uma grande quantidade de dados que descrevem a heterogeneidade dos sistemas naturais. Pesquisadores têm reconhecido que a variabilidade espaço-temporal nas características da paisagem, incluindo o solo, uso da terra, relevo e clima, afeta a resposta hidrológica do sistema físico, implicando em limitações na aplicação de modelos (Machado, 2002).

Segundo Tallis *et al.* (2012) as estimativas de perdas do solo por erosão resultantes da aplicação da equação universal de perda de solo devem ser utilizadas com bastante precaução, ao se considerar as críticas existentes ao modelo. A primeira delas é que esse modelo simula apenas a erosão laminar e, em algumas áreas, outros processos podem ser mais importantes e determinantes para a perda de solos. Além disso, as estimativas do modelo são anuais, não permitindo a análise da variação sazonal e de eventos extremos. Soma-se a isso a dificuldade em encontrar uma boa base de dados e resultados de pesquisa para a atribuição de valores para os fatores uso e cobertura da terra (C) e práticas de manejo (P).

Além disso, a EUPS foi originalmente elaborada para aplicação em rampas uniformes, dessa maneira, uma de suas limitações é não considerar rampas não

uniformes, não sendo aconselhável aplicá-la em áreas irregulares, por não considerar a deposição de sedimentos ao longo das encostas (Lane *et al.*, 1992).

O fator K_{EUPS} pode ser determinado de forma indireta, através do Nomograma de Wischmeier *et al.* (1971), cujos gráficos têm como parâmetros de entrada as porcentagens de silte, areia muito fina (0,002 a 0,1mm) e areia (0,1 a 0,2mm), teor de matéria orgânica, tipo de estrutura e classe de permeabilidade (Figura 4) (Bastos, 1999).

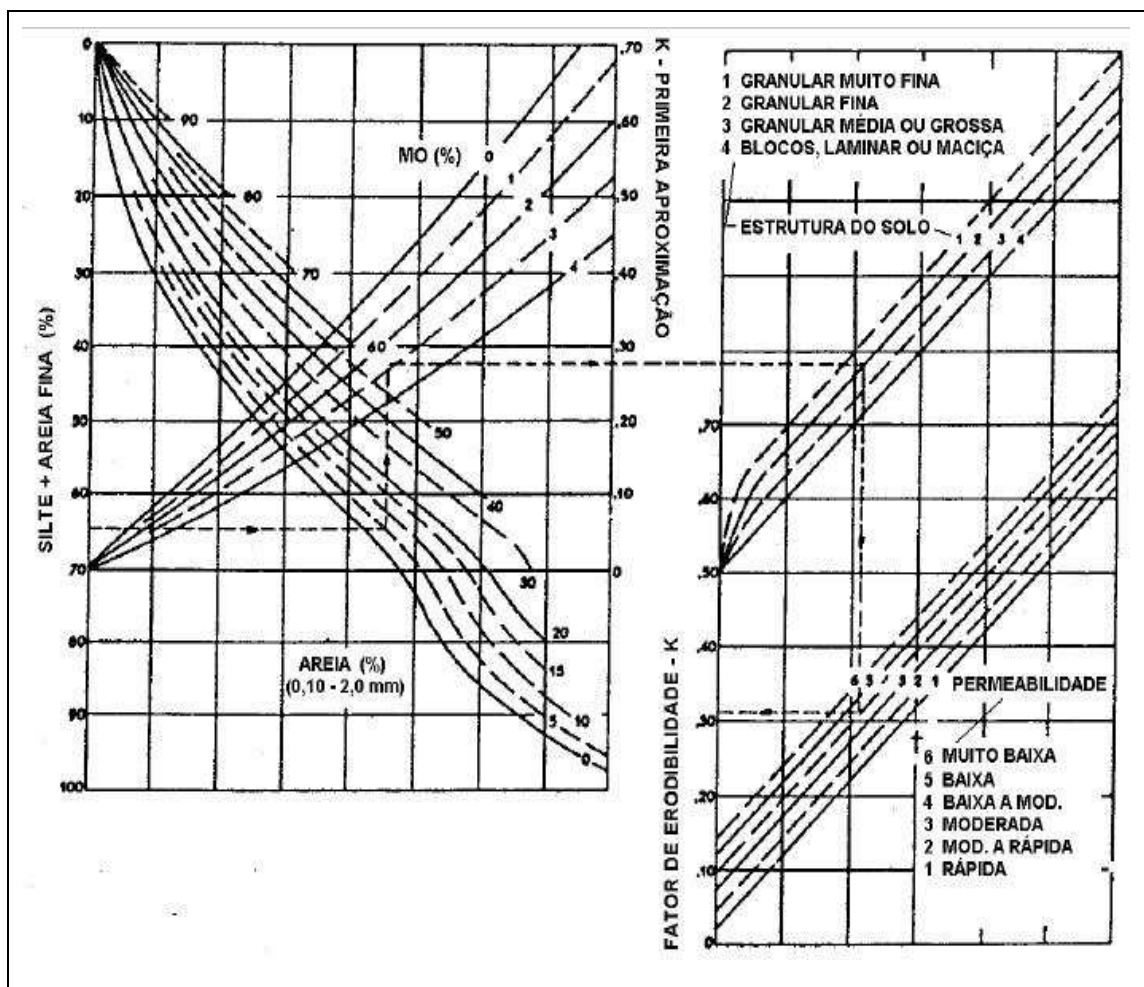


Figura 4: Nomograma de Wischmeier *et al.* (1971).

Fonte: Pruski (2009)

Estima-se que os solos sejam potencialmente erodíveis quando $K_{EUPS} > 0,20$ (Stephan, 2010).

De acordo com Bastos (1999), a EUPS e o Nomograma de Wischmeier podem ser aplicados a áreas construídas. Uma vantagem dessa aplicação encontra-se na possibilidade de avaliar a erodibilidade dos diferentes horizontes do perfil do solo, que podem ser expostos nas obras, e prever os materiais mais susceptíveis.

Entretanto, a aplicação da EUPS é mais adequada a áreas agrícolas adjacentes a obras civis, mas, mesmo nestas áreas, encontra-se dificuldades pela pequena quantidade de valores experimentais disponíveis do fator de erodibilidade K para solos tropicais (Bastos, 1999).

Uma revisão da EUPS é proposta em Renard *et al.* (1991) através da RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation*), na qual se ampliou o banco de dados para os parâmetros erosividade e erodibilidade e modificou-se os fatores comprimento e inclinação de rampa e manejo e cobertura do solo.

2.2.1. Agentes erosivos

A erosão é um processo mecânico que ocorre devido a ação de diferentes agentes em superfície e profundidade que, com intensidades diferentes, causa perdas de solo e de seus nutrientes.

Os agentes erosivos são os elementos do meio físico que causam, ou afetam, diretamente a erosão, podendo ser classificados como ativos e passivos.

Os agentes ativos resultam da ação da natureza sob a superfície e através de sua influência modificam lentamente o solo. Podem-se citar a água, temperatura, vento, gelo, neve, a ação de microorganismos vivos e a ação humana, que potencializa a atuação dos demais agentes erosivos. Como exemplo da ação antrópica, pode-se citar o desmatamento, a ocupação de encostas, as atividades de mineração entre outros.

Os agentes passivos decorrem das condições topográficas do terreno, da cobertura vegetal, da gravidade, do tipo de solo e demais características intrínsecas do material, que resultam em uma maior ou menor susceptibilidade à erosão.

As condições topográficas do terreno, como a declividade e o comprimento de rampa, influenciam, particularmente, o escoamento superficial. Por consequência, terrenos com altas declividades e elevado comprimento de rampa apresentam maiores velocidades de escoamento superficial e, por consequência, maior susceptibilidade à erosão.

A cobertura vegetal é responsável pela interceptação da chuva e diminuição da velocidade do escoamento superficial. O desmatamento e algumas formas de uso do solo alteram o balanço hídrico podendo aumentar as possibilidades de ocorrência de

erosão. Por outro lado, as raízes afetam propriedades do solo relacionadas à sua erodibilidade, assim como o tipo de solo e demais características intrínsecas do material.

A erodibilidade do solo e a erosividade da chuva são os dois fatores físicos mais importantes relacionados à magnitude e/ou intensidade da erosão do solo (Vitte, 2007).

2.2.2. Erosividade da chuva

A chuva é o agente erosivo mais importante, pois provoca diretamente a erosão pelo impacto de suas gotas sobre a superfície de solo exposta e determina o fluxo concentrado das águas de escoamento superficial. Sua ação erosiva, chamada de erosividade, depende da distribuição pluviométrica (chuva acumulada e intensidade de chuva), ou seja, a erosividade de uma chuva é atribuída à sua energia cinética (Vitte, 2007). Além disso, como principais características da chuva pode-se ainda citar a duração e as distribuições temporal e espacial.

O fator erosividade (R) da chuva ($\text{tm.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}$) é uma variável da EUPS (Equação Universal de Perda de Solo) e expressa numericamente a capacidade da chuva, em uma dada localidade, de causar erosão em uma área sem cobertura (Bertoni & Lombardi Neto, 1990).

O cálculo do fator (R) é relativamente complexo e carece de registros udográficos de grande precisão.

De acordo com Wischmeier & Smith (1978), ao manter os outros fatores constantes, as perdas de solo geradas pela chuva são diretamente proporcionais ao valor de um parâmetro de chuva chamado “índice de erosão” (EI). Este índice corresponde ao efeito do impacto das gotas de chuva ao atingir o solo, desprendendo as partículas pelo salpicamento e pela turbulência combinados com a enxurrada que transporta as partículas desprendidas.

Segundo aquele mesmo autor, o EI é definido a partir do produto da energia cinética da chuva (E) pela sua intensidade máxima em 30 min (I_{30}). Esse termo reflete como a energia total e o pico de intensidade são combinados em cada evento de chuva.

2.2.3. Erodibilidade

Definida por Bastos (1999) como a propriedade do solo que retrata a maior ou menor facilidade com que suas partículas são destacadas e transportadas pela ação de um agente erosivo, a erodibilidade constitui uma das propriedades dos solos de maior complexidade, em função do grande número de fatores físicos, químicos, biológicos e mecânicos intervenientes.

Veiga (1988) define ainda a erodibilidade do solo, sob condições de escoamento superficial, como a quantidade de solo desprendido por unidade de área, tempo e tensão aplicada.

A erodibilidade é aquele fator mais próximo ao enfoque geotécnico, pois está relacionada diretamente às propriedades físicas, químicas, mineralógicas e mecânicas dos solos (Bastos 1999). Porém, ainda são necessários estudos que consolidem métodos de avaliação dessa propriedade e que permitam seu estudo segundo propriedades geomecânicas de comportamento abordadas pela Mecânica dos Solos (ISSMFE, 1985; Pastore, 1986 e Vilar Prandi, 1993).

Para a avaliação direta da erodibilidade em laboratório, foram desenvolvidos alguns equipamentos para a realização de ensaios como de Inderbitzen, *Pinhole Test*, *Slaking Test*, Cilindros Rotatórios, Método de Nogami e Villabor e Dispersão. Porém, sua quantificação direta esbarra em dificuldades práticas relacionadas à pequena magnitude das tensões envolvidas e da necessidade de se representar complexas condições ambientais (Bastos, 1999).

Alguns autores têm desenvolvido estudos de investigação da erodibilidade dos solos no Brasil e buscaram aprimorar a qualidade dos resultados obtidos, são eles: Bastos (1999), Fragassi e Marques (2001), Ramidan (2003), Paiva (2004), Menezes *et al.* (2006) e Mendes (2006). Pode-se citar ainda outros trabalhos com foco na determinação dessa propriedade, como os de Santos (1997), Fácio (1991), Freire (2001), Motta (2001), Koetz (2003) e Stephan (2010).

Ao avaliar, indiretamente, a erodibilidade de um solo, é usual que se recorra à tentativa de se estabelecer correlações dessa propriedade com parâmetros geotécnicos do solo como análise granulométrica, índices físicos, parâmetros de resistência, coeficiente de permeabilidade, entre outros, além de ensaios de caracterização mineralógica e química do solo e composição química da água (Stephan, 2010). Há que

se considerar ainda a estabilidade estrutural, o conteúdo de matéria orgânica e a natureza dos minerais de argila. Entretanto, Bastos (1999) afirma que não existe uma metodologia indireta considerada universal para a determinação da erodibilidade do solo.

A importância de se conhecer a característica granulométrica do solo ou da rocha, deve-se ao fato desta ser responsável pela capacidade de armazenamento e transmissividade de água, que por sua vez, relacionam-se diretamente com a condutividade hidráulica do material. Além disso, a análise granulométrica é fundamental uma vez que os diâmetros das partículas do solo influenciam na sua desagregação e transporte (Chuquipiondo, 2007). Esse parâmetro é o mais estudado dentre as características físicas do solo e sua relação com os processos erosivos.

De acordo com a curva granulométrica obtida, o solo pode receber diferentes classificações. Alguns sistemas de classificação utilizam a curva granulométrica para prever o comportamento de solos grossos, por exemplo. Para tanto, esses sistemas utilizam índices para avaliar a uniformidade e curvatura do solo.

Os coeficientes de uniformidade e curvatura de um solo, Equação (2 e 3), são obtidos a partir de fórmulas cujo parâmetros de entrada são os diâmetros equivalentes característicos do solo (Saraiva, 2007):

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2)$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}} \quad (3)$$

Em que:

D_{10} : corresponde a 10% em peso do material que passa, tomado na curva granulométrica.

D_{30} : corresponde a 30% em peso do material que passa, tomado na curva granulométrica.

D_{60} : corresponde a 60% em peso do material que passa, tomado na curva granulométrica.

Segundo Saraiva (2007), a curva granulométrica pode ser classificada de acordo com o coeficiente de uniformidade (C_u), conforme os seguintes parâmetros:

$C_u \leq 5$: Solo muito uniforme

$5 < C_u < 15$: Solo de uniformidade média

$C_u \geq 15$: Solo não uniforme

De acordo com este mesmo autor, quanto ao coeficiente de curvatura (C_c) a curva granulométrica do solo pode ser classificada como:

$1 < C_c < 3$: Solo bem graduado

$C_c \leq 1$ ou $C_c \geq 3$: Solo mal graduado

Vargas (1977) correlacionou a erodibilidade de solos arenosos e argilosos à uniformidade. Para os solos arenosos a erodibilidade será maior quanto mais uniforme for sua granulometria. Para os solos argilosos, o fenômeno complica-se, intervindo a estrutura, o teor de umidade, o grau de saturação e a expansibilidade do solo.

Conforme cita Koetz (2003), diversos autores como Vargas (1977), Fácio (1991) e Santos (1997), afirmaram serem os solos mais erodíveis aqueles que apresentam uma composição granular, com predominância de partículas da ordem de areia fina ou silte e demonstrando ainda pouca quantidade de argila.

De acordo com Fu *et al.* (2011), experimentos realizados avaliando a erosão e textura do solo mostraram que aqueles com elevada quantidade de silte apresentam maior suscetibilidade à erosão hídrica se comparados aos argilosos e arenosos sob as mesmas condições.

Bastos (2001) ao estudar a erodibilidade de solos residuais não saturados da Região Metropolitana de Porto Alegre, concluiu que o teor de finos (% passante na peneira #200) foi a propriedade que melhor se relacionou estatisticamente à taxa de erodibilidade (K) e que melhor identificou a erodibilidade relativa de campo. Solos de baixa erodibilidade apresentaram teor de finos maior que 55%, enquanto os solos com erodibilidade média a alta apresentaram % passante na peneira #200 < 35%. Em relação à plasticidade, o estudo permitiu inferir que solos de baixa erodibilidade apresentaram $IP \geq 10\%$, quanto solos de alta erodibilidade, $IP \leq 5\%$.

Meireles (1967) ao estudar solos de Angola, estabelece critérios baseados na plasticidade e granulometria, respectivamente:

- Solos fortemente erodíveis: baixa plasticidade – $LL \leq 21\%$ e $IP \leq 8\%$
- Solos fortemente erodíveis: % passante na peneira #200 $\leq 20\%$
- Solos passíveis de forte erosão: $20\% \leq \%$ passante na peneira #200 $\leq 40\%$
- Solos pouco erodíveis: % passante na peneira #200 $> 40\%$

Em relação à coesão, Bastos (op. cit.) observou que sua variação (Δc) entre as envoltórias de resistência obtidas com amostras nas condições de umidade natural e inundada, apresentou relação estatística significativa com o parâmetro K. Os solos com média a alta erodibilidade apresentaram $\Delta c \geq 85\%$, ou seja, solos mais erodíveis apresentam maior redução da coesão com a saturação na condição de fluxo d'água superficial. Assim, a resistência ao destacamento e transporte dos grãos por ação deste fluxo é dada pela resistência ao cisalhamento entre as camadas de grão superficial e subjacente à superfície do solo. Isto leva à compreensão de que a tensão crítica para cisalhamento dos solos pode ser entendida como a máxima tensão aplicada ao solo, sem que sejam destacadas as suas partículas (Griebeler, 2002).

Uma das etapas da proposta de abordagem geotécnica para previsão da erodibilidade de solos residuais não saturados, elaborada por Bastos (2001), prevê a avaliação direta da erodibilidade através do ensaio de Inderbitzen, para o qual se propõe o seguinte critério, baseado em ensaios na umidade natural:

- $K < 0,001 \text{ g.cm}^{-2}.\text{Pa}$ – solos de baixa erodibilidade
- $0,001 \leq K \leq 0,1 \text{ g.cm}^{-2}.\text{Pa}$ – solos de mediana erodibilidade
- $K > 0,1 \text{ g.cm}^{-2}.\text{Pa}$ – solos de alta erodibilidade

Visando a obtenção de uma correlação entre a erodibilidade e as características físico-químicas e mineralógicas dos solos do Distrito Federal, Fácio (1991) realizou as análises dos seguintes parâmetros:

- Plasticidade: o aumento da plasticidade aumenta a resistência à erosão.

➤ Granulometria: solos mal distribuídos ($C_u < 5$) comportam-se como erodíveis e aqueles bem distribuídos ($C_u > 15$), como pouco erodíveis.

➤ $(\text{SiO}_2) / (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3)$: quanto menor a relação, mais laterizado está o solo e, conseqüentemente, maior será a resistência à erosão. Se a relação for menor que 2 o solo é considerado como laterizado e, para valores maiores que 2, eles são tidos como solos não laterizados.

➤ Presença de cátions trocáveis: a correlação entre os fatores em questão, quando feitos isoladamente, não permite uma conclusão devido à dispersão encontrada.

➤ Mineralogia: solos com argilas do tipo montmorillonita possuem resistência à erosão maior que a illita, que por sua vez, possui uma resistência maior do que a caulinita, de acordo com Arumugan (1974, *apud* Fácio (1991)).

A equação (4), proposta por Fragassi (2001), classifica os solos quanto à erodibilidade:

$$E = 0,0002 e^{5,6444X} \quad (4)$$

Em que:

E = erodibilidade (g.cm^2);

X = $(\% \text{silte} + \% \text{areia fina}) / (\% \text{argila} + \% \text{areia grossa})$

Parte-se do princípio de que as argilas e areias grossas são mais resistentes à desagregação do que as areias finas e siltes. A partir disso, correlaciona-se a erodibilidade ao quociente da porcentagem de solos erodíveis com solos não erodíveis (Stephan, 2010). Este autor utiliza ainda o critério do DNER (1979) em que classifica-se os solos com $49\% \leq \% \text{passante na peneira } 40 \leq 96\%$ como “boa a regular resistência à erosão”.

A Tabela 1 apresenta o critério elaborado por Santos (2001) ao relacionar Índice de Plasticidade (IP) e Coeficiente de Uniformidade (C_u).

Tabela 1: Critérios adotados por Santos (2001) ao relacionar Índice de Plasticidade (IP) e Coeficiente de uniformidade (C_u).

IP	Erodibilidade	C_u	Erodibilidade
$IP > 15$	boa resistência à erosão	$C_u > 15$	baixa erodibilidade
$6 \leq IP \leq 15$	média resistência à erosão	$5 \leq C_u \leq 15$	média erodibilidade
$IP < 6$	baixa resistência à erosão	$C_u < 5$	solos erodíveis

Fonte: Santos (2001)

No que tange aos índices físicos e à perda de solo, algumas correlações são propostas:

- Solos facilmente erodíveis apresentam índices de vazios $e > 0,7$ e solos resistentes à erosão apresentam $e \leq 0,7$. (Bastos, 1999).
- Peso específico dos grãos (γ_s) está relacionado ao maior ou menor grau de compactação. Assim, quanto maior o γ_s , mais compacto o solo estaria, apresentando-se, portanto, como menos erodível (Mendes, 2006).

2.2.4. Tipos de erosão

De acordo com o agente, o processo erosivo pode ocorrer de diferentes formas. O principal agente ativo precursor da erosão é a água, caracterizando a erosão hídrica. Este tipo manifesta sua ação de diferentes formas, erosão por salpicamento (ação da gota da chuva), erosão laminar ou superficial, erosão em ravinas ou sulcos e erosão em voçoroca/boçoroca.

Segundo Fendrich *et al.* (1984), a erosão hídrica pode ser dividida em dois grupos: erosão superficial e erosão subterrânea. A erosão superficial causada pela água em um solo exposto, ou parcialmente exposto, se dá em quatro estágios distintos (embate, laminar, sulcos e voçoroca). Esses estágios procedem no tempo de recorrência, para um dado ponto em uma dada extensão, e na progressão do declive do terreno, para um tempo particular.

A erosão por embate decorre da energia de impacto das gotas d'água de encontro ao solo, que além de desintegrar parcialmente os agregados naturais em partículas menores, as movimenta a curtas distâncias. Este estágio de erosão superficial apresenta maiores magnitudes no intervalo de tempo decorrido entre o início da precipitação e a

formação do escoamento superficial. A quantidade de solo desestruturado aumenta com o tamanho, intensidade e velocidade das gotas.

De acordo com Bertoni e Lombardo Neto (1990), somente cerca de quarenta anos após a realização de vários estudos em campo e laboratório, tornou-se claro o fato de que o impacto das gotas da chuva em um solo descoberto e o consequente desprendimento de suas partículas é realmente a principal causa da erosão provocada pela água.

A erosão por escoamento superficial se dá quando a intensidade da chuva supera a capacidade de infiltração do solo, formando um fluxo que causa uma remoção progressiva e uniforme dos horizontes superficiais, chamada erosão laminar. O fluxo superficial que escoar para as cotas mais baixas tende a se concentrar gerando filetes (linhas de fluxo) responsáveis pela formação dos sulcos. Ela também é conhecida por erosão intersulcos e varia largamente com a susceptibilidade do terreno ao desgaste laminar, dependendo principalmente da declividade e características do solo.

Segundo Fragassi (2001) as áreas com solos profundos e moderadamente profundos, bem como aquelas sujeitas a chuvas fortes e intensas, são provavelmente mais difíceis de sofrer a erosão laminar. Nos locais em que os solos superficiais rasos repousam sobre subsolo argiloso denso ou outras camadas impermeáveis, o terreno é especialmente sujeito à esta forma de erosão. Solos siltosos, solos arenosos friáveis e todos os solos deficientes em matéria orgânica são também excepcionalmente vulneráveis.

A erosão em ravinas ou sulcos ocorre quando a água superficial converge para pequenas depressões, ganha velocidade e começa a transportar sedimentos, formando canais nos quais o fluxo superficial se concentra. Ela é considerada como o estágio mais avançado da erosão laminar. De acordo com Fragassi (2001) pode-se dizer que nos solos jovens, arados, especialmente aqueles com alto teor de silte, em que as declividades são mais íngremes, com cerca de 4% ou 5% de inclinação, este tipo de erosão é a mais comum.

A intensificação no processo de sulcamento do solo pela maior concentração do fluxo leva à formação de ravinas. O ravinamento do solo já indica significativa gravidade da ação erosiva, pois implica em grandes perdas de solo e no comprometimento da regularidade do terreno. O aprofundamento das ravinas pode levar

à forma mais espetacular do processo de erosão hídrica, a formação de boçorocas (Bastos, 1999).

A voçoroca é o estágio mais avançado e complexo de erosão acelerada, correspondendo à passagem gradual do processo de ravinamento até atingir o lençol freático, com o aparecimento de surgências d'água. Diversos processos estão presentes na voçoroca, podendo-se citar os relacionados com o escoamento pluvial (lavagem superficial e formação de sulcos), erosão interna do solo, solapamentos e escorregamento dos solos, além da erosão provocada pela água do escoamento pluvial (Magalhães, 2001).

A ação da água subterrânea é apontada como uma das principais causas do desenvolvimento de voçoroca, dependendo de como esta se situa em relação ao lençol freático. A lenta percolação da água se processa junto às paredes da voçoroca e vai solapando o pé do talude que dá sustentação a uma porção da parede. Quando esta porção cai, impede o fluxo da água subterrânea por um tempo até que se produza uma pressão de percolação que vença as resistências da parede, desagregando-a (Fragassi, 2001).

Outra origem para o voçorocamento se dá a partir do escoamento superficial concentrado das águas das chuvas no interior de cicatrizes abertas por deslizamentos em vertentes íngremes (Guerra, 1999).

2.3. Ensaios de Inderbitzen

O Ensaio de Inderbitzen é destinado ao estudo da erodibilidade dos solos. Dentre os ensaios de canais hidráulicos este é o mais utilizado no meio geotécnico, principalmente pela sua simplicidade.

O ensaio de erodibilidade de Inderbitzen (1961) simula o escoamento superficial que ocorre no campo, com o objetivo de monitorar o volume de perdas de solos por unidade de área em decorrência dos processos erosivos observados. A Figura 5 ilustra o equipamento em sua concepção original.

O princípio de funcionamento baseia-se no escoamento de uma lâmina d'água sobre uma rampa, cuja inclinação pode ser alterada, bem como a vazão de escoamento, permitindo a alteração das tensões cisalhantes aplicadas (Griebeler *et al.*, 2005). Em um orifício localizado na base da rampa, fixa-se uma amostra de solo indeformada,

tangencialmente ao plano determinado pela superfície da rampa, permitindo que o solo amostrado seja atingido uniformemente pela lâmina d'água, ocasionando erosão superficial por um tempo determinado. Os resultados são expressos em gráficos da perda de solo x tempo e velocidade de erosão x tempo (Inderbitzen, 1961).

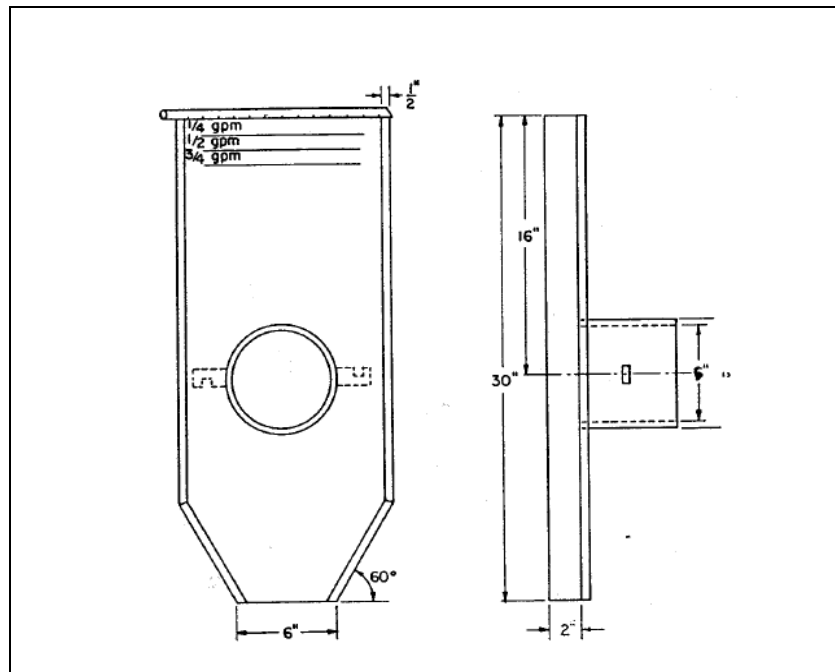


Figura 5: Concepção original do aparelho do Ensaio de Inderbitzen. (1961).

Fonte: Inderbitzen (1961)

Stephan (2010) pondera que o fato desse ensaio não levar em consideração o efeito *splash* da gota de chuva, faz com que o teor de sedimentos obtido com o ensaio seja menor do que o real. Diferença esta que se torna mais significativa em solos desprotegidos de cobertura vegetal.

Bastos (1999), em seus estudos de erodibilidade formulou uma proposta de abordagem geotécnica para o problema de erosão observado na Região Metropolitana de Porto Alegre (RMPA). A mesma envolveu a avaliação direta e indireta da erodibilidade do solo através do ensaio de Inderbitzen e de propriedades físicas e mecânicas do solo, respectivamente.

Fragassi (2001) apresenta os resultados obtidos no estudo de caracterização da erodibilidade dos solos residuais de gnaiss da Serra de São Geraldo e de um talude de solo gnáissico localizado em Viçosa (MG). Essa caracterização foi realizada de maneira

direta através do ensaio de Inderbitzen e indiretamente, através da correlação desta com algumas propriedades geotécnicas desses solos. Nesse estudo foi desenvolvida uma nova versão do aparelho de Inderbitzen (1961), com o objetivo de aperfeiçoamento da mesma.

Observou-se que vários fatores influenciam a erodibilidade dos solos, como por exemplo, a plasticidade, teor de matéria orgânica, absorção de sódio e outros. Entretanto a granulometria mostrou ser a característica de maior influência, podendo ser adotado como parâmetro individual para uma avaliação prévia dessa propriedade. Assim, o estudo permitiu concluir que os solos residuais jovens, com a presença de granulometria constituída por areia fina e silte, são solos mais susceptíveis à erosão em contrapartida aos solos residuais maduros, que apresentaram uma granulometria predominantemente argilosa.

O ensaio de Inderbitzen foi realizado por Mendes (2006) com o objetivo de avaliar a perda de solo por erosão superficial e a erodibilidade, K , uma vez que esses fatores retratam o potencial de erosão dos solos. Este trabalho foi desenvolvido em encostas de uma área rural do município de Bom Jardim – RJ, em que se observam solos pouco espessos e ocorrência de chuvas torrenciais. As amostras foram retiradas de parcelas experimentais sob cultivo de banana (15 anos), sob pousio florestal (3 anos), sob cultivo rotacionado e testemunha (Mata Atlântica).

Para a realização dos ensaios, foi utilizado o equipamento modificado por Vilela (2003). Conforme observou o autor, as maiores perdas de solo ocorreram no intervalo de tempo de 5 a 10 minutos. As taxas de erosão relacionadas à amostra de solo sob cultivo de banana foram baixas quando comparadas com as amostras de solo sob pousio florestal. Apesar disso, o comportamento da erosão ao longo do tempo nos ensaios destas amostras foi similar ao encontrado na amostra de parcela de solo sob pousio.

Ao comparar as perdas de solo observadas para as amostras de solo sob pousio recente com as amostras testemunhas (Mata Atlântica), observou-se que as primeiras se apresentaram, aproximadamente, 25% superiores.

Este autor observou ainda, que houve certa correlação entre a presença de fração silte e a ocorrência da erosão nas amostras estudadas, de modo que aquelas com maiores proporções dessa fração do solo apresentaram-se mais erodíveis.

A metodologia de Inderbitzen (1961) modificada por Freire (2001) e Higashi (2006) sugere algumas modificações no equipamento de Inderbitzen. O procedimento

que emprega o equipamento original avalia a erodibilidade dos solos através da análise dos sedimentos carregados de uma amostra de solo inserida no orifício na base de uma rampa, sujeita à erosão causada pelo escoamento superficial de uma lâmina de água de vazão constante. A diferença fundamental entre os dois equipamentos está no fato de que no aparelho modificado, a erosão causada pelo impacto das gotas de chuva sobre a superfície do solo é considerada na avaliação da susceptibilidade à erosão de cada tipo de solo. (Grando *et.al.*, 2009).

A Figura 6 ilustra o equipamento idealizado por Higashi (2006).

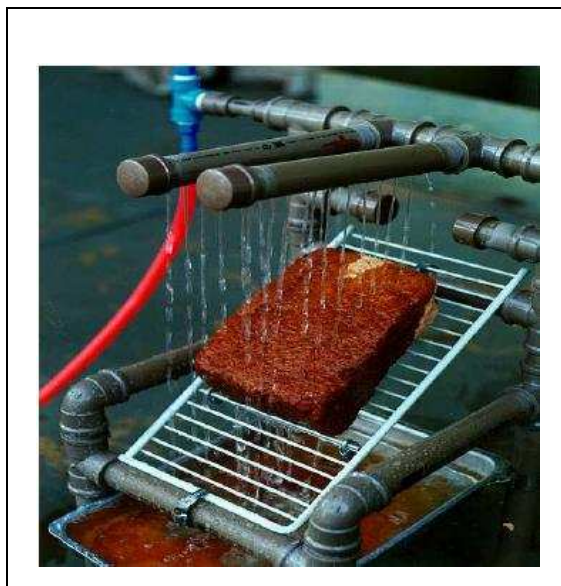


Figura 6: Equipamento de Inderbitzen modificado por Higashi (2006).
Fonte: Grando *et al.* (2009)

Segundo Higashi (2006) a erodibilidade do solo é expressa em porcentagem e calculada por meio da razão entre o peso do material retido em cada peneira depois de seco e o peso total seco da amostra.

$$e = \frac{Prss}{Ptss} \times 100 \quad (5)$$

Em que:

e é a erodibilidade do solo (%);

$Prss$ é o peso do solo seco retido nas peneiras após ensaio (gramas);

$Ptss$ é o peso total seco da amostra (gramas).

Stephan (2010) adaptou um equipamento de Inderbitzen na Universidade Federal de Viçosa para estudar a perda de solo por erosão hídrica em três taludes em Juiz de Fora. A análise indireta da erodibilidade dos solos baseou-se nas propriedades geotécnicas (índices de consistência, granulometria, teor de umidade natural, massa específica dos sólidos, permeabilidade e resistência ao cisalhamento). A análise direta da erodibilidade foi realizada através dos ensaios de Inderbitzen.

A autora utilizou rampas com diferentes orifícios para inserção da amostra, com o intuito de verificar o efeito de forma e tamanho da amostra nos resultados de perda de solo. A vazão e declividade das rampas permaneceram constantes. Os resultados lavaram à conclusão de que mudanças na forma e tamanho do orifício da rampa influenciaram na determinação da erodibilidade dos solos. Foi possível concluir ainda, que os solos estudados não apresentam resistência à erosão laminar, justificando as grandes erosões observadas em campo.

Fonseca (2014) desenvolveu seu trabalho na sub-bacia do Córrego do Yung, em Juiz de Fora, mesorregião da Zona da Mata Mineira, analisando o comportamento dos horizontes pedológicos B e C em relação à erosão superficial, e a partir de ensaios geotécnicos e de caracterização física dos materiais, estabelecendo correlações com a sua erodibilidade. Além dos ensaios geotécnicos de erodibilidade (Inderbitzen) e de cisalhamento direto, foram realizadas análises mineralógicas. O ensaio de Inderbitzen evidenciou a correlação da composição granulométrica do horizonte do solo com a erodibilidade, uma vez que o horizonte C apresentou maior perda de solo acumulado, em vista do menor teor de argila e ausência de estrutura, que condicionam grãos mais soltos, portanto mais erodíveis. Verificou-se ainda uma menor resistência ao cisalhamento na condição inundada, evidenciando a menor resistência do solo saturado, o que ocorre em épocas chuvosas.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS

3.1. Considerações iniciais

A lavra de minério de ferro no Complexo Alegria, composto pelas minas Alegria Centro, Alegria Sul, Alegria Norte e Germano, é desenvolvida pela Samarco Mineração S/A, nos municípios de Ouro Preto e Mariana, no estado de Minas Gerais.

3.2. Localização

A área estudada compreende as Minas Alegria Norte e Alegria Sul, inseridas no complexo Germano-Alegria (Figura 7) e situa-se nos municípios de Mariana e Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil, na porção sudeste do Quadrilátero Ferrífero, distante cerca de 120 km da capital do estado, Belo Horizonte. O acesso é feito a partir de Belo Horizonte pela rodovia federal BR-040, em direção à cidade do Rio de Janeiro (RJ), até o trevo que leva às cidades de Ouro Preto e Mariana, de onde se prossegue cerca de 90 km pela Rodovia dos Inconfidentes (BR-356) até a cidade de Mariana. Segue então, pela rodovia estadual MG-129, por aproximadamente 30 km de estrada asfaltada (estrada Mariana – Catas Altas – Santa Bárbara).

Na Figura 8 apresentam-se vistas parciais das cavas de Alegria Norte e Alegria Sul.

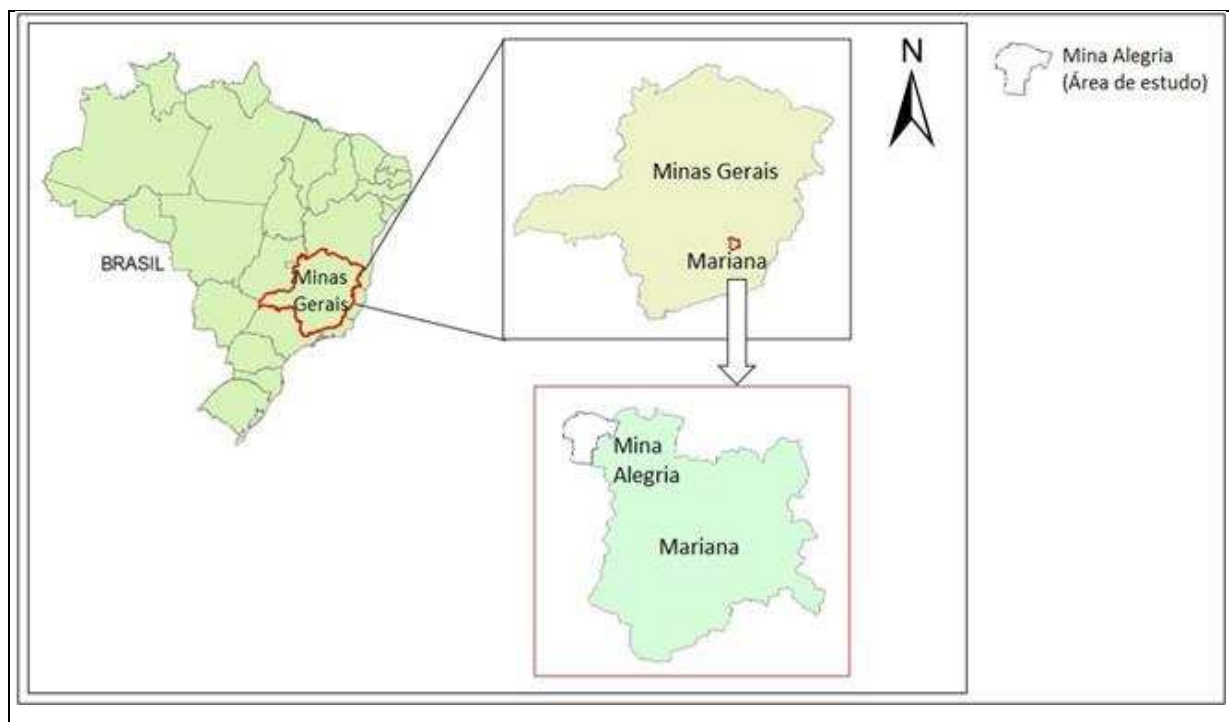


Figura 7: Localização da área de estudo.



Figura 8: Vista parcial das minas de Alegria Norte (esquerda) e Alegria Sul (direita).

3.3. Clima

A área de estudo se encontra em uma zona de clima tropical de altitude, caracterizada por verões chuvosos e invernos secos. A temperatura média anual está em

torno de 19°C. A precipitação média anual (PMA) é de aproximadamente 1.860 mm, conforme registros obtidos na Estação Pluviométrica de Germano (Carneiro, 2013).

Da precipitação registrada, aproximadamente 90% ocorre durante o período entre Outubro e Abril e o restante entre os meses de Maio a Setembro, o que pode ser observado no gráfico da Figura 9.

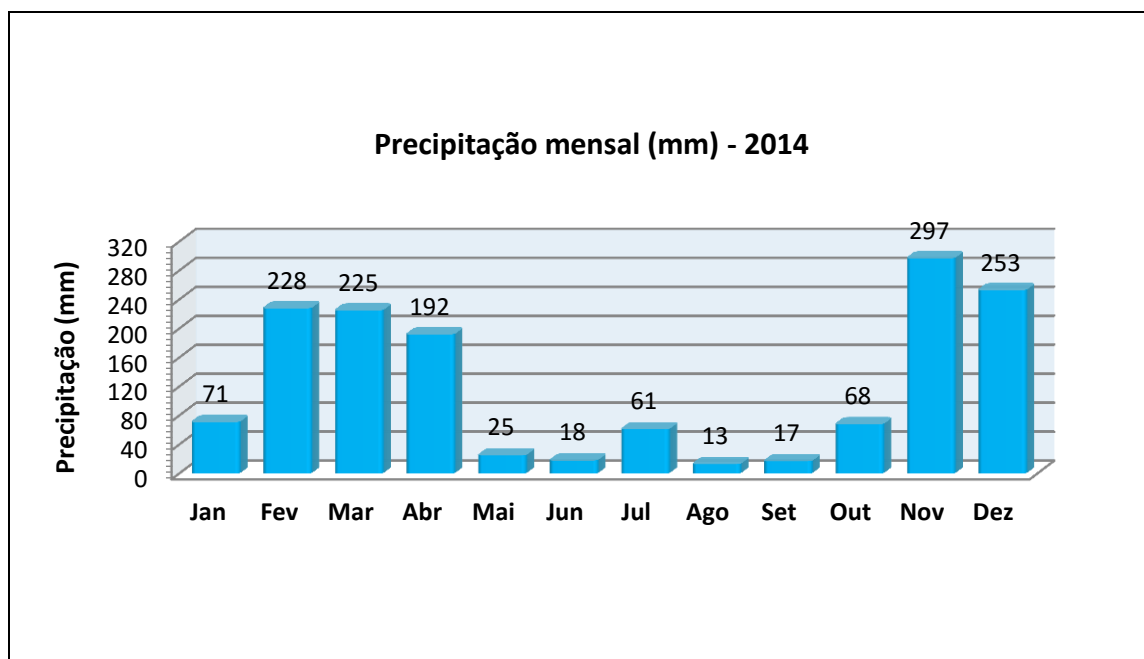


Figura 9: Precipitação mensal para o ano de 2014.

Fonte: Samarco

3.4. Aspectos pedológicos, geológicos e geomorfológicos

As reservas da SAMARCO estão localizadas no chamado Complexo Alegria, inserido no sinclinal de Alegria, em zona de alta deformação na borda leste do Quadrilátero Ferrífero.

O Quadrilátero Ferrífero (QF) abrange aproximadamente 7.000 km², no qual um conjunto de serras dispostas quase ortogonalmente é assinalado pela ocorrência de formações ferríferas e minérios de ferro. O mesmo limita-se ao norte pelas serras do Curral del Rei, da Piedade e do Cipó; ao sul, pelo rio Paraopeba, junto às cabeceiras dos rios São Francisco e Doce, em um formato aproximadamente quadrado, responsável por seu nome.

O QF pode ser considerado como a mais importante província mineral do Brasil, tornando-se uma das principais regiões produtoras de minério de ferro do mundo. Isto

devido ao seu elevado teor e grau de pureza e também, ao fato dessas serem as maiores reservas do mundo. Por esta razão, é uma das regiões brasileiras mais estudadas no contexto geológico.

O QF é caracterizado pelo arranjo grosseiramente quadrangular de sinclinais onde afloram sedimentos plataformais do Supergrupo Minas, de idade Paleoproterozóica. O Supergrupo Minas inclui quatro Grupos: Caraça, Itabira, Piracicaba e Sabará.

A formação ferrífera, hospedeira do minério presente na área de estudo, encontra-se na Formação Cauê, do Grupo Itabira, pertencente ao Supergrupo Minas. O Grupo Itabira é constituído, principalmente, por camadas itabiríticas, as quais se originam por intemperismo e metamorfismo. Além dos diversos tipos de itabiritos, estão presentes nessa formação outros materiais ferruginosos como cangas, brechas e hematitas compactas, e ainda, rochas não ferruginosas como quartzitos, filitos, filitos dolomíticos, xistos e metabasitos.

Itabiritos, dolomitos ferruginosos e filitos hematíticos compõem um conjunto de formações ferríferas metamórficas do Grupo Itabira na região do QF. Itabiritos são fortemente oxidados apresentando, descontinuamente, corpos de minério de alto teor ($> 64\%$ Fe), de morfologia mais ou menos lenticular e dimensões variáveis, desde alguns centímetros até centenas de metros. Estes apresentam níveis de hematita intercalada com níveis silicáticos.

O minério presente nas cavas da SAMARCO é caracterizado pela presença de corpos de minério fortemente lineados, segundo a orientação dos eixos das dobras, paralelizado na direção de estiramento local (Rosière *et al.* 1991).

A gênese do minério é explicada pela atuação de eventos tectonometamórficos sobre sedimentos ferríferos, durante o Pré-Cambriano, e posterior superposição de processos de enriquecimento supergênico do Fe, ocorridos a partir do Cenozóico (Carneiro, 2013). Essa combinação de fenômenos originou itabiritos, em geral friáveis a pulverulentos, enriquecidos em ferro e apresentando assembleias variadas entre os minerais: martita, especularita, goethita e magnetita.

Os itabiritos podem ser fisicamente duros, moles ou pulverulentos (DNPM, 1986). Encontram-se nas áreas mais elevadas da região, apresentando erodibilidade elevada, quando muito friáveis, e alta suscetibilidade a escorregamentos quando muito fraturados.

O itabirito é definido como uma “formação ferrífera bandada da fácies óxido, laminada e metamorfsada, na qual as bandas de chert ou jaspe originais foram recristalizadas em quartzo granular megascopicamente distinguível e na qual o ferro está presente como hematita, magnetita ou martita” (Dorr, 1964a).

Segundo este autor, a rocha mãe de todos os minérios de ferro em Minas Gerais (Brasil) é o itabirito. Atualmente, o conceito de itabirito como rocha-minério está consagrado na literatura internacional como sinônimo de formação ferrífera bandada metamorfsada.

O itabirito dolomítico é uma rocha constituída por estratos onde predominam a dolomita e a calcita (carbonato). Dolomita ou anfibólitos, estes últimos comumente cummingtonita e tremolita, localmente substituem, em maior ou menor grau, o quartzo no itabirito. Onde a dolomita ou anfibólito são abundantes, a magnetita e seus produtos de oxidação também o são.

Os itabiritos aqui estudados possuem a seguinte classificação: itabirito martítico (IM), especularítico (IE) e goethítico (IG) (de acordo com o mineral predominante) e o itabirito anfibolítico (IA). Quanto às características físicas (consistência), foram classificados como friáveis, intermediários e compactos.

Feitosa *et al.* (1993) identificaram que os principais constituintes do minério de Alegria são:

- 1) A hematita porosa (hematita martítica), constituinte mais abundante da jazida de Alegria, é de formação secundária, fruto do processo de martitização das magnetitas primárias;

- 2) Especularita (hematita especular), constituinte menos abundante que o citado anteriormente, que está associado aos minérios mais “limpos”, ou seja, menos aluminosos e menos fosforosos;

- 3) Goethita, pode estar presente dentro de grãos de hematita porosa, sendo produto da martitização das magnetitas ou pode ter hábito botrioidal e ser produto do intemperismo;

- 4) Magnetitas residuais, presentes em pequena proporção; e

- 5) Quartzo, que é o principal mineral da ganga.

Além disso, pode-se citar um grupo de constituintes secundários no qual se observa a presença da goethita terrosa (“limonita”) e as argilas.

Os solos da região são diversificados quanto à sua classificação. Porém, em sua maioria pode-se considerar que são álicos ou distróficos e compreendem Cambissolos, Latossolos e Neossolos Litólicos.

Devido à sua peculiaridade, merecem destaque os solos originados dos itabiritos, pela sua riqueza em minerais de ferro, destacando-se a hematita, magnetita e maghemita.

Em razão da variação físico-química das rochas itabiríticas, ocorrem variações químicas e mineralógicas dos solos delas desenvolvidos, o que pode comprometer algumas relações pedológicas utilizadas no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos na diferenciação de solos ricos em ferro. Isso também pode ocorrer ao se classificar o solo de acordo com o critério de SUCS, e também ao se tentar estabelecer correlações entre os diversos parâmetros que caracterizam o solo (físico, mecânico, mineralógico) com a propriedade de erodibilidade do mesmo.

3.5. Relevo

As jazidas de minério de ferro da SAMARCO posicionam-se na porção meridional da Serra do Caraça, que apresenta relevo extremamente montanhoso com grandes amplitudes altimétricas atingindo desde 2.072 m no topo da Serra do Caraça, até cotas da ordem de 900 m no vale do rio Piracicaba (Carneiro, 2013).

Ainda segundo este autor na área de exposição da formação ferrífera, a morfologia do terreno exibe um entalhamento acentuado da rede de drenagem, que corta transversalmente as estruturas geológicas regionais.

A área de influência do complexo minerador insere-se na faixa de transição entre o Domínio de Cerrados e o Domínio Tropical Atlântico.

3.6. Hidrografia

A área de estudo encontra-se inserida na bacia do rio Piracicaba, que insere-se na Bacia do rio Doce. O rio Piracicaba é o principal eixo de drenagem da área estudada (Figura 10 e Figura 11). O mesmo nasce a 1680 m de altitude, um dos vértices da Serra do Caraça, podendo-se identificar as microbacias dos córregos Palmital, João Manoel e das Almas, todos situados à margem esquerda do rio Piracicaba. Esses córregos

constituem os mais importantes tributários e todos eles têm as suas nascentes situadas no imponente maciço quartzítico que sustenta as grandes elevações da Serra do Caraça (Carneiro, 2013).

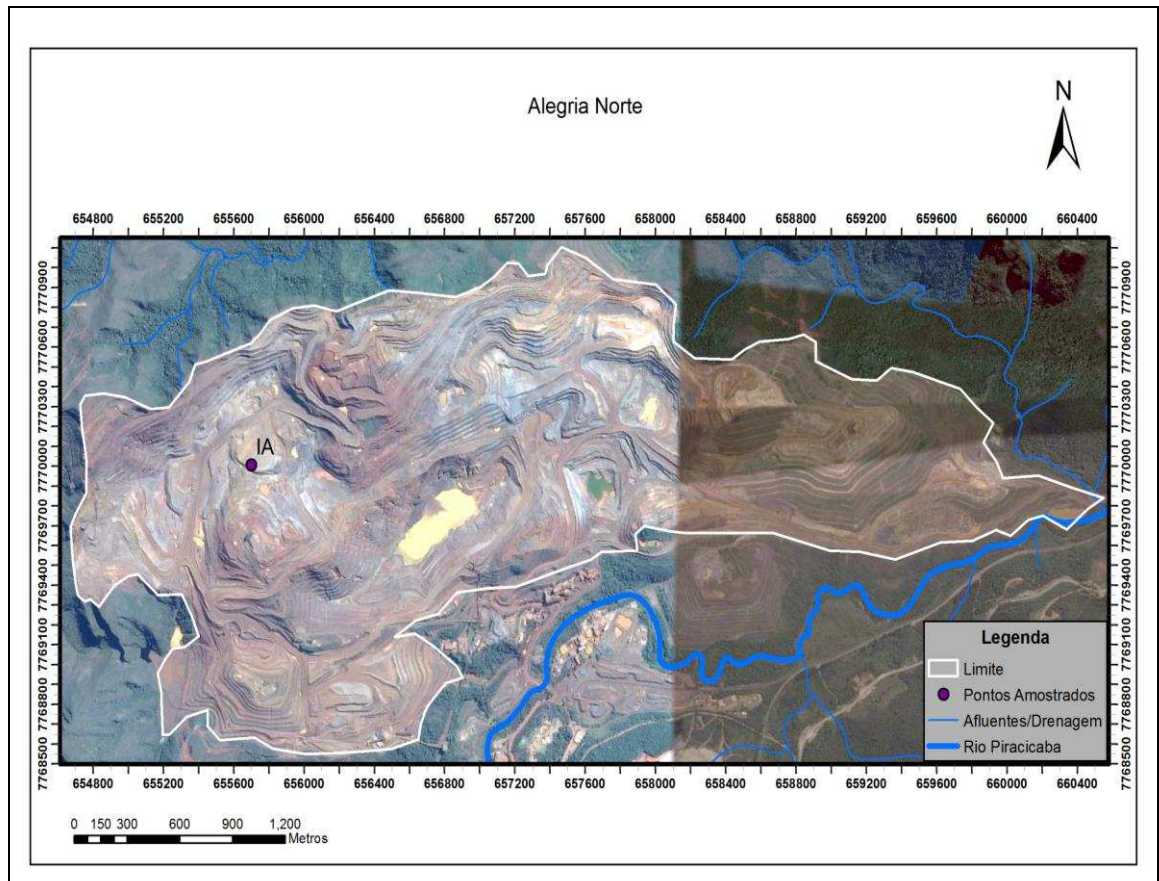


Figura 10: Hidrografia da área de estudo – Alegria Norte.

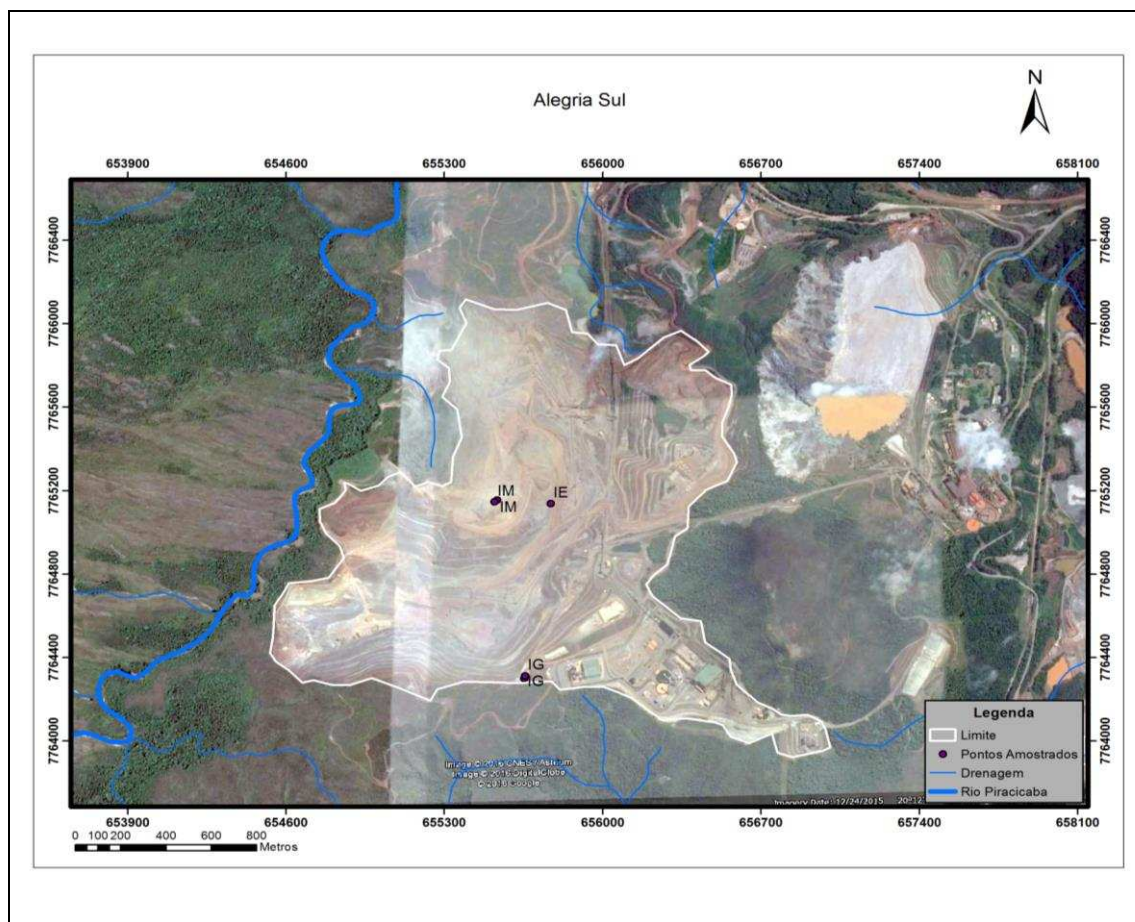


Figura 11: Hidrografia da área de estudo – Alegria Sul.

No local denominado como Mina Alegria 9, o rio Piracicaba atinge a área da SAMARCO e nos limites da mina Alegria Sul o seu primeiro tributário, o córrego Palmital.

Segundo Carneiro (2013), o córrego dos Macacos drena terrenos de domínio de rochas do Grupo Piracicaba e corre subparalelo às estruturas regionais. Esse córrego deságua na margem direita do rio Piracicaba, na área de contato com as rochas da Formação Carcadinho. A partir daí o rio passa a mostrar um perfil mais suave e desde esse ponto se observa o predomínio do processo de sedimentação sobre a erosão.

3.7. Uso e ocupação do solo

Segundo Carneiro (2013), a área de influência indireta do local de estudo insere-se na faixa de transição entre o Domínio de Cerrados e o Domínio Tropical Atlântico. As coberturas vegetais presentes no entorno são campos de altitude, matas pluviais, matas de candeia e pastos.

Entretanto, na área do estudo, compreendida no interior da mina de Alegria, observa-se uma paisagem comprometida, sem cobertura vegetal, com taludes e encostas apresentando elevada declividade e elevado comprimento.

Apesar de se tratar de uma área com atividades intensamente dinâmicas, com mudanças diárias na forma do relevo, assim como ocorre com os “*sumps*” (bacias de retenção de água), é possível observar locais onde o solo encontra-se compactado, devido à movimentação de maquinários de médio e grande porte, desfavorecendo ainda mais o processo de infiltração das águas pluviais e potencializando o desenvolvimento dos processos erosivos.

Paralelo a isso, ocorrem falhas na manutenção das estruturas de drenagens e receptação das águas de chuva, além do fato de que, usualmente, sua construção não é precedida de estudos e projetos individualizados.

4. METODOLOGIA

4.1. Trabalho de campo

4.1.1. Identificação dos materiais amostrados

Os pontos de amostragem nas minas Alegria Norte e Alegria Sul, Figura 12 e Figura 13, respectivamente, foram previamente definidos a partir do mapa geológico da área de estudo, de modo que se garantisse a retirada de amostras que representassem cada material geológico objeto desse estudo. Os pontos de amostragem para os materiais IM e IG aparecem duplicados no mapa (Figura 13), pois ao se retirar mais de uma amostra houve um pequeno deslocamento, gerando uma segunda coordenada.

Posteriormente, realizou-se visitas *in loco*, com o objetivo de validar as informações através da análise da viabilidade de acesso ao local, pois as elevadas declividades dos taludes poderiam resultar em riscos de instabilizações, inviabilizando os trabalhos. Além disso, a extração das amostras poderia se tornar inviável caso se observasse a presença de material pouco intemperizado.

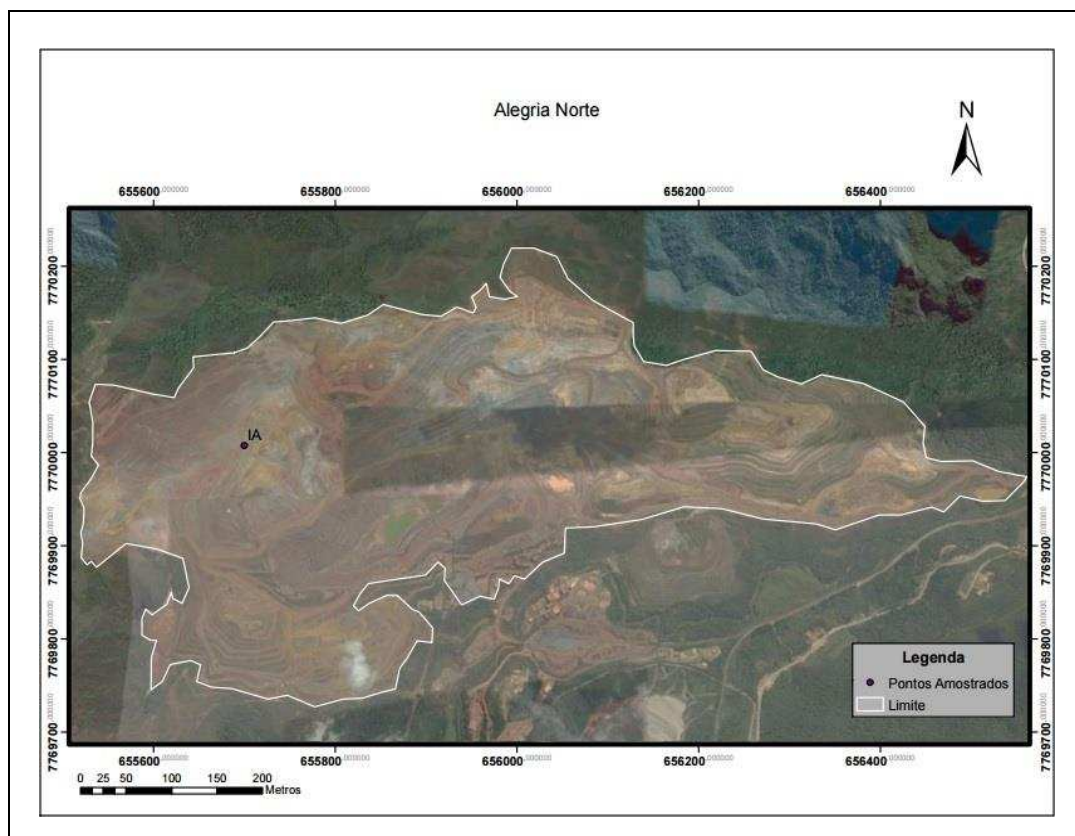


Figura 12: Pontos amostrados na Alegria Norte (IA)

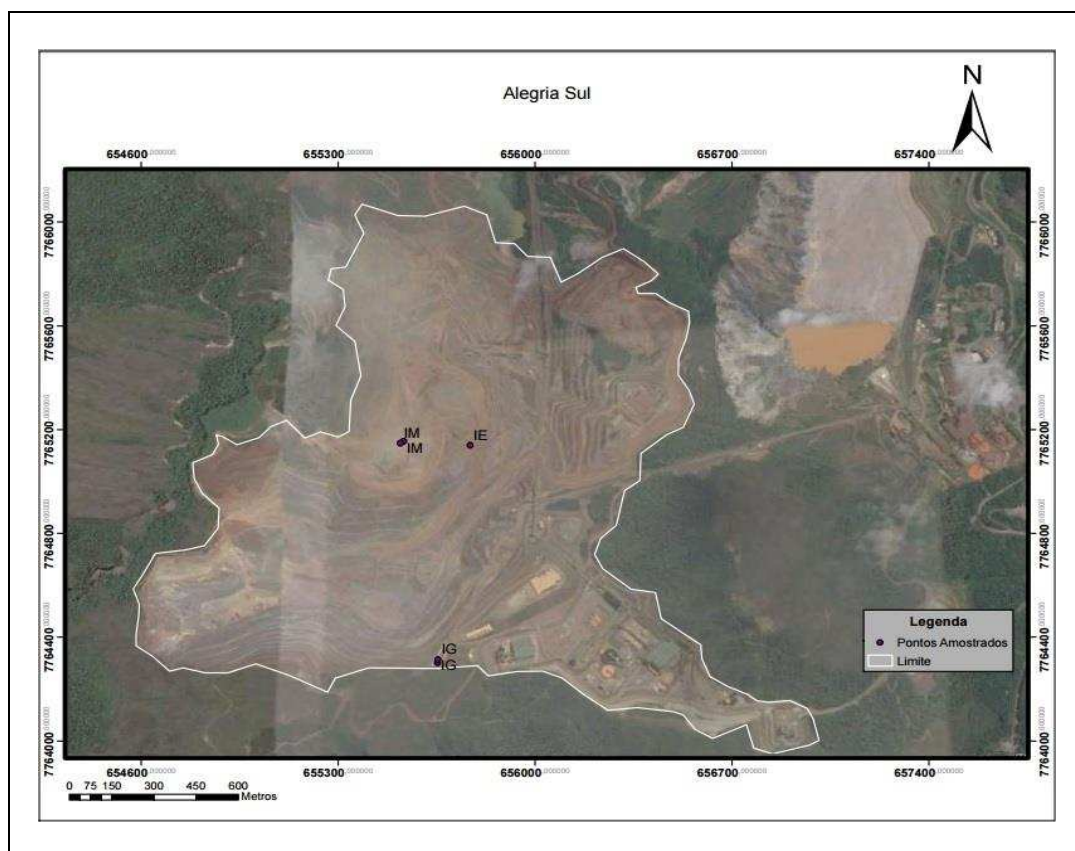


Figura 13: Pontos amostrados na Alegria Sul (IM, IG e IE).

A identificação dos litotipos amostrados seguiu a atual classificação utilizada na mina. Vale ressaltar que essa classificação é focada no processo de beneficiamento do minério: Itabirito Especularítico (IE) (Figura 14), Itabirito Martítico (IM) (Figura 15), Itabirito Goethítico (IG) (Figura 16), Itabirito Anfibolítico (IA) (Figura 17).

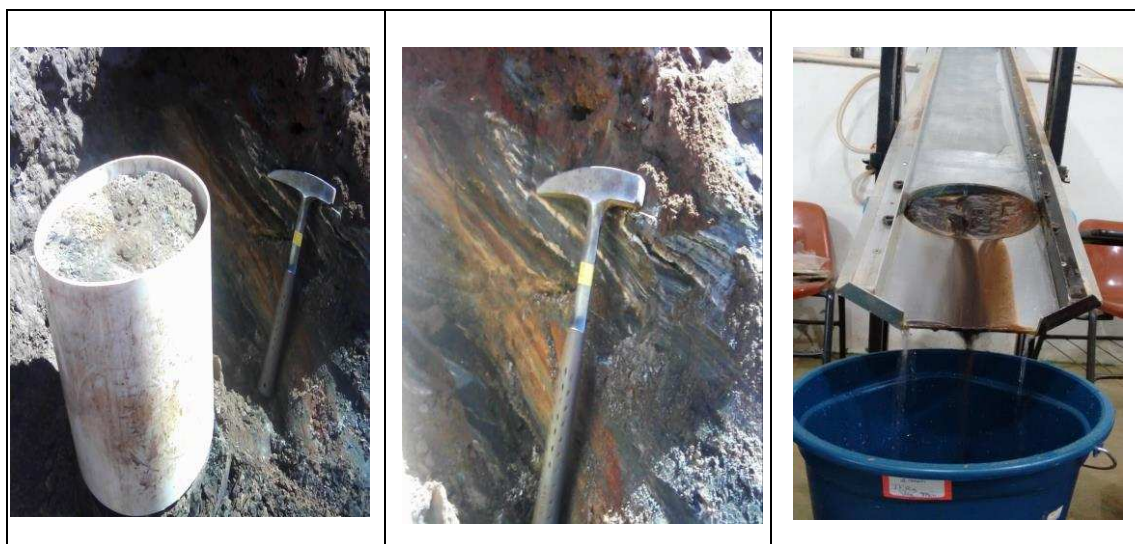


Figura 14: Itabirito especularítico (IE).



Figura 15: Itabirito martítico (IM).

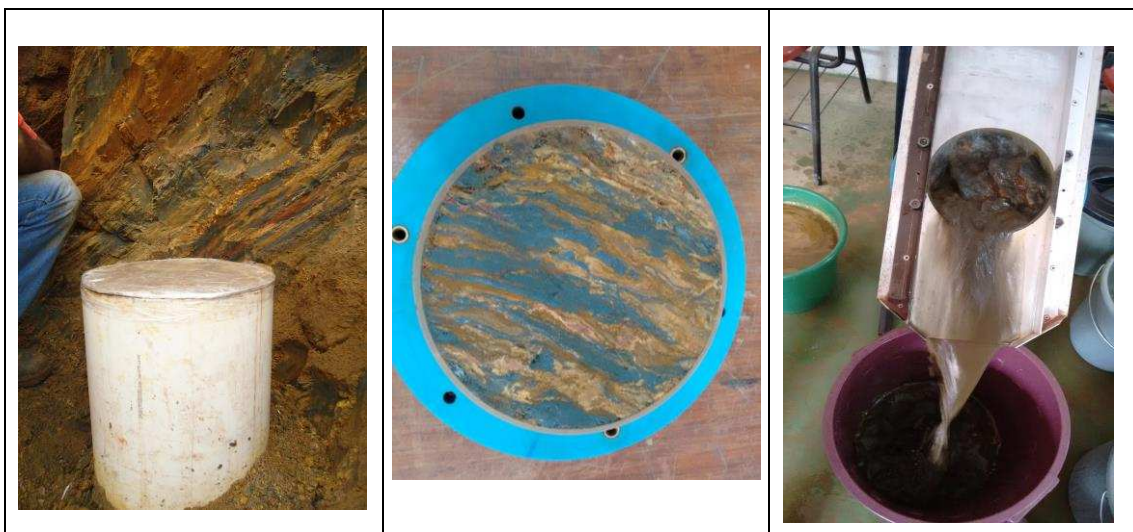


Figura 16: Itabirito goethítico (IG).



Figura 17: Itabirito anfibolítico (IA).

Os solos coletados encontravam-se no terço inferior da topossequência, em talude de corte da mina e podem ser classificados geologicamente como solos residuais. De acordo com as denominações e características dos perfis de alteração realizadas por Pastore (1997), as amostras de IE caracterizam-se como Horizonte de solo saprolítico (III); de IM, como Horizonte de solo saprolítico (IV) e de IG e IA, como Horizonte Laterítico (II).

4.1.2. Amostragem

Com base na NBR 9604/86, foi realizada a coleta de amostras deformadas e indeformadas de solo.

Entretanto, houve uma adaptação da metodologia tradicionalmente aplicada para este fim, devido a questões de segurança do trabalho, uma vez que no interior da mina não se permitia o uso do fogareiro, anteriormente utilizado para derreter a parafina que seria utilizada para proteger a amostra. A caixa de madeira foi substituída por um cilindro de PVC rígido com dimensões de 300 mm de altura e 300 mm de diâmetro, com o subsequente uso de filme plástico de PVC em substituição à proteção com bordos de parafina.

Para cada ponto de amostragem foram retirados 6 cilindros de PVC, conforme ilustram as fotos na Figura 18. Os mesmos foram transportados em caixas de isopor para o Laboratório de Mecânica dos Solos, de Geotecnia e de Mecânica dos Resíduos da UFV. Posteriormente, atentou-se para os devidos cuidados referente ao armazenamento das amostras, visando a preservação de suas características originais.

A seguir, encontra-se a sequência das etapas realizadas para a retirada das amostras:

- No ponto a ser amostrado, iniciou-se a escavação de um bloco no qual foi apoiado o PVC para a retirada da amostra. Esta tarefa foi realizada com auxílio de enxada;
- O tubo de PVC foi apoiado e encaixado sobre o bloco. Nessa etapa pode-se recorrer ao auxílio de uma marreta ou martelo de borracha para facilitar o encaixe porém, sem uso de força excessiva;
- Após o encaixe do tubo de PVC e ainda com o auxílio de uma marreta ou martelo de borracha ou ainda, de uma serrinha, faca, facão ou espátula, retirou-se o excesso de material da porção externa do bloco em formato cilíndrico e cravou-se o PVC até que o mesmo se encontrasse totalmente cheio do material amostrado;
- Envelopou-se a parte superior do PVC com filme plástico;
- Cortou-se da porção inferior do bloco. Para esse fim, utilizou-se o martelo de geólogo e uma serrinha;

- Ao se finalizar o corte da base do PVC, virou-se o mesmo rapidamente e procedeu-se ao envelopamento da base com filme plástico.
- O transporte da amostra foi realizado em caixas de isopor com o máximo cuidado para evitar impactos e pequenos choques que também poderão comprometer a qualidade das análises.

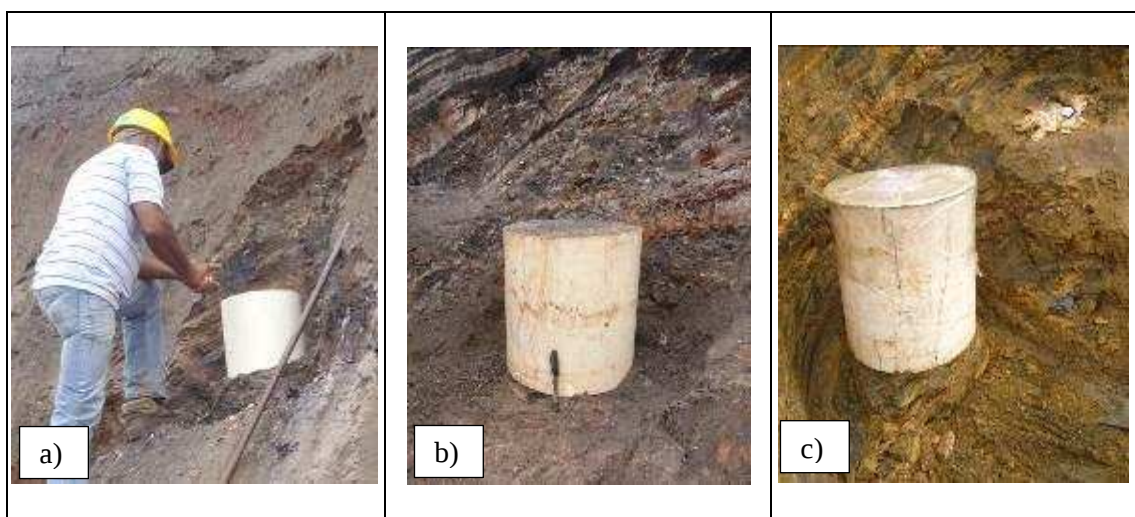


Figura 18: Procedimentos para amostragem: a) Escavação de um bloco no qual será apoiado o PVC para a retirada da amostra; b) Cilindro de PVC totalmente cheio do material amostrado e c) Amostra em fase final de preparo. Porção superior do cilindro envelopada com filme plástico. Base do bloco pronta para ser destacada para posterior retirada do PVC do local de amostragem.

4.2. Trabalho de laboratório

4.2.1. Preparo das amostras

Todos os ensaios foram realizados seguindo a normatização específica para sua elaboração.

A metodologia utilizada para o preparo de amostras deformadas para a realização dos ensaios de caracterização física seguiu as especificações constantes na NBR 6.457 (ABNT, 1986a), realizando-se então, as operações de secagem, quarteamento e destorroamento.

No que se refere à análise mineralógica, o preparo das amostras foi realizado de acordo com a rotina de análise do Laboratório de Difração de Raios X do Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto.

O preparo das amostras para o ensaio de cisalhamento direto (Figura 19) seguiu a norma ASTM D3.080 (ASTM, 2004) e para os ensaios de Inderbitzen, o preparo das amostras (Figura 20) foi realizado de acordo com a metodologia proposta por Stephan (2010), visto que ainda não houve uma normatização estabelecida para os seus procedimentos.



Figura 19: Amostra indeformada, moldada e pesada antes do ensaio de cisalhamento direto.



Figura 20: Amostra indeformada, moldada para a realização do ensaio de Inderbitzen.

O preparo das amostras para realização das análises químicas constituiu dos seguintes procedimentos: utilizou-se uma prensa hidráulica, com pressão de $4 \text{ t cm}^{-2}/\text{min}$, para produzir pequenas pastilhas, a partir das amostras, com altura de, aproximadamente, 2 mm. Cada uma dessas pastilhas foi acondicionada separadamente

em pequenos sacos plásticos. Posteriormente as mesmas foram colocadas em um porta amostras e levadas ao aparelho μ -EDX 1300 – Shimadzu, Kyoto, Japão, onde foram realizadas as leituras.

4.2.2. Caracterização Física

Os ensaios de caracterização física são considerados essenciais na análise, não apenas da erodibilidade, mas também de qualquer propriedade do solo. Porém, sua interrelação com a erodibilidade não é considerada simples e direta para autores como Jacintho *et al.* (2006). Para esses autores, os solos tropicais possuem a característica de serem agregados quando intemperizados, sendo um equívoco a relação direta entre a granulometria do solo e a erodibilidade, por exemplo (Basso, 2013).

De acordo com Cardoso (2002), da mesma maneira ocorre em relação à propriedade de plasticidade do solo. Por exemplo, solos com maior índice de plasticidade são menos erodíveis (exceto as argilas dispersivas), porém, quando se trata de solos tropicais, observa-se um comportamento menos erodível, devido à presença dos oxi-hidróxidos de ferro que conferem maior estabilidade e resistência ao solo, mesmo que esse apresente uma baixa plasticidade.

Os ensaios de caracterização geotécnica seguiram as metodologias discriminadas nas seguintes normas:

- ✓ Umidade natural e umidade higroscópica do solo (ω_n e ω_h , %): de acordo com a norma, NBR 6457 (ABNT/1986a);
- ✓ Peso específico aparente (γ , KN/m³): de acordo com a norma, NBR 10838 (ABNT /1988);
- ✓ Peso específico aparente seco (γ_d , KN/m³): obtido através da equação, $\gamma_d = \gamma / 1 + \omega_n$;
- ✓ Peso específico dos sólidos (γ_s , KN/m³): de acordo com a norma NBR 6508 (ABNT /1984);
- ✓ Limite de liquidez (LL%): de acordo com a norma NBR 6459 (ABNT /1984);
- ✓ Limite de plasticidade (LP%): de acordo com a norma, NBR 7180 (ABNT /1984);

- ✓ Índice de Plasticidade (IP, %): obtido por meio da diferença entre LL e LP;
- ✓ Análise granulométrica: de acordo com a norma, NBR 7181 (ABNT /1984).
- ✓ Índice de vazios (e): obtido através da equação, $e = (\gamma_s / \gamma_d - 1)$;
- ✓ Grau de saturação (Sr, %): obtido através da equação $Sr = \gamma_s \cdot \omega_n / (e \cdot \gamma_w)$;

4.2.3. Mineralogia

Dentre os vários métodos existentes para caracterização mineralógica a difração de raios-x (DRX) tem sido um dos mais utilizados por ser um processo qualitativamente preciso, rápido e mais barato que outras técnicas.

Para o estudo da constituição mineralógica dos solos amostrados foram realizadas análises mineralógicas por meio de difratometria de raios-X (DRX), no Laboratório de Difração de Raios X do Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto.

4.2.4. Análises Químicas

Para a realização das análises químicas recorreu-se à metodologia de análise semiquantitativa dos elementos através do espectrômetro de microfluorescência de raios X por energia dispersiva (μ -EDX 1300, Shimadzu, Kyoto, Japão) conforme ilustra a Figura 21, que, segundo Alves *et al.* (2015), realiza análises rápidas, eficientes, práticas e não destrutivas. O aparelho pertence à Sala de Instrumentação do Departamento de Solos da UFV, local onde foram realizadas as análises.

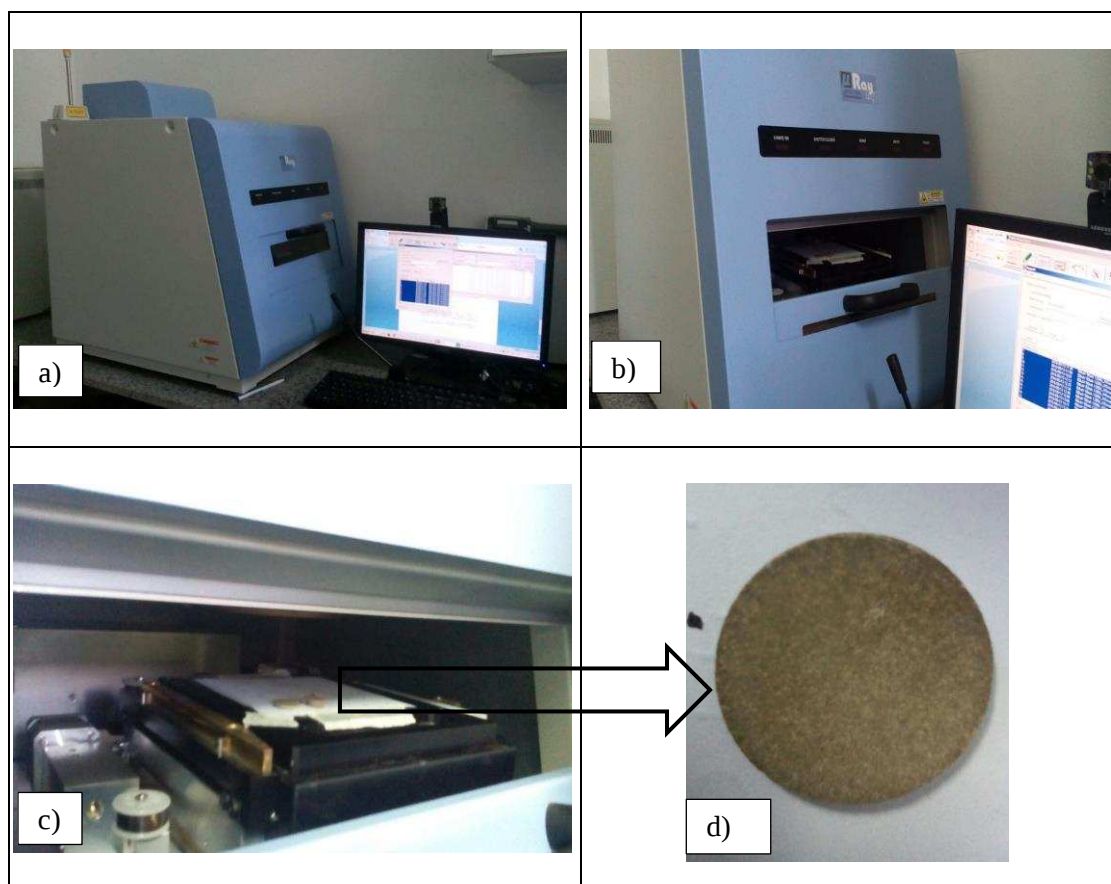


Figura 21: a) Espectrômetro de microfluorescência de raios X (μ -EDX 1300, Shimadzu, Kyoto, Japão); b) Aparelho aberto para introdução das amostras; c) Amostras acondicionadas no aparelho, prontas para o início das análises e d) Amostra em formato de pastilha, utilizada nas análises.

Anteriormente ao início das análises, o aparelho foi calibrado utilizando parâmetros fundamentais da técnica de fluorescência de raios-X. Para a calibração foram utilizadas quatro amostras de referência: *Soil Montana II* – NIST 2711a, BHVO-2 – *Basalt* – USGS, COQ-1 – *Carbonatite* – USGS e SDC-1 – *Mica* – USGS, obtendo-se os coeficientes de sensibilidade do equipamento para cada elemento químico.

4.2.5. Ensaios de Inderbitzen

Para a avaliação direta da erodibilidade foi realizado o Ensaio de Inderbitzen que é de simples execução e baixo custo, mesmo sendo um ensaio baseado em métodos empíricos e ainda não normatizado.

Para este projeto, foi utilizada a metodologia e a versão adaptada do aparelho de Inderbitzen, conforme Stephan (2010). O aparelho pertence ao Laboratório de Mecânica dos Resíduos da UFV, local onde foram realizados os ensaios.

O referido equipamento consiste em uma estrutura metálica composta por uma rampa hidráulica articulada medindo 170,0 cm de comprimento e 22,0 cm de largura, com um orifício circular de 14,4cm de diâmetro, distante 120 cm do ponto inicial do escoamento, onde é fixado o corpo de prova (Figura 22).

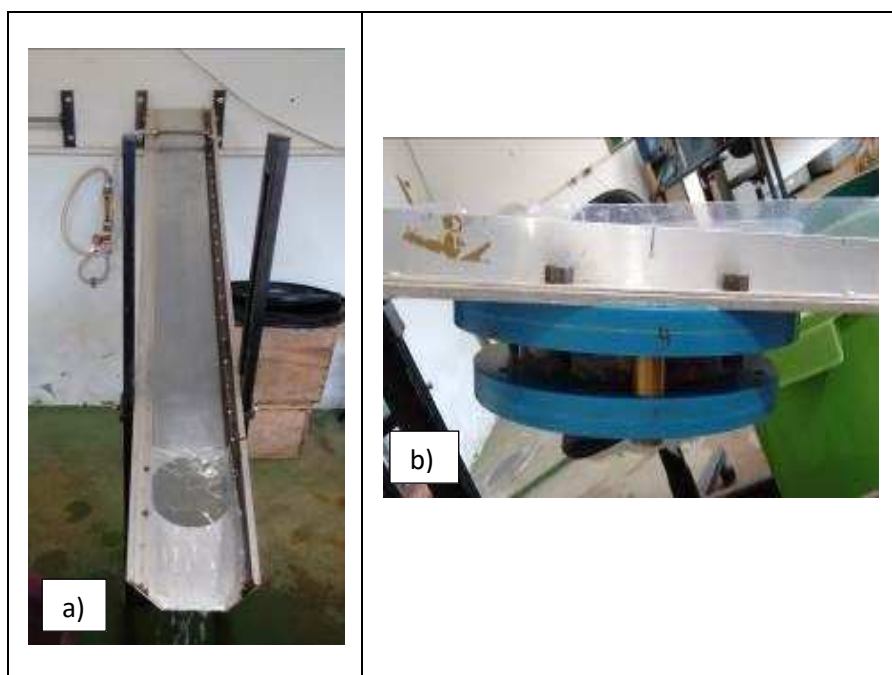


Figura 22: a) Aparelho de Inderbitzen e b) Corpo de prova fixado tangencialmente à rampa.

O anel amostrador onde se abriga o corpo de prova (amostra indeformada) é confeccionado em acrílico, sendo biselado em uma das suas extremidades. Ele possui 14,4 cm de diâmetro, 4,3 cm de altura e 162,86 cm² de área.

Foram realizadas três repetições do ensaio para cada material amostrado: IA, IG , IM e IE .

Posicionada tangencialmente ao plano da rampa, conforme demonstrado na Figura 15, a face superior do corpo de prova foi exposta a um fluxo controlado de lâmina d'água, ocasionando erosão no solo por um tempo determinado. As leituras foram realizadas nos seguintes intervalos de tempo: até 1 minuto, 1 a 5 minutos, 5 a 10 minutos e 10 a 15 minutos.

A água utilizada no ensaio foi proveniente de um reservatório de 40,0 litros. A vazão foi medida através de um rotâmetro, o qual permitiu que a mesma fosse controlada durante a realização do ensaio.

Anteriormente ao início do ensaio, procedeu-se ao cálculo da umidade natural do material e à calibração da vazão de ensaio. Foram utilizadas duas vazões, sendo uma mínima de $1,0 \text{ L.min}^{-1}$ ($16,7 \text{ ml.s}^{-1}$) (mínima vazão na qual se consegue obter um fluxo uniforme sobre a rampa) e uma vazão máxima de $7,0 \text{ L.min}^{-1}$ ($116,67 \text{ ml.s}^{-1}$).

De acordo com informações fornecidas pela SAMARCO, baseando-se em anos de monitoramento das chuvas naquela área, a máxima precipitação horária é, aproximadamente, 50 mm. Porém, visto que esse valor corresponde a uma vazão de $0,83 \text{ L.min}^{-1}$, (menor que $1,0 \text{ L.min}^{-1}$) e que nessas condições a lâmina d'água não se espalharia uniformemente em toda a largura da rampa, optou-se pelo uso de uma vazão maior do que a observada na área, porém com uma inclinação menor (30°) do que a que se pretendia utilizar inicialmente (45°). A princípio, o uso dessa inclinação pautava-se no objetivo de reproduzir em laboratório a pior condição de declividade observada em campo.

Na parte superior da rampa há um sistema móvel que permite a variação do ângulo de inclinação da mesma, que é realizada com o auxílio de um transferidor e um nível de bolha.

A água e o solo desagregado pelo fluxo laminar foram coletados em baldes plásticos, os quais foram identificados de acordo com o intervalo de tempo previamente definido para cada balde (0 a 1 minuto, 1 a 5 minutos, 5 a 10 minutos e 10 a 15 minutos), como pode ser observado na Figura 23.



Figura 23: Balde identificado no qual se coletou a água e o material carreados.

Na Figura 24 apresenta-se um exemplo das etapas de realização do ensaio de Inderbitzen, a saber: a) amostra indeformada pronta para o início do ensaio, b) fase inicial do ensaio e a utilização de um balde para coletar o material carreado em cada leitura (intervalo de tempo), c) fase final do ensaio e d) amostra de solo após o ensaio.

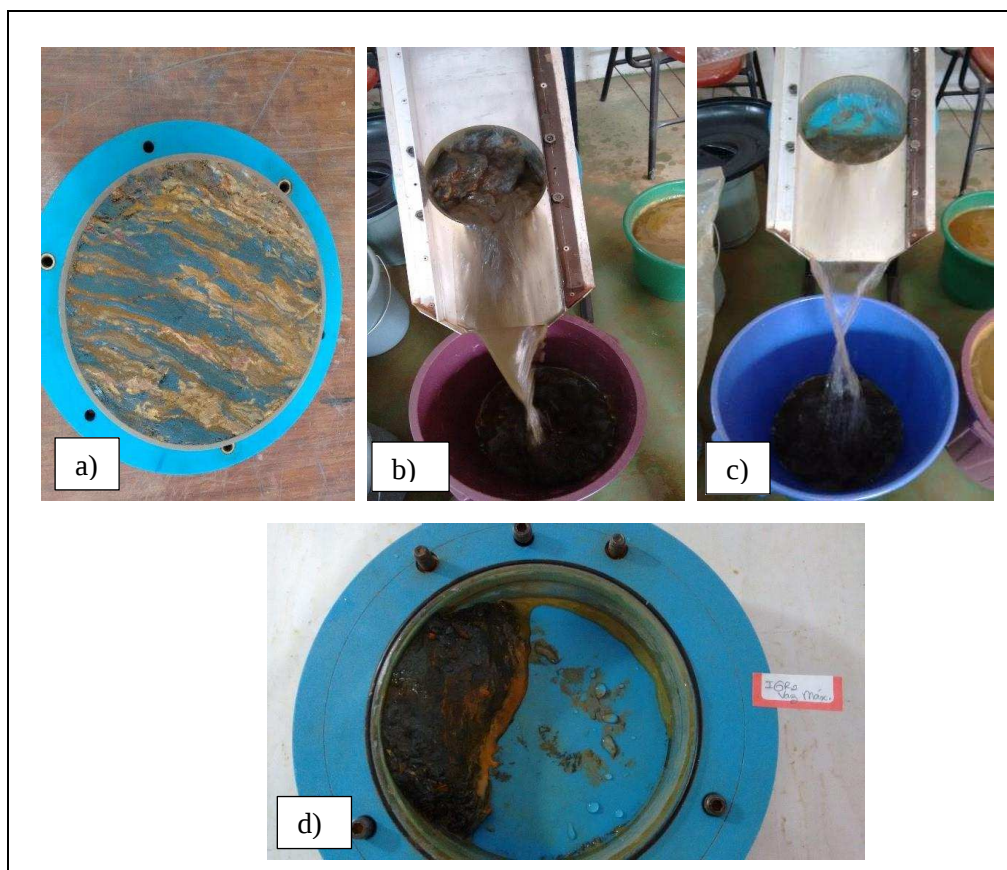


Figura 24: Etapas de realização do ensaio de Inderbitzen

Após o ensaio o material restante no amostrador foi pesado e sua umidade calculada (Figura 25).



Figura 25: Pesagem do material que restou no amostrador após o ensaio.

O material coletado foi colocado em repouso visando sua sedimentação. Posterior à retirada do excesso de água superficial, o material carreado foi transferido para pequenas vasilhas de alumínio, que foram encaminhadas à estufa para secagem a 100° por 24 horas, conforme ilustra a Figura 26.



Figura 26: Material coletado nos baldes para sedimentação e depois transferido para vasilhas de alumínio levadas à estufa por 24 horas.



Figura 27: Conjunto de peneiras utilizadas.

O solo obtido foi destorroado, pesado e transferido para um conjunto de peneiras de malhas 2,0 mm (peneira #10), 0,6 mm (peneira #30), 0,425 mm (peneira #40), 0,250 mm (peneira #60), 0,150 mm (peneira #100) e 0,074 mm (peneira #200), tendo sido pesado o material retido em cada peneira (Figura 27).

Os dados obtidos foram tratados e os resultados expressos em forma de gráficos, contendo perda de solo seco acumulado (em porcentagem) em função do tempo de ensaio (em minutos) e um gráfico, na qual se comparou a taxa de erodibilidade ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) para cada tratamento (material estudado).

4.2.5.1. Análises Estatísticas

Inicialmente foi utilizada a perda total de solo seco em cada repetição para calcular uma média aritmética. Esse valor foi dividido pelo tempo total do ensaio, resultando em um valor expresso em g/min, o qual representa a perda de solo seco média em cada tratamento. Esse valor foi dividido pela área do amostrador, obtendo-se uma taxa de erodibilidade em $\text{g} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$. De posse desses valores, procedeu-se ao quadro da ANOVA, com o objetivo de identificar se havia diferença significativa entre os tratamentos. Para identificar quais os tratamentos diferiram entre si e estabelecer uma sequência de erodibilidade entre os tratamentos, procedeu-se ao Teste de Tukey, ao nível de 95% de confiança.

A partir das três repetições de cada tratamento, procedeu-se ao cálculo da média aritmética da perda de solo seco por intervalo de tempo. De posse desses valores médios, calculou-se a perda de solo seco acumulado ao longo do tempo total de ensaio. Para o cálculo do peso da amostra antes do ensaio, a ser utilizado como parâmetro de referência para os cálculos dos percentuais de perda de solo seco acumulado, recorreu-se também ao cálculo da média aritmética entre as três repetições.

A partir desses dados, procedeu-se ao cálculo do percentual de solo seco erodido para cada tratamento, do qual foram plotados gráficos em função dos percentuais de perda de solo seco acumulado versus o tempo de ensaio, que se encontram disponíveis no Capítulo 4.

Com o objetivo de realizar uma comparação entre a taxa de erodibilidade da vazão máxima e da vazão mínima de cada tratamento, procedeu-se ao teste t-student ao nível de 95% de confiança.

4.2.6. Ensaio de Cisalhamento Direto

Para a determinação dos parâmetros de resistência de Mohr- Coulomb, coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ) de cada material estudado, foram realizados, no Laboratório de Mecânica dos Resíduos – Departamento de Engenharia Civil da UFV - de acordo com os procedimentos definidos pela normativa americana ASTM (2004), os ensaios de cisalhamento direto convencional.

Os corpos de prova foram extraídos dos blocos de solo indeformados com o auxílio de um amostrador quadrado biselado com medida interna de 5 cm de lado e 1,90 cm de altura (Figura 28).



Figura 28: Corpo de prova moldado com o auxílio de um amostrador quadrado.

O ensaio foi realizado sob duas condições de umidade distintas, natural e inundada. Para cada material foram ensaiados três corpos de prova com diferentes tensões normais: 0,5, 1,0 e 2,0 kgf.cm^{-2} . A velocidade de deslocamento adotada foi de $0,100 \text{ mm.min}^{-1}$, tendo sido imposto um deslocamento máximo horizontal de 12 mm, previamente determinado com base no tempo estimado para a ocorrência da ruptura em duas horas.

Após moldados, os corpos de prova (CP) foram colocados em uma caixa bipartida. Inicialmente há uma compressão por uma força normal e após a estabilização das deformações (variação de altura), aplicou-se uma força cisalhante que impôs um deslocamento horizontal à amostra até a ruptura do CP. Essa deformação horizontal foi medida pelo extensômetro, que se encontrava acoplado à caixa bipartida. Para cada tensão normal aplicada, obteve-se um valor de tensão cisalhante de ruptura, permitindo o traçado da envoltória de resistência.

O aparelho é digital e os resultados foram obtidos por meio de leituras de deformação do CP. A partir dos resultados obtidos, foram traçadas as curvas de tensão cisalhante x deslocamento horizontal e determinado o ponto de ruptura para cada valor de tensão normal e a envoltória de resistência.

Além disso, conforme proposto por Bastos (1999), o fator de variação da coesão Δc dado pela Equação (6), foi um dos critérios utilizados na análise do potencial de erodibilidade dos materiais estudados.

$$\Delta_c = \frac{C_{nat}-C_{inu}}{C_{nat}} \quad (6)$$

Em que:

Δ_c = variação da coesão

C_{nat} = coesão na condição natural (Kgf.cm⁻²)

C_{inu} = coesão na condição inundada (Kgf.cm⁻²)

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Ensaio para avaliação indireta da erodibilidade

A seguir apresentam-se os resultados dos ensaios de caracterização física dos materiais e obtenção de parâmetros que pudessem se relacionar com a erodibilidade dos materiais estudados.

5.1.1. Caracterização física

Na Tabela 2 encontram-se os índices físicos de cada itabirito estudado.

Tabela 2: Índices físicos dos itabiritos estudados.

Amostra	w	γ_{nat}	γ_d	γ_s	e
	(%)	(kN/m ³)	(kN/m ³)	(kN/m ³)	
IG	7,58	21,31	19,81	32,68	0,65
IM	5,81	22,04	20,83	34,00	0,63
IE	4,32	18,81	18,03	37,58	1,08
IA	19,65	16,54	13,83	39,45	1,85

A análise da Tabela 2 permite observar que o solo IA, que se comporta como um solo residual maduro, apresentou maior valor para a umidade natural devido à presença de argila, que confere maior capacidade de retenção d'água.

Considerando-se que o peso específico dos sólidos representa a média da massa específica dos constituintes da fase sólida do solo, percebe-se que os solos residuais jovens, IG, IM e IE, por apresentarem maior porcentagem de quartzo, como poderá ser observado a seguir, nas análises químicas e mineralógicas, apresentam valores mais baixos de peso específico dos sólidos. Segundo Mendes (2006), baseado neste parâmetro a sequência decrescente de erodibilidade seria: IG, IM, IE e IA, respectivamente.

Em relação ao peso específico natural observa-se (Tabela 2) que o menor valor corresponde ao material IA, uma vez que o mesmo apresenta o maior índice de vazios e o maior coeficiente de uniformidade (Tabela 4), correspondendo à uma granulometria

composta, predominantemente, por silte, além do maior valor de argila e de óxidos de ferro. As argilas e os óxidos de ferro e alumínio possuem forte ação cimentante das partículas dos solos, resultando na formação de agregados e na alta porosidade representada pelo maior índice de vazios observado.

Na Tabela 3 encontram-se os resultados em percentuais dos ensaios de limites de consistência e da análise granulométrica, a classificação SUCS e a Carta de Plasticidade. As curvas granulométricas dos respectivos materiais são apresentadas, individualmente, no Anexo I e, sobrepostas, na Figura 29.

Tabela 3: Limites de consistência dos itabiritos, análise granulométrica, classificação SUCS e da Carta de Plasticidade.

Amostra	Limite de Consistência				Granulometria					Classificação (SUCS)	Carta de Plasticidade
	LL	LP	IP	Pedregulho	Areia			Silte	Argila		
					Grossa	Média	Fina				
					(%)						
IG	15,8	9,25	6,55	0	2	6	31	60	1	CL	baixa plasticidade
IM	NP	NP	NP	0	2	8	43	46	1	ML	NP
IE	NP	NP	NP	6	4	10	44	34	2	ML	NP
IA	NP	NP	NP	2	5	15	20	53	5	ML	NP

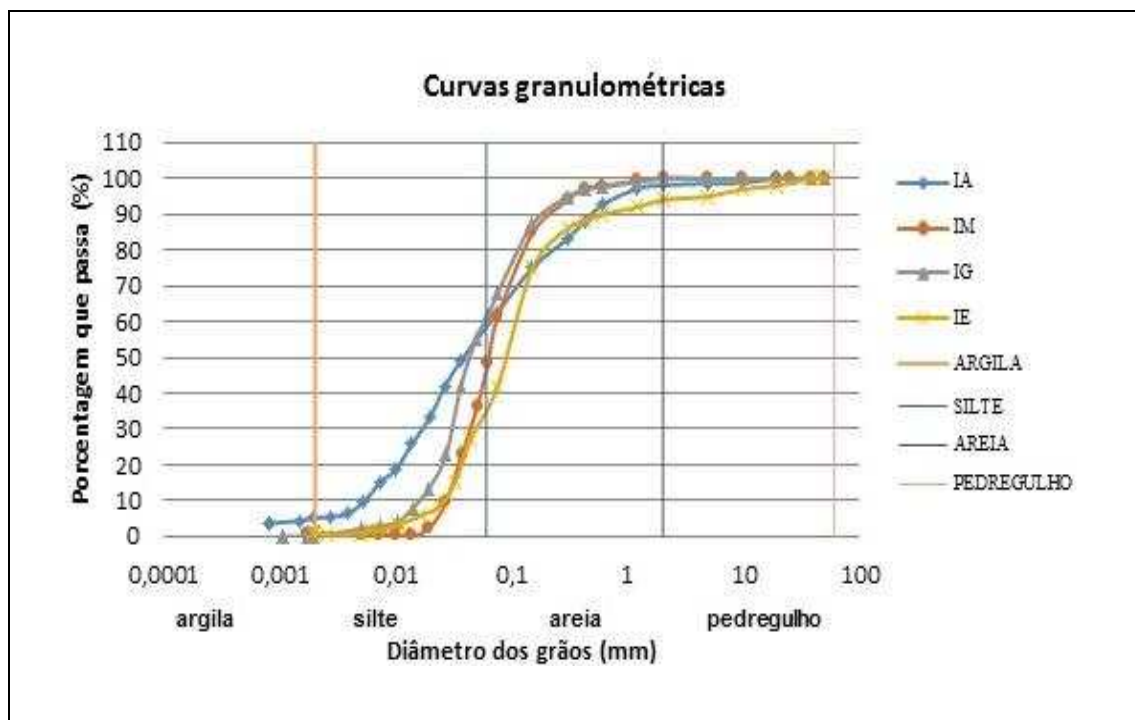


Figura 29: Curvas granulométricas dos Itabiritos anfíbolítico, martítico, goethítico e especularítico.

A partir da Tabela 3, verifica-se que ocorrem partículas de pedregulho, porém em baixas proporções, apenas para o IA e o IE. As frações predominantes são silte e areia fina. A fração argila é muito baixa, refletindo na falta de plasticidade para o IM e IE. Em relação ao IA, embora apresente maior quantidade de argila do que os demais materiais, esse valor ainda é considerado baixo. Além disso, este material apresentou maior quantidade de areia média e grossa. Todas essas características podem estar relacionadas à falta de plasticidade apresentada por esse itabirito.

A Tabela 3 apresenta também os resultados dos limites de Atterberg. Os solos residuais jovens IM e IE, por serem essencialmente arenosos (53% e 58%, respectivamente) e apresentarem 82% e 91% de quartzo (Tabela 10), respectivamente, comportaram como solos não plásticos. O IG, também caracterizado como solo residual jovem, porém, essencialmente siltoso (60%), apresentou 15,8% de LL, 9,25% de LP e um IP baixo, igual a 6,55%. O solo residual maduro IA, essencialmente siltoso (53%) comportou como solo não plástico, embora seja o itabirito com maior porcentagem de argila (5%), o que, entretanto, ainda é considerado um valor baixo.

De acordo com o critério apontado por Meireles (1967) os resultados permitiram inferir que o IG se apresenta como solo fortemente erodível por apresentar baixa

plasticidade, ou seja, $LL \leq 21\%$ e $IP \leq 8\%$. Os demais itabiritos, por se comportarem como solos não plásticos, podem ser classificados como fortemente erodíveis também.

De acordo com Bastos (2001), este estudo permitiu inferir que o IG se comporta como solo de média erodibilidade por apresentar IP de 6,55%. Valor este estabelecido entre os limites de 5%, para solos com alta erodibilidade, e 10%, para solos com baixa erodibilidade. Em relação aos demais itabiritos ensaiados (IM, IE e IA), por se comportam como não plásticos, poderiam ser classificados como de alta erodibilidade.

O IG apresentou comportamento bom a regular quanto à resistência a erosão, uma vez que, na correlação proposta pelo DNER (1979), citada por Fragassi (2001) e Mendes (2006), o IP não passou de 17% e o LP foi inferior a 32%. Quanto aos demais itabiritos ensaiados IM, IE e IA, o estudo permitiu inferir que, por se comportarem como não plásticos, apresentam comportamento regular quanto à resistência a erosão.

Em relação às partículas da ordem de areia fina e silte, observou-se, a partir da Tabela 3, os seguintes valores, em porcentagem, para a soma dessas frações: 91 (IG); 89 (IM); 78 (IE) e 73 (IA). Segundo Fragassi (2001) e diversos outros autores como Vargas (1977), Fácio (1991) e Santos (1997), esses solos seriam erodíveis por apresentarem pouca quantidade de argila e elevada quantidade para areia fina e silte. Estes valores permitem inferir que uma possível sequência decrescente de erodibilidade seria: IG, IM IE e IA.

Os solos residuais jovens IM e IG apresentam as mesmas características granulométricas, variando pouco nas porcentagens de areia fina e silte. Trata-se de solos mal graduados, devido ao C_c obtido (Tabela 4) e com porcentagem de argila igual a 1%.

De posse das curvas granulométricas foi possível calcular o coeficiente de curvatura (C_c) e uniformidade (C_u) de cada amostra (Tabela 4), de acordo com Saraiva (2007).

Tabela 4: Coeficiente de uniformidade e coeficiente de curvatura.

Amostra	C_u	C_c
IG	3,70	0,95
IM	2,29	1,12
IE	4,62	0,77
IA	12,22	0,88

Quanto ao C_c , os itabiritos receberam a seguinte classificação, de acordo com aquele mesmo autor: a) IG, IE e IA – mal graduados e b) IM – bem graduado. Quanto ao C_u , o IG, IM e IE são classificados como solo muito uniforme, enquanto o IA, é classificado como solo de uniformidade média.

Considerando os valores da Tabela 4 e o critério de Fácio (1991), os itabiritos são classificados como: a) IG, IM e IE – solos erodíveis, por apresentarem $C_u < 5$ e b) IA – solo erodível a pouco erodível, por apresentar C_u igual a 12,22. Valor este que se encontra entre os limites inferior (menor que 5, para solos erodíveis) e superior (maior que 15, para solos poucos erodíveis). Assim, foi possível inferir que o IA seria menos erodível que os demais itabiritos.

Santos (2001) elaborou uma proposta para avaliação da erodibilidade dos solos a partir da correlação do Índice de Plasticidade (IP) e o Coeficiente de Uniformidade (C_u), conforme apresentado na Tabela 1. A partir desse critério, os itabiritos receberam a seguinte classificação: IG, cujo IP é igual a 6,55% e C_u igual a 3,7, solo de média resistência à erosão e solo erodível, respectivamente. Os demais itabiritos (IM, IE e IA), por se comportarem como não plásticos, permite-se inferir que podem ser classificados como solos de baixa resistência à erosão. Quanto ao critério de uniformidade (C_u), classificam-se as amostras como: IM e IE - solo erodível; e IA - solo de média erodibilidade.

De acordo com a classificação de Meireles (1967) os quatro itabiritos estudados são pouco erodíveis, por apresentarem o percentual de partículas que passam na peneira #200 (Tabela 5) maior que o proposto pelo autor, ou seja, 40%.

Segundo a classificação de Bastos (2001), IG, IM, e IA apresentam baixa erodibilidade, por apresentarem o percentual de partículas que passam na peneira #200 maior que o proposto pelo autor, ou seja, 55%. Em relação ao IE, este estudo permitiu inferir que pode ser classificado como solo de média erodibilidade, visto que o percentual de partículas que passam na peneira #200 está entre 35% e 55%, embora o referido autor não classifique essa faixa de valor.

Tabela 5: Passante na peneira #200 (0,075mm) e passante na peneira #40 (0,425mm).

Amostra	Passante na #200	Passante na #40
	(%)	(%)
IG	67,98	96,88
IM	61,28	97,23
IE	42,00	88,00
IA	63,00	88,00

De acordo com o critério do DNER (1979) citado por Stephan (2010), IE e IA se classificam como de “boa resistência à erosão”, pois apresentam $49\% \leq \% \text{ passante na peneira \#40} \leq 96\%$, conforme consta na Tabela 5.

Empregando-se a equação 4, proposta por Fragassi (2001), baseada em dados da curva granulométrica, foram obtidos os resultados para os quatro itabiritos estudados: IG ($4,523e + 70$), IM ($1,0525e + 69$), IE ($1,473e + 28$) e IA ($1,254e + 19$). Considerando que o e representa a base dez de um número, é possível inferir que a sequência decrescente de erodibilidade desses materiais seria IG, IM, IE e IA, ou seja, essa seria a sequência decrescente de perdas de solo/minuto. Este estudo permitiu inferir que seria possível ainda, acrescentar a seguinte classificação quanto à erodibilidade dos itabiritos estudados: alta erodibilidade para IG e IM, média erodibilidade para IE e baixa erodibilidade para IA.

O comportamento dos solos baseado em Bastos (1999) e Mendes (2006), cujos valores de peso específico e índice de vazios estão na Tabela 2, encontra-se discriminado na Tabela 6.

Tabela 6: Comportamento dos solos com base no peso específico e índice de vazios.

Amostras	Mendes (2006)	SCS citado por Bastos (1999)
	peso específico (γ_s)	índice de vazios (e)
IG	mais erodível	resistente a erosão
IM	mais erodível	resistente a erosão
IE	intermediário	facilmente erodível
IA	menos erodível	facilmente erodível

Tabela 7: Comportamento dos solos com base na plasticidade e coeficiente de uniformidade.

Amostras	Meireles (1967)	Bastos (2001)	DNER (1979)	Santos (2001)	
	plasticidade			IP	Cu
IG	fort. erodível	média erodibilidade	boa a regular resistência a erosão	média resistência erosão	solo erodível
IM	não se aplica*/fort. erodível	não se aplica*/ alta erodibilidade	não se aplica*/ regular resistência a erosão	não se aplica*/ baixa resistência	solo erodível
IE	não se aplica*/fort. erodível	não se aplica*/ alta erodibilidade	não se aplica*/ regular resistência a erosão	não se aplica*/ baixa resistência	solo erodível
IA	não se aplica*/fort. erodível	não se aplica*/ alta erodibilidade	não se aplica*/ regular resistência a erosão	não se aplica*/ baixa resistência	média erodibilidade

fort. erodível = fortemente erodível

Na Tabela 7 o termo “não se aplica*/” seguido de uma classificação qualitativa, como por exemplo, “não se aplica*/ regular resistência a erosão”, corresponde aos itabiritos que, por ser NP (não plásticos), não se enquadravam na classificação qualitativa da erodibilidade. Foi elaborada, nesse estudo, uma classificação para os mesmos.

O comportamento dos solos baseado em sua granulometria, de acordo com Meireles (1967), Fácio (1991), Fragassi (2001), Bastos (2001), DNER (1979) citado por Stephan (2010) e Fragassi (2001) adaptado*, que corresponde à complementação dessa metodologia (referente á Equação 4) quanto à classificação qualitativa da erodibilidade, realizada neste trabalho, encontra-se na Tabela 8.

Tabela 8: Comportamento dos solos com base na granulometria

Amostras	Fragassi (2001)*	Fácio (1991)	Meireles (1967)	Bastos (2001)	DNER 1979 citado por Stephan (2010)	Fragassi (2001) adaptado*
	granulometria					
IG	erodível	erodível	pouco erodível	baixa erodibilidade	não se aplica	alta erodibilidade
IM	erodível	erodível	pouco erodível	baixa erodibilidade	não se aplica	alta erodibilidade
IE	erodível	erodível	pouco erodível	média erodibilidade *	boa resist. à erosão	média erodibilidade
IA	erodível	pouco erodível*	pouco erodível	baixa erodibilidade	boa resist. à erosão	baixa erodibilidade

Fragassi (2001)* = solos erodíveis são aqueles que apresentam baixo teor de argila e elevados valores de areia fina e silte.

* Classificação elaborada neste estudo, pois o valor encontrado para o parâmetro não era considerado pelo autor

5.1.2. Mineralogia e Análises químicas

Os resultados obtidos na caracterização química de cada itabirito encontram-se discriminados na Tabela 9.

Tabela 9: Caracterização química dos itabiritos.

Amostra	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	SiO ₂	TiO ₂
	----- (%) -----							
IG	2,501	0,020	52,313	0,014	0,782	2,688	40,250	0,340
IM	1,061	0,066	41,179	0,013	0,685	2,341	53,441	0,298
IE	1,224	0,036	51,213	0,027	0,716	1,784	43,581	0,357
IA	0,620	0,022	87,946	0,014	0,541	2,111	6,021	0,389

Amostra	Cr ₂ O ₃	CuO	MnO	NiO	P ₂ O ₅	PbO	V ₂ O ₅	ZnO	ZrO ₂	SO ₃	Cl
	----- ppm -----										
IG	223,80	304,24	1041,86	7,47	368,54	1685,44	6,38	30,17	34,88	0,09	0,51
IM	287,90	262,41	184,71	0,97	0,00	1083,63	3,97	42,06	28,79	0,07	0,56
IE	228,59	290,39	201,55	0,00	0,00	1672,86	5,93	58,85	53,72	0,05	0,66
IA	329,30	99,11	683,10	8,51	2336,84	5572,47	15,73	236,67	127,84	0,12	1,05

A análise mineralógica por Difração de Raio-X foi realizada em amostra total e seus resultados encontram-se descritos na Tabela 10.

Tabela 10: Caracterização mineralógica dos itabiritos.

Amostra	quartzo	goethita	hematita	caulinita	magnetita	maghemita	tremolita
	----- (%) -----						
IM	82	-	18	-	-	-	-
IA	17,8	12,9	5,9	-	3	2	58,4
IG	49	8	22	21	-	-	-
IE	91	-	9	-	-	-	-

Os resultados das análises químicas por microfluorescência (Tabela 9) e da mineralogia (Tabela 10 e Figuras em Anexo) confirmam o exposto por Oliveira *et al.*(1983) e Bigarella (1994) ao afirmarem que os itabiritos têm em sua composição essencialmente quartzo, caulinita e óxidos de ferro (hematita e goethita). O que se observou foi que somente o IA não apresentou o quartzo como mineral predominante, sendo substituído pela tremolita com 58,4%. A tremolita é um mineral do grupo dos silicatos, mais especificamente pertencente ao grupo dos anfibólios, e se forma por

metamorfismo a partir de sedimentos ricos em dolomita e quartzo. A elevada presença desse mineral na amostra de IA indica uma maior resistência ao intemperismo desses minerais, nas condições ambientais existentes na área de estudo já que, usualmente, os anfibólios apresentam baixa resistência ao intemperismo e, portanto, não se esperaria que esses minerais ainda estivessem presentes em um material tão intemperizado.

A ocorrência dos óxidos de ferro (hematita e goethita) nos solos estudados é resultado da intemperização de minerais da rocha de origem, uma vez que o IM e o IE, mesmo sendo solos residuais jovens, já sofreram intemperismo. A predominância de uma ou de outra forma, entretanto, é ditada pelas condições do ambiente de formação (Schwertmann e Taylor, 1977; Schwertmann, 1985). Assim, as colorações vermelhas refletem a riqueza de ferro em ambientes de melhor drenagem, nos quais a gênese da hematita é favorecida (Schwertmann e Taylor, 1977). No entanto, o IA apresentou maior quantidade de goethita do que hematita, apesar de sua coloração avermelhada. Isto se deve a que pequenas quantidades de hematita são capazes de mascarar a cor do solo (Resende, 1976; Kämpf, 1997).

A caulinita, presente somente no IG, é um argilo-mineral de alumínio do tipo hidratado, 1:1, formado pelo intemperismo gerado por um processo de hidrólise parcial, em condições de drenagem menos eficiente, tornando-se um indicador das condições ambientais desse solo.

No processo de intemperismo o solo passa de maior teor de minerais de fácil intemperização para menor teor de minerais facilmente intemperizáveis na fração grosseira, podendo resultar em um comportamento com menor potencial erodível. Esse comportamento pode descrever o IA, que se apresenta como um solo residual maduro, na qual se observa que já ocorreu um avançado processo de intemperismo.

Melfi *et al.*, (1976); Curi, (1983) e Ker, (1995) supõem que os solos desenvolvidos de rochas itabiríticas apresentam baixos conteúdos de elementos traços (Cu, Co e Zn, principalmente). No entanto, esta diferenciação do conteúdo de elementos traços encontrado nos solos estudados (Tabela 9) demonstra a diversidade da composição química do itabirito, dificultando assim, a generalização quanto aos valores encontrados. Nesse sentido, Resende *et al.* (1988c) salienta que a grande diversidade das rochas itabiríticas justifica a ocorrência de algumas mais ricas em elementos traços do que outras. Assim, generalizações que envolvam materiais de origem como itabiritos e conteúdo de elementos traços devem ser feitas com cautela.

Segundo o critério estabelecido por Fácio (1991), quanto menor a relação $(\text{SiO}_2) / (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3)$, mais laterizado está o solo e, conseqüentemente, maior será a resistência a erosão. Se a relação for menor que 2 o solo é considerado como laterizado, para valores maiores que 2 eles são tidos como solos não laterizados.

Tabela 11: Critério de laterização

$(\text{SiO}_2)/(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3)$	
IG	0,73430
IM	1,26517
IE	0,83111
IA	0,06798

Os valores encontrados para a relação supracitada encontram-se dispostos na Tabela 11, a partir dos quais todas as amostras de solo estudadas foram classificadas como laterizadas, podendo-se estabelecer a seguinte sequência crescente de resistência a erosão: IM, IG, IE e IA. Deve-se considerar que, a despeito de ser um material mais intemperizado, o IA apresenta menor laterização, o que é função, também, da maior presença de óxido de ferro, apesar do baixo teor de alumínio. O IM apresenta baixo teor de ferro, porém a rocha é originalmente rica em sílica.

5.1.3. Ensaio de cisalhamento direto

Os resultados de resistência ao cisalhamento direto foram obtidos nas condições natural e inundada (Tabela 12). As envoltórias de resistência são apresentadas nas Figuras 30 a 37.

Tabela 12: Valores do intercepto coesivo (c) e ângulo de atrito interno dos solos (ϕ) na condição natural e inundada, e umidade do material antes e após a realização do ensaio.

Amostra	Condição Natural			Condição Inundada		
	w (%)	c _{nat} (kPa)	ϕ_{nat} (°)	w' (%)	c' (kPa)	ϕ' (°)
IG	8,22	21,90	41,7	23,15	8,6	28,3
IM	6,86	64,00	38,1	21,6	13,8	46,6
IE	2,87	16,80	38,5	22,5	3,2	41
IA	22,71	85,70	16	51,99	25,2	38,6

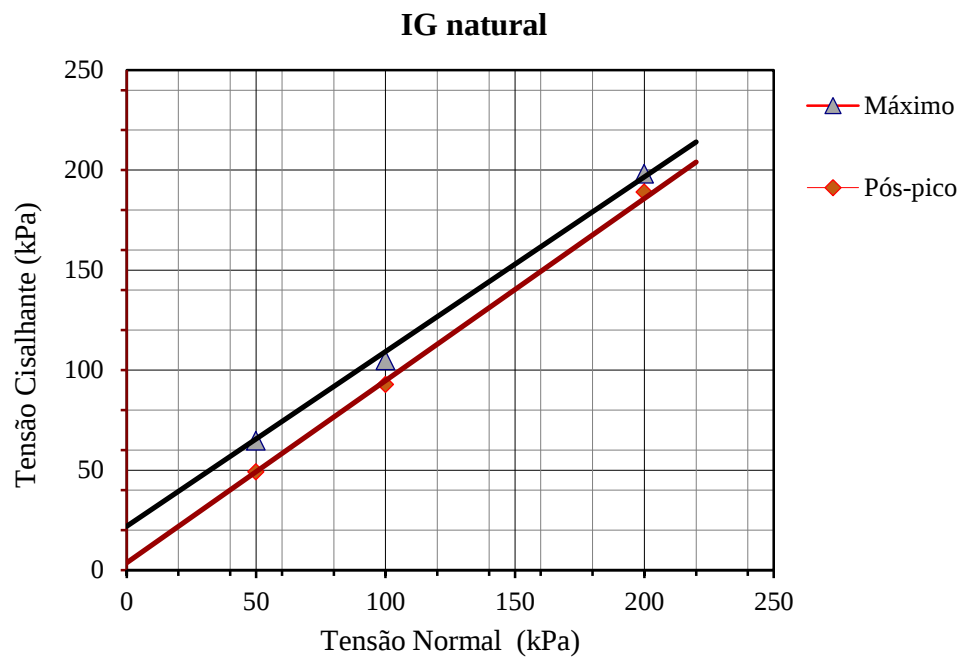


Figura 30: Envoltória de Resistência do IG natural

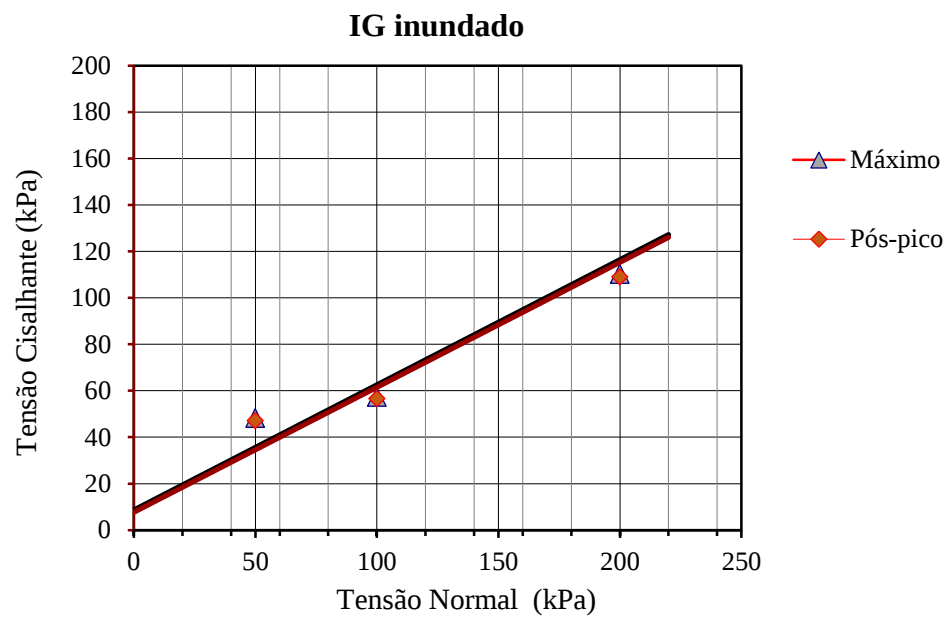


Figura 31: Envoltória de Resistência do IG inundado

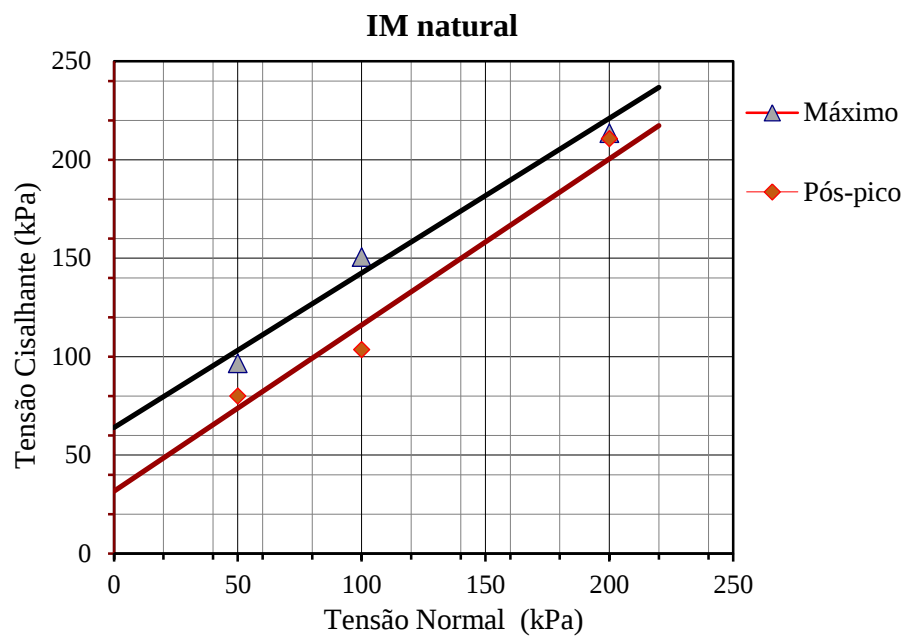


Figura 32: Envoltória de Resistência do IM natural.

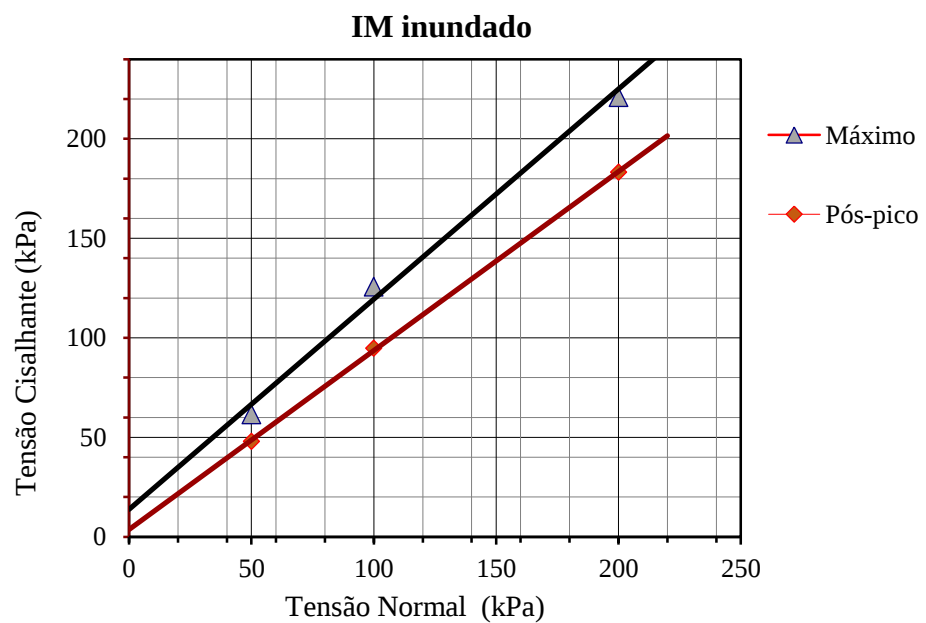


Figura 33: Envoltória de Resistência do IM inundado

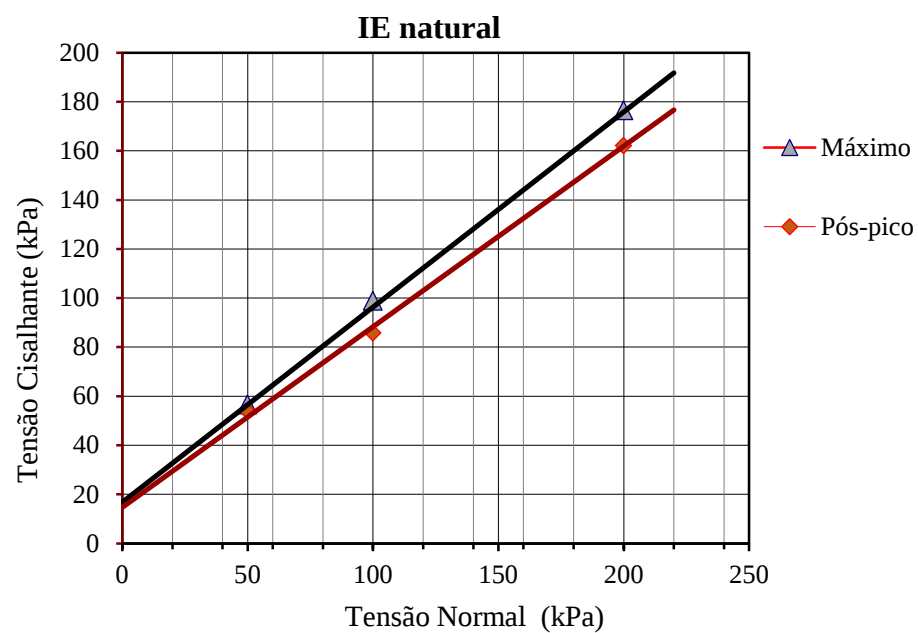


Figura 34: Envoltória de Resistência do IE natural.

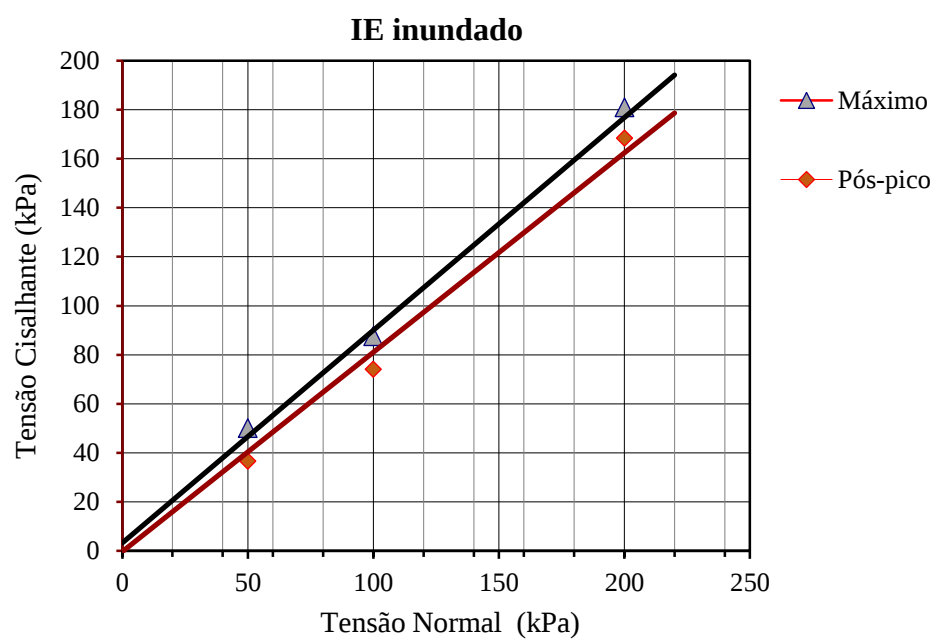


Figura 35: Envoltória de Resistência do IE inundado.

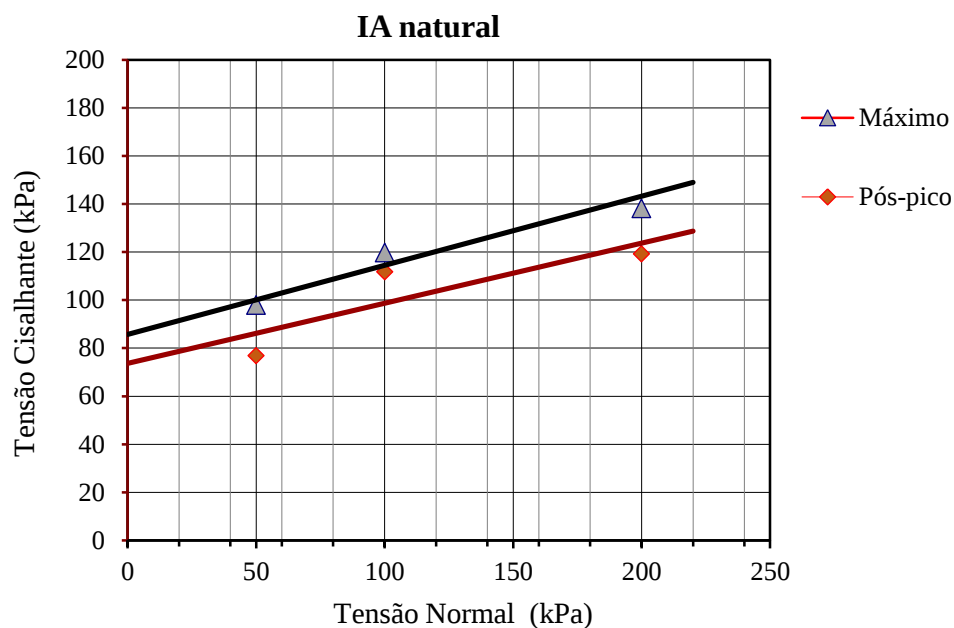


Figura 36: Envoltória de Resistência do IA natural.

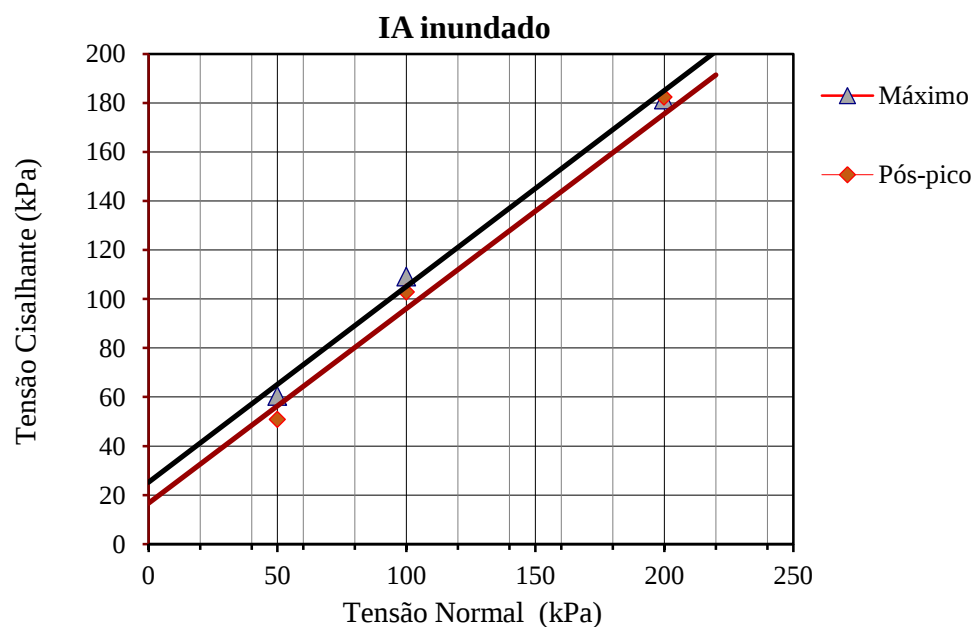


Figura 37: Envoltória de Resistência do IA inundado

A partir dos parâmetros de resistência da Tabela 12, obteve-se o fator de variação da coesão (Δ_c) para cada amostra estudada, conforme Tabela 13 a seguir:

Tabela 13: Fator de variação da coesão (Δc).

Amostra	Δc (%)
IG	60,73
IM	78,44
IE	80,95
IA	70,60

Segundo Bastos (1999), citado por Stephan (2010), a análise do fator de variação da coesão (Δc) permite a interpretação da tendência de crescimento da taxa de erodibilidade com Δc e, conseqüentemente, permite a avaliação dos solos com média a alta erodibilidade como aqueles que apresentam $\Delta c \geq 85\%$. Entretanto, a partir da Tabela 13 observa-se que nenhuma amostra atendeu a esse critério.

Os autores supracitados estudaram solos bem diferentes dos itabiritos analisados, que se tratam de materiais inconsolidados e apresentam faixas de valores de coesão bem diferentes dos solos estruturados analisados nos outros estudos. Assim, propõe-se uma nova correlação do critério Δc e a erodibilidade dos solos/rocha de itabirito, mesmo que não se tenha observado uma boa correspondência desse parâmetro com a erodibilidade desses itabiritos.

O presente estudo permitiu inferir que a adequada avaliação do parâmetro Δc , que se propõe para os estudados (IG, IM, IE, IA), seria: baixa erodibilidade para $\Delta c < 60\%$; média erodibilidade para $60\% \leq \Delta c \leq 75\%$ e alta erodibilidade para $\Delta c \geq 75\%$. Resultando na seguinte classificação: IG e IA – média erodibilidade; IM e IE – alta erodibilidade.

5.2. Ensaios para avaliação direta da erodibilidade

5.2.1. Ensaios de Inderbitzen

De acordo com informações fornecidas pela SAMARCO, baseada em anos de monitoramento das chuvas naquela área, a máxima precipitação horária é, aproximadamente, 50mm. Porém, visto que esse valor corresponde à uma vazão bem menor que $1,0\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ e que nessas condições a lâmina d'água não se espalharia uniformemente em toda a largura da rampa, optou-se pelo uso de uma vazão maior do

que a observada na área, porém com uma inclinação menor (30°) do que a que se pretendia utilizar inicialmente (45°). A princípio, o uso dessa inclinação pautava-se no objetivo de reproduzir em laboratório a pior condição de declividade observada em campo.

Optou-se pelo uso de duas vazões, sendo uma mínima de 1,0L.min⁻¹ e uma máxima de 7,0L.min⁻¹. Justifica-se pelo fato de que há concentração de fluxo em canais nas faces dos taludes da área, portanto, a despeito da intensidade de chuvas média sugerir menores vazões, as mesmas são superiores ao longo dos sulcos erosivos.

As Figuras 38 a 45 apresentam os gráficos plotados em função dos percentuais da variação de perda de solo seco acumulado versus o tempo de ensaio. Esses percentuais de perda de solo acumulado foram calculados tomando-se o peso inicial da amostra antes do ensaio como parâmetro de referência.

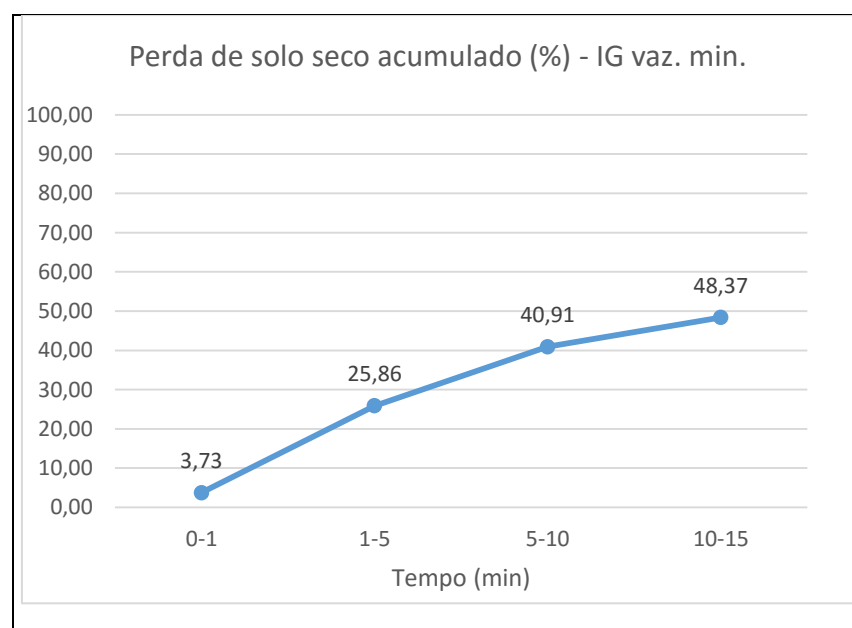


Figura 38: Gráfico de perda de solo seco acumulado da amostra de IG vazão mínima.

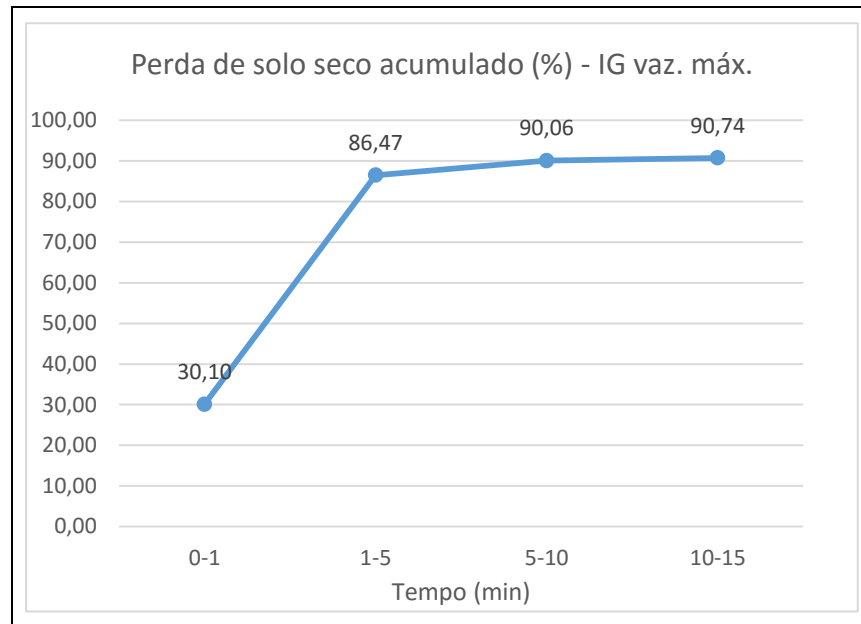


Figura 39: Gráfico de perda de solo seco acumulado da amostra de IG vazão máxima.

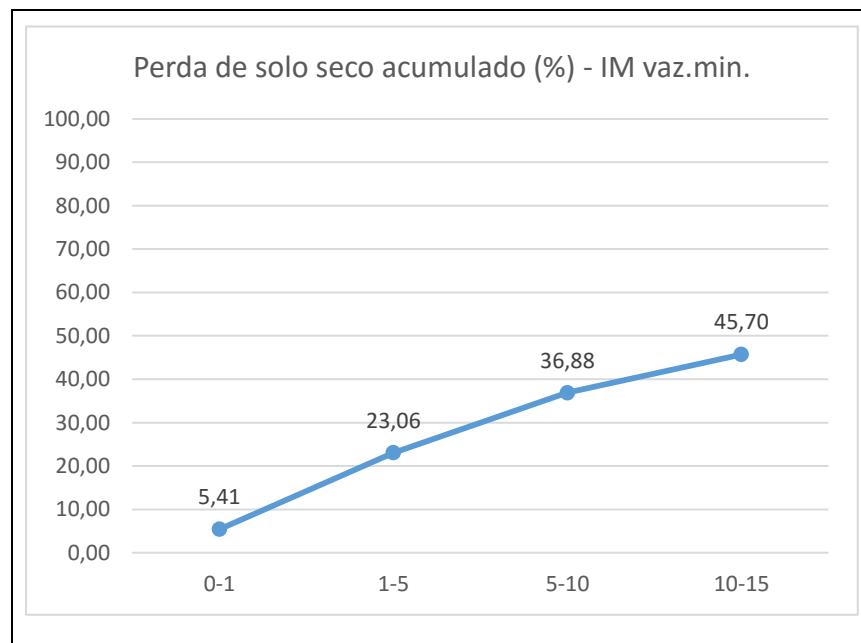


Figura 40: Gráfico de perda de solo seco acumulado da amostra de IM vazão mínima.

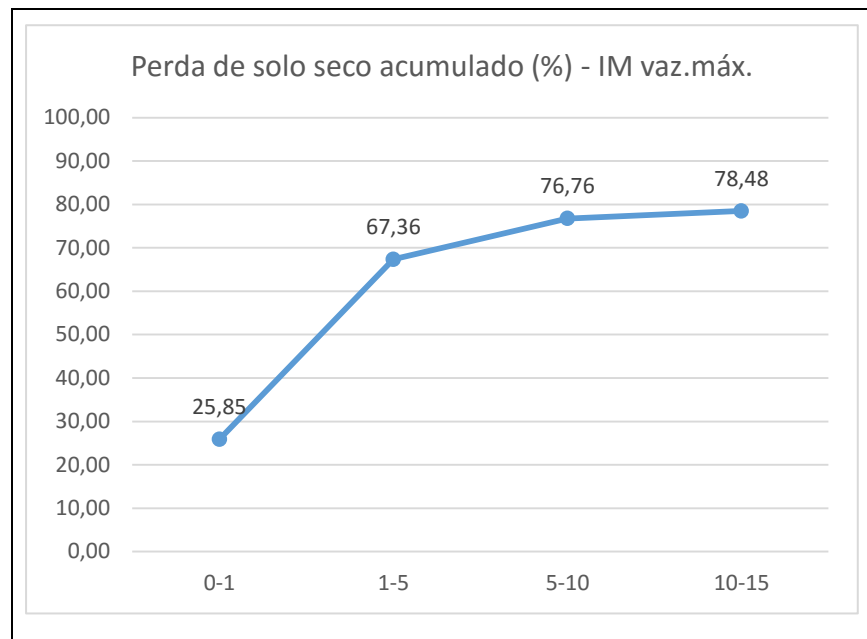


Figura 41: Gráfico de perda de solo seco acumulado da amostra de IM vazão máxima.

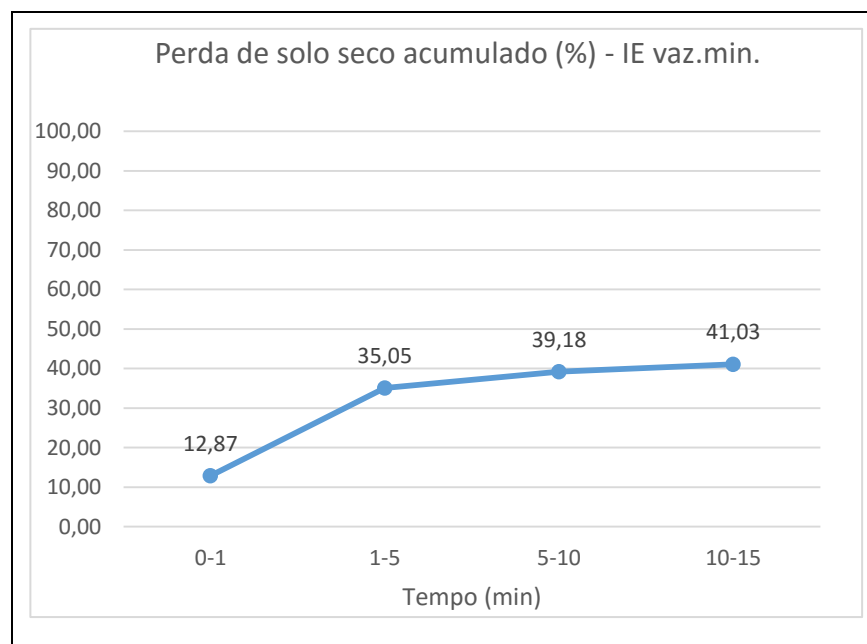


Figura 42: Gráfico de perda de solo seco acumulado da amostra de IE vazão mínima.

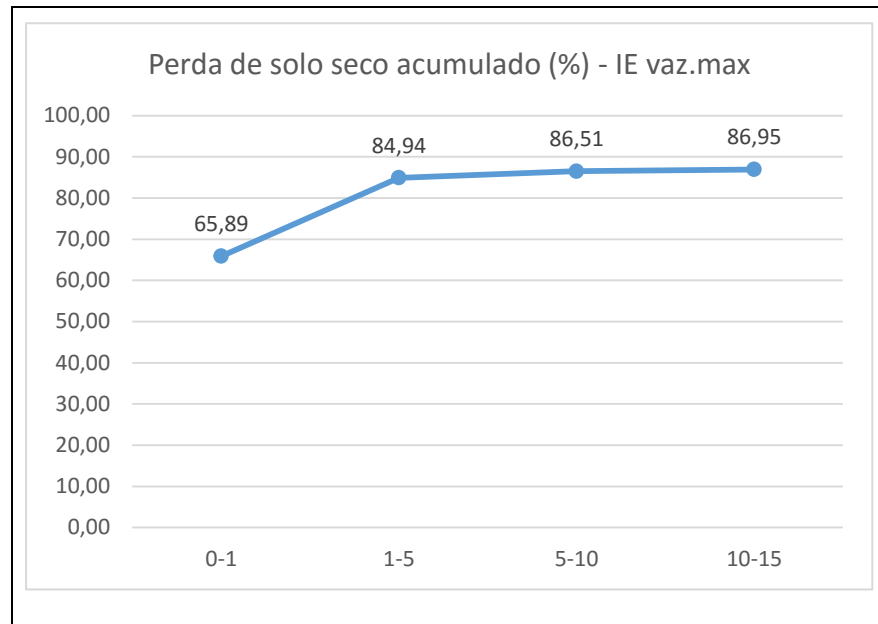


Figura 43: Gráfico de perda de solo seco acumulado da amostra de IE vazão máxima.

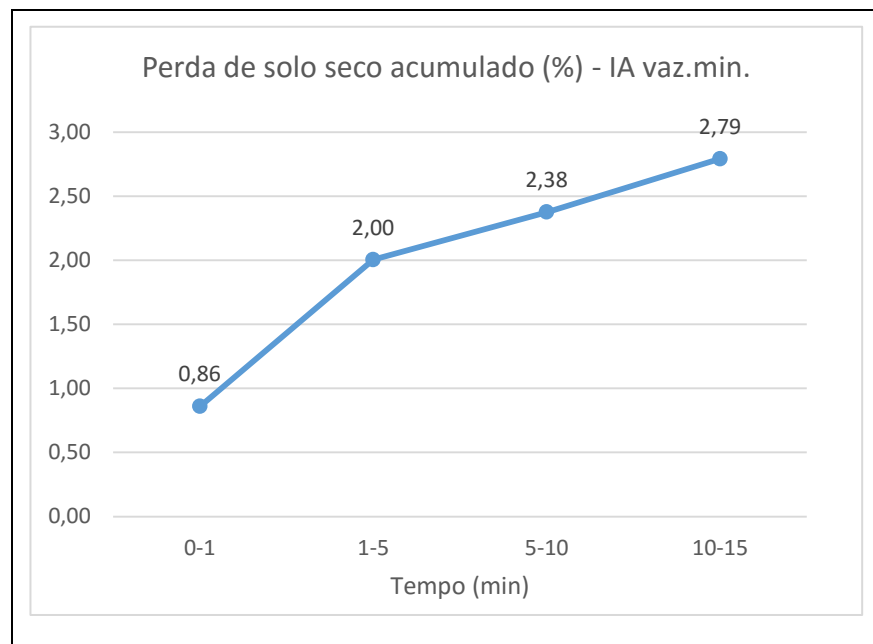


Figura 44: Gráfico de perda de solo seco acumulado da amostra de IA vazão mínima.

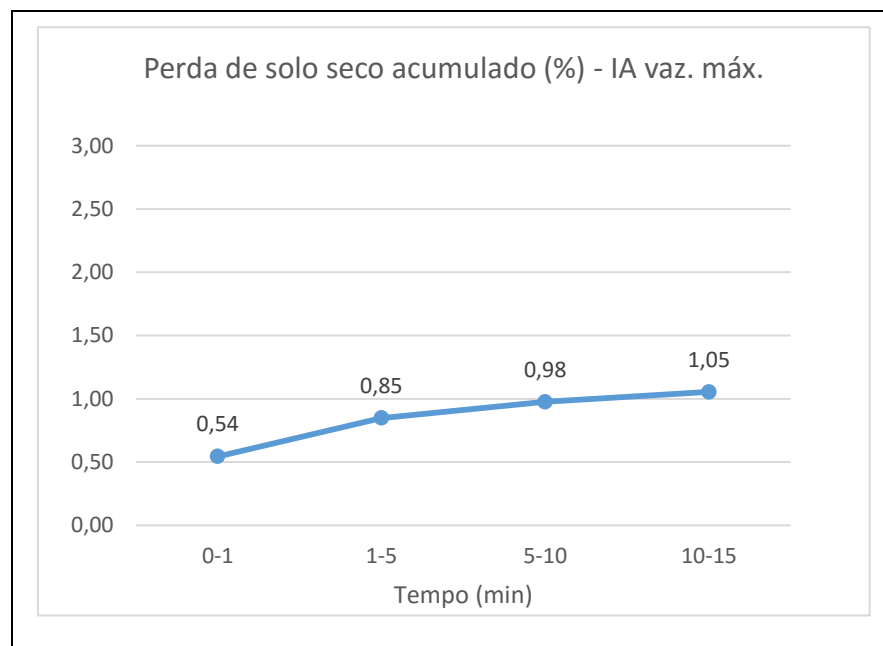


Figura 45: Gráfico de perda de solo seco acumulado da amostra de IA vazão máxima.

A partir dos gráficos apresentados, nota-se uma maior produção de sedimentos nos primeiros 5 minutos dos ensaios, confirmando o que tem sido observado por outros autores, por exemplo, Fácio (1991) que afirma que a produção de sedimentos aumenta com a declividade da rampa e é maior nos primeiros 5 minutos.

Após os primeiros instantes de precipitação, o grau de saturação do solo aumenta gradativamente. A frente de umidade da chuva inicial comprime o ar ocluso nos poros do solo, que atua separando suas partículas, fazendo com que a erosão seja mais intensa nos instantes iniciais com redução gradativa ao longo do tempo.

Para o cálculo da taxa de erodibilidade através de cálculos estatísticos, conforme já descrito no capítulo sobre metodologia, os resultados encontrados foram divididos pela área do amostrador. Para fins de melhor entendimento e apresentação, os dados foram convertidos de $\text{g.cm}^{-2} \text{min}^{-1}$ para $\text{kg.ha}^{-1} \text{min}^{-1}$, conforme observa-se na Tabela 14.

Tabela 14: Taxa de erodibilidade ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$).

Amostra	Vaz. Min	Vaz. Máx
IE	21506,95	52822,87
IM	32773,34	50395,97
IG	33300,59	47767,76
IA	1160,90	401,44

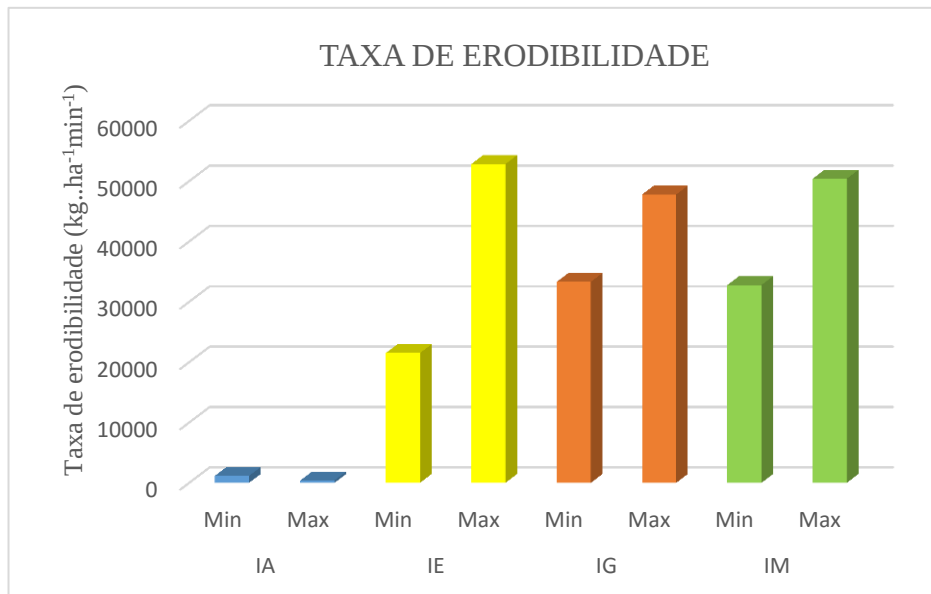


Figura 46: Taxa de erodibilidade dos materiais para vazão mínima e vazão máxima.

Pelo que se observa na prática, a vazão mínima apresentou a seguinte sequência decrescente de erodibilidade: IG, IM, IE e IA. Enquanto para a vazão máxima a sequência observada foi: IE, IM, IG e IA.

De um modo geral, observou-se uma erosão mais acentuada na maior vazão, leia-se vazão máxima, conforme esperado (Figura 46).

As análises estatísticas, através do teste t-student ao nível de 95% de confiança, mostraram que a produção de sedimentos para a vazão máxima não difere daquela resultante da vazão mínima para o IM e o IA, mas difere para as amostras de IG e IE, conforme se observa através do P-valor de cada amostra (Tabela 15). Aquelas amostras para as quais se obteve um P-valor abaixo de 5% de significância, apresentaram

diferença significativa entre a taxa de erodibilidade para a vazão máxima e mínima, ou seja, IG e IE.

Tabela 15: P-valor obtido no Teste t-student para verificar diferenças significativas entre os resultados de vazão máxima e mínima.

Amostra	P-valor (sig.)
IG	0,022
IM	0,074
IE	0,014
IA	0,180

Aparentemente, a taxa de erodibilidade para o IA vazão mínima apresentou-se maior do que para IA vazão máxima porém, análises estatísticas mostraram que elas não diferiram entre si, permitindo concluir que a perda de solo para a vazão mínima e máxima é a mesma. Entretanto, do ponto de vista, quantitativo, observa-se, curiosamente, uma maior erosão para as taxas mais baixas, fato que pode estar relacionado às pequenas diferenças estruturais, granulométricas e/ou de umidade entre as amostras ensaiadas.

De acordo com o gráfico da Figura 46, esperava-se uma diferença estatística entre IM vazão máxima e IM vazão mínima, assim como observado para as amostras do IG, visto que os valores dessas amostras se mostravam aparentemente muito parecidos. Porém, isso não ocorreu, pois o percentual de variabilidade (32,8 e 30,2 para IG e IM, respectivamente) dos dados do IM é menor do que para o IG, justificando a semelhança entre os dados de vazão máxima e mínima do IM.

Com o intuito de identificar uma sequência de erodibilidade dos materiais estudados procedeu-se à análise estatística, comparando os valores absolutos de perda de solo total carregado para cada repetição de cada material através do quadro de ANOVA. Por haver diferença significativa procedeu-se ao teste de Tukey ao nível de 95% de confiança para identificar qual (is) materiais se diferenciava(m). Os resultados evidenciaram que os valores encontrados para IG, IM e IE não diferiram entre si, possibilitando um agrupamento desses materiais, que erodiram mais do que o IA, que

foi a única amostra na qual a perda de solo total se diferenciou das demais. Este fato foi observado tanto para vazão máxima quanto para vazão mínima.

Esses resultados permitem concluir que não há uma boa correspondência entre a classificação realizada pelo Serviço de Conservação do Solo (SCS), citada por Bastos (1999), a partir da relação do critério de índices de vazios e o potencial erosivo. Segundo esse critério, os itabiritos estudados são classificados como: IG e IM - solos resistentes à erosão por apresentarem $e < 0,7$; e IE e IA – solos facilmente erodíveis por apresentarem $e > 0,7$.

De acordo com Mendes (2006), considerando o peso específico dos sólidos (γ_s) como um fator controlador dos processos erosivos, o IA estaria mais compacto e seria o menos erodível, contrapondo a classificação anterior baseada no índice de vazios, assim como mostram os resultados dos ensaios de Inderbitzen.

Observa-se que realmente não há uma boa correspondência do critério baseado no índice de vazios, pois apesar de ter o maior γ_s , o IA possui o maior índice de vazios. Isto, provavelmente, se justifica pela presença de argila e elevado teor de óxido de ferro (Tabela 9) que contribuem para uma melhor estrutura e maior aeração do solo, conforme já explicado anteriormente, resultando em um menor potencial erosivo. Essa classificação de Mendes (2006) confirma os resultados encontrados nos ensaios de Inderbitzen.

O material carregado foi coletado e levado à estufa. Depois de seco, este passou pelo processo de pesagem e peneiramento. A curva granulométrica obtida para cada repetição (três repetições para cada material) permite prever a quantidade de material retido e passante na peneira #200 (abertura de 0,075mm). Assim, após o cálculo dos valores médios de cada fração do solo, a partir das três repetições, elaborou-se as tabelas 16 e 17, para vazão mínima e máxima, respectivamente. A partir desses resultados, é possível observar que o material passante na peneira #200 representa uma fração expressiva dos solos analisados, sendo que o IE apresentou o menor valor para a referida fração.

Tabela 16: Granulometria material carreado – vazão mínima.

Granulometria material carreado - vaz.min						
Amostras	Pedregulho	Areia			Silte + argila	Passante na #200
		Grossa	Média	Fina		
	(%)					
IG	0,00	0,23	0,77	41,33	57,66	67,84
IM	0,00	0,00	2,10	29,23	68,66	75,10
IE	0,00	2,00	16,00	73,00	9,00	25,90
IA	0,00	2,83	13,00	27,33	56,83	62,98

Tabela 17: Granulometria material carreado – vazão máxima.

Granulometria material carreado - vaz.máx						
Amostras	Pedregulho	Areia			Silte + argila	Passante na #200
		Grossa	Média	Fina		
	(%)					
IG	0,00	0,93	1,07	70,00	28,00	44,80
IM	0,53	0,67	5,63	47,16	46,00	56,41
IE	0,50	2,75	18,00	71,75	7,00	21,88
IA	0,13	1,23	9,13	16,33	73,17	76,76

Verifica-se que para a vazão mínima, não ocorrem partículas do tamanho pedregulho em nenhuma amostra, somente para a vazão máxima em baixíssimas proporções, não chegando a 1%. As frações predominantes no material carreado são areia fina e silte + argila.

Os resultados obtidos para a vazão máxima e mínima revelaram que o IA foi o material que apresentou maior distribuição de tamanho de partículas erodidas nas duas condições. Além disso, esse itabirito apresentou menor porcentagem da fração areia fina, em ambas as condições, diferenciando-se, consideravelmente, das demais amostras, e apresentando maior proporção da fração silte + argila. Entretanto, ao se analisar a fração silte + argila, pode-se considerar, para efeito de comparação, que esse valor corresponde à fração silte, visto que todos os materiais apresentaram valores baixíssimos de argila em sua caracterização inicial.

Para a vazão máxima, o IA obteve a maior contribuição da fração silte + argila em relação aos demais materiais. Essas características podem estar correlacionadas com

àquelas que caracterizaram o material inicialmente, como quantidade de argila e óxidos de ferro, que contribuíram para esse comportamento, além de resultarem em uma menor taxa de erodibilidade. Entretanto, não se pode deixar de considerar a relação observada entre menor contribuição da areia fina em seu material carregado e apresentar a menor taxa de erodibilidade, confirmando assim a importância da relação dessa fração de solo com a erodibilidade.

Com o aumento da vazão, o IG apresentou maior contribuição da fração areia fina ao solo carregado e uma diminuição da fração silte + argila, quando comparados à vazão mínima, confirmando a maior susceptibilidade dessa fração à erosão em uma situação menos favorável. O mesmo ocorreu em relação ao IM, no qual se observou também uma maior distribuição das partículas do solo na vazão máxima em relação à mínima. Para o IE esses valores para vazão mínima e máxima se mantiveram bem próximos, resultando em uma pequena variação na distribuição do tamanho das partículas e em uma diminuição da quantidade de solo passante na peneira #200, ao se comparar a vazão mínima com a máxima.

A partir dessas observações, confirma-se a importância do coeficiente de uniformidade na análise da erodibilidade desses itabiritos, visto que quanto mais uniforme (solo mal distribuído e com baixo C_u) se apresentar a distribuição granulométrica, maior será sua susceptibilidade à erosão, confirmando o critério de Fácio (1991) e de Santos (2001). Entretanto, esse parâmetro não pode ser considerado isoladamente, mas associado às demais características, como aquelas que foram avaliadas no presente estudo, como a fração areia fina, silte e argila; limites de Atterberg, índices de vazios, composição mineralógica dentre outras.

A granulometria fina do IG, devido ao alto valor de silte, associada aos baixos valores da fração argila, resulta em uma estrutura fraca e justifica o fato deste material ter apresentado a maior proporção de areia fina + silte + argila em seu material erodido, correspondendo a uma maior erodibilidade. Para a vazão mínima, observa-se certa equivalência ao comparar os valores encontrados para a fração areia fina com aqueles encontrados para as frações silte + argila, porém, na vazão máxima, houve uma contribuição extremamente maior da areia fina ao solo carregado, confirmando, novamente, a maior susceptibilidade dessa fração do solo à erosão em uma situação menos favorável.

O IE apesar de apresentar granulometria mais arenosa do que siltosa, ao contrário do IG, apresentou um comportamento semelhante ao deste em relação ao material erodido na vazão máxima. A fração areia fina do solo, apresentou-se extremamente mais alta do que as frações silte + argila, em ambas as vazões, para o IE.

Para o IA, evidenciou-se que não houve grandes diferenças entre os valores observados para o material carregado na vazão máxima e mínima, o que corrobora com os valores encontrados nas análises estatísticas, ao apontar que não há diferença significativa na erodibilidade observada em ambas as vazões. Esse fato pode ser justificado por se tratar de um solo residual maduro, mais estruturado, com maior fração argila do que os demais, além de apresentar elevada quantidade de óxidos de ferro, que atuam como agente cimentante, e menor quantidade de quartzo.

O IE e o IM apresentaram, em sua caracterização inicial, maior proporção de areia, enquanto o IA e o IG, maiores teores de argila e silte. De um modo geral, o IA se comportou como o itabirito menos erodível e o IG, mais erodível. Como resultado disso, as estruturas de contenção de sedimentos a serem projetadas (*sumps*) nos locais onde se observa a predominância de um e/ou de outro itabirito, devem apresentar tamanhos diferentes, ou seja, de acordo com a taxa de erodibilidade observada em campo. Há que se considerar ainda que o tempo de residência nos *sumps* que irão receber os materiais com mais argila e silte será maior, visando sua decantação.

Além disso, a partir do peso específico é possível estabelecer uma relação com a taxa de erodibilidade de cada itabirito, de modo que se obtenha um valor referente ao volume necessário para que o *sump* armazene todo o sedimento originado pela chuva em um determinado tempo.

A análise dessas informações associadas aos dados obtidos no ensaio de Inderbitzen, que caracterizou o IA como o material menos erodível em relação aos demais (IM, IG, e IE) que, entretanto, não diferem entre si, permite o melhor planejamento das estruturas de contenção de sedimentos. Isto porque, dependendo do itabirito presente em uma determinada área, avaliar-se-á a taxa de erodibilidade a ser considerada como referência, para se proceder ao cálculo do volume estimado do *sump*. Além disso, a granulometria também será analisada no momento desse planejamento.

Resumindo, provavelmente os *sumps* a serem construídos nos locais onde há predominância dos materiais IG serão os maiores, seguidos dos *sumps* para conter sedimentos de IE e IM e por fim, os sedimentos de IA.

6. CONCLUSÕES

Este estudo permitiu concluir que os solos com maior presença de granulometria constituída por partículas da ordem de areia fina e silte, são solos mais susceptíveis à erosão. Essa característica também se apresentou relacionada à maior quantidade de quartzo nos solos IG, IM e IE, resultando em um menor peso específico dos grãos e, conseqüentemente, maior erodibilidade. Com relação à plasticidade, os critérios utilizados, em sua maioria, permitem inferir que é possível relacionar a erodibilidade dos itabiritos estudados à referida característica do solo.

Observou-se boa correspondência ao relacionar o coeficiente de uniformidade (C_u) à erodibilidade, visto que quanto mais uniforme for a distribuição granulométrica, maior será a susceptibilidade à erosão. Assim, enfatiza-se a importância do estudo do referido parâmetro. Entretanto, o índice de vazios não apresentou boa correspondência com a erodibilidade observada na avaliação direta dos itabiritos.

A erodibilidade (E) dos itabiritos recebeu uma classificação que relaciona os valores encontrados a uma erodibilidade qualitativa específica para os itabiritos estudados. A mesma foi nomeada de “Fragassi (2001) adaptado” e propõe o seguinte: alta erodibilidade para IG e IM, média erodibilidade para IE e baixa erodibilidade para IA; visto que essa foi a ordem decrescente dos valores encontrados para (E). A análise desse critério se apresentou relevante na análise da erodibilidade.

Através das características químicas observadas para o IA, que se apresentou como o itabirito menos erodível, evidenciou-se a importância da análise dos óxidos de ferro e alumínio neste contexto. Juntamente com a argila, estes atuam como agentes cimentantes, resultando na formação de agregados e estrutura do solo, refletindo diretamente no potencial erodível do solo.

O critério que correlaciona a resistência do solo à erosão com o grau de laterização, apresentou boa correspondência com o comportamento observado para os itabiritos estudados. Todas as amostras foram classificadas como laterizadas. A seguinte sequência crescente de resistência à erosão foi estabelecida: IM, IG, IE e IA.

O critério coesão (Δ_c), na qual se relaciona solos com $\Delta_c \geq 85\%$ a solos com média a alta erodibilidade, não foi validado para os itabiritos estudados. Todos os materiais apresentaram valores de Δ_c menor que 85%, o que corresponderia a uma baixa erodibilidade. Porém, isso não corresponde à erodibilidade observada para IG, IM e IE.

Entretanto, admite-se a importância do estudo deste parâmetro na análise de erodibilidade dos solos.

Por se tratar de materiais inconsolidados, os itabiritos apresentaram faixas de valores de coesão bem diferentes dos solos estruturados estudados por da literatura brasileira, que utilizaram e validaram esse critério em seus trabalhos. Diante disso, foi proposta uma nova correlação entre o Δc e a erodibilidade daqueles itabiritos (IG, IM, IE, IA): baixa erodibilidade para $\Delta c < 60\%$; média erodibilidade para $60\% \leq \Delta c \leq 75\%$ e alta erodibilidade para $\Delta c \geq 75\%$.

A partir do peso de solo seco erodido procedeu-se ao cálculo da taxa de erodibilidade ($\text{g.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$) de cada material. Como esperado, observou-se uma erosão mais acentuada na maior vazão (vazão máxima). Porém, as análises estatísticas, através do teste t-student ao nível de 95% de confiança, mostraram que a produção de sedimentos para a vazão máxima não difere daquela resultante da vazão mínima para o IM e o IA, mas difere para as amostras de IG e o IE, conforme se observa através do P-valor de cada amostra.

As análises estatísticas, através do teste t-Tukey ao nível de 95% de confiança, mostraram que a produção de sedimentos para as amostras IG, IM e IE não diferem entre si, mas diferem do IA. Isso foi observado tanto para a vazão máxima quanto mínima. Tendo por base esses resultados e ainda os valores obtidos para E, obteve-se a seguinte sequência decrescente de erodibilidade dos materiais: IG, IM, IE e IA.

De um modo geral, observa-se que não há uma exata concordância entre todos os critérios de erodibilidade apresentados, tanto a partir de avaliações indiretas quanto diretas.

Entretanto, este estudo permitiu concluir que aqueles critérios que melhor se adequaram à análise da erodibilidade desses itabiritos, observada na avaliação direta (Inderbitzen), foram a maior presença de partículas da ordem de areia fina e silte, relacionada a solos mais susceptíveis à erosão. O coeficiente de uniformidade (C_u), o grau de laterização, o peso específico dos grãos e a análise dos óxidos de ferro e alumínio, também apresentaram boa correlação com a erodibilidade. O ensaio de Inderbitzen (avaliação direta), associado às análises estatísticas, forneceu dados muito importantes para a análise da erodibilidade dos itabiritos, além de conduzir à uma adequada associação e interpretação dos valores obtidos para os demais parâmetros do solo aqui estudados.

Para que se alcance menor erro ao se correlacionar a erodibilidade dos solos com suas características obtidas através das avaliações indiretas e diretas, é necessário que se proceda a um maior número de repetições, alcançando uma amostragem em área maior dentro da mesma bacia de contribuição. Isso permitirá a elaboração de um banco de dados mais fidedigno das condições e variações observadas no campo, de modo a se alcançar valores médios mais próximos da realidade, ou seja, que representem melhor o real comportamento destes materiais.

A avaliação da erodibilidade norteia medidas preventivas à erosão hídrica por fluxo superficial, como por exemplo, o planejamento e manutenção de estruturas de contenção de sedimentos dentro da área da mina, além das estruturas de drenagens. Os solos que apresentaram maior potencial de erodibilidade demandam um maior número de *sumps* ou *sumps* maiores (dependendo da área de drenagem de cada um) ou ainda, tornam necessárias manutenções mais frequentes, tanto nos *sumps* quanto nas estruturas de drenagem.

Essa proposta de abordagem geotécnica sobre a erodibilidade de solos originados de rochas de itabiritos (goethítico, martítico, especularítico e anfibolítico), permite orientar a elaboração do Plano de Drenagem anual da mina. Como consequência desse estudo, obtém-se maior eficiência na gestão das águas superficiais e seu potencial erosivo no interior das minas. Os parâmetros reais desses itabiritos substituirão aqueles obtidos, atualmente, de uma literatura baseada em estudos de solos que se comportam de forma diferente desses itabiritos inconsolidados, visto que não se encontra disponível na literatura, parâmetros de solos semelhantes a esses.

6.1. Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, sugere-se a realização de:

- Ensaios pela Metodologia MCT – ensaio de infiltrabilidade e erodibilidade específica;
- Ensaios estabelecidos pelo LNEC – ensaio de expansibilidade LNEC e ensaios de limite de absorção;
- Análise química mais completa, para obtenção de CTC, pH, cátions trocáveis;
- Ensaios de permeabilidade e condutividade hidráulica;
- Maior número de repetições para ensaios de cisalhamento direto e Inderbitzen;

- Ensaios de Inderbitzen com variação da inclinação da rampa e mais variações de vazão;
- Análises de micromorfologia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, E. E. N.; ROCHA, P. A.; SIEBENEICHLER, E. A.; COSTA, L. M.; VERGÜTZ, L.; SCHAEFER, C. E. G. R. 2015. **Determinação da massa por área mínima de amostras de solo e vegetal para análise no μ -EDX**. In: XV Simpósio Mineiro de Solos. 2015., Viçosa. Anais, p. 28-30.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS- ASTM. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, D3.080, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. **Glossário de Termos Técnicos de Geologia de Engenharia**. São Paulo, 1985.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459, Norma: **Solo – determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 1984. 6p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 6508, Norma: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - **Determinação da massa específica** –Rio de Janeiro, 1984. 8p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 6457, Norma: Amostra de solos – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: 1986a. 9p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 9604, Norma: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas. Rio de Janeiro: 1986. 9p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 7180, Norma: **Solo – determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 1988. 3p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181, Norma: **Solo – análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 1988. 13p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10838, Norma: **Solo – determinação da massa específica aparente de amostras indeformadas, com emprego da balança hidrostática**. Rio de Janeiro, 1988. 4p.
- ASTM (1989). **Standard Test Method for Classification of Soils for Engineering Purposes. ASTM-D 2487- 85**. American Society for testing and Materials, ASTM, Philadelphia Philadelphia USA, p288-p297.

- BABINSKI, M., CHEMALE Jr., F., VAN SCHMUS, W.R. **The Pb/Pb age of the Minas Supergroup carbonate rocks, Quadrilátero Ferrífero, Brazil.** Precam. Res., 72: 235-245, 1995.
- BASSO, L. **Estudo da erodibilidade de solos e rochas sedimentares de uma voçoroca na cidade de São Francisco de Assis - RS.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 139p. 2013.
- BASSO, L. **Estudo da erodibilidade de solos e rochas sedimentares de uma voçoroca na cidade de São Francisco de Assis - RS.** XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 09 a 13 de Setembro de 2014.
- BASTOS, C. A. B. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados.** 1999. 251f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- BASTOS, C. A. B. **Proposta metodológica para avaliação geotécnica da erodibilidade de solos residuais não saturados** – VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão Goiânia (GO), 03 a 06 de maio de 2001.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação de solo.** São Paulo: Ícone, 335p.,1990. (Coleção Brasil Agrícola).
- BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D.; SANTOS, G. F. dos. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais.** Editora da UFSC. Florianópolis –SC. 1994. 425p.
- BREWER, R. 1976. **Fabric and mineral analysis of soils.** New York, R.E. Krieger, 73p.
- BULLOCK, P., THOMASSON, A.J. 1979. Rothamsted studies of soil structure. II. **Measurement and characterization of macroporosity by image analysis and comparison with data from water retention measurements.** Journal of Soil Science, 30:391-413.
- CAMAPUM de Carvalho, J.; JUNIOR, G. de F. N. G.; CARVALHO, E. T. L. organizadores. **Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais. Série Geotecnia. Vol. 4.** Livro. 644 p., Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Brasília, DF. 2012.

- CARDOSO, F. B. F. **Caracterização físico-química e estrutural de solos tropicais do Distrito Federal, Brasília**, 2002. 357 p. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília.
- CARNEIRO, S. R. C. **Avaliação da estabilidade de taludes e do fluxo subterrâneo nas áreas de ampliação das cavas de Alegria Centro e Sul, Samarco Mineração S.A.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.
- CARVALHO, N. de O., **Hidrossedimentologia prática**. Livro. 2ªed.,ver.,atual. e ampliada. Rio de Janeiro: Interciência, 2008. 599p.
- CURI, N. Lithosequence and toposequence of Oxisols from Goiás and Minas Gerais State, Brazil. West Lafayette, Purdue University, 1983. 158 p. (Tese de Doutorado).
- CHUQUIPIONDO, I. G. V. **Avaliação da estimativa do potencial de erodibilidade de solos nas margens de cursos de água: estudo de caso trecho de vazão reduzida Capim Branco I Araguari Minas Gerais**, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, 216 p., 2007
- DEMATTE, J.L.I., WILDING, L.P., HOLOWAYCHUK, N. 1977. **Solos da região de São Pedro, Estado de São Paulo**. III. Micromorfologia. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 1:104-107.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagens. **Pesquisa de estabilidade de taludes: Recomendação para proteção de taludes contra erosão**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1979.
- DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. **Principais depósitos minerais do Brasil**. 4v. (v. 2) il. Brasília, 1986.
- DORR II, J. V. N. **Ocorrências e classificação de minérios de ferro no Quadrilátero Ferrífero**. Conf. Pron. na Semana de Estudos sobre Padronização dos Minérios. Agosto, 1964a.
- DORR II, J. V. N. Supergene iron ores of Minas Gerais, **Brazil. Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists**, vol 59, Nº 7, 1203-1240, november, 1964b.

- FÁCIO, J. A. **Proposição de uma metodologia de estudo da erodibilidade dos solos do Distrito Federal**. 1991. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- FALCI, S.C., MENDES, A.C.T. 1973. **Identificação de cutans em perfis de latossolo roxo e terra roxa estruturada**. Anais da ESALQ, 30:49-70.
- FARIAS, C.E.G. **Mineração e meio ambiente no Brasil. Relatório preparado para o CGEE – PNUD – Contrato 2002/001604**. Outubro de 2002.
- FENDRICH, R. et al. **Drenagem e controle de erosão urbana**. Curitiba, Educar, 1984.
- FONSECA, L. d'A. M.. **Indicadores ambientais em áreas de riscos de deslizamentos de terra em Juiz de Fora, Minas Gerais** 77 p., Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa (MG), 2014.
- FRAGASSI, P. F. M. **Estudo da erodibilidade dos solos residuais de gnaiss da Serra de São Geraldo e de Viçosa (MG)**, 119 p., Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa (MG), 2001.
- FRAGASSI, P. F. M. e MARQUES, E. A. G. **Desenvolvimento de uma nova versão do Aparelho de Inderbitzen**, Anais, VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão, Goiânia, 9 p., 2001.
- FREIRE, E. P. **Ensaio Inderbitzen modificado: um novo modelo para avaliação do grau de erodibilidade do solo**, Anais, VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão, Goiânia, 8 p. 2001.
- FU, ZHIYONG.; LI, ZHAOXIA.; CAI, CHONGFA.; SHI, QINXUE.; WANG, XIAOYAN. **Soil thickness effect on hydrological and erosion characteristics under sloping lands: A hydropedological perspective**. Geoderma. 167 – 168, p. 41 – 53. 2011.
- GRANDO, A.; MACIEL, C. B.; CORSEUIL, C. W.; MACCARINI, M.; KOBAYAMA, M.; HIGASHI, R. A. R. **Erodibilidade do solo de uma microbacia experimental**. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos , 22 a 26 de novembro de 2009.
- GRIEBELER, N. P. **Modelo para o dimensionamento de redes de drenagem e de bacias de acumulação de água em estradas não pavimentadas**, 122 p. 2002. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- GRIEBELER, N. P. PRUSKI, F. F. MEHL, H. U. SILVA, D. D. OLIVEIRA, L. F. C. **Equipamento da erodibilidade cisalhamento do solo para determinação e**

- tensão crítica de canais de estradas.** R. Bras. Eng. Agric. Ambiental. v.9, n.2, p.166-170, 2005.
- GUERRA, A.J.T.; Silva, A.A.; Botelho, R.G.M. (org.) **Erosão e conservação dos solos.** Rio de Janeiro – RJ: Bertrand Brasil, p.269-293.1999.
- HIGASHI, R.A.R. (2006). **Metodologia de Uso e Ocupação dos Solos de Cidades Costeiras Brasileiras Através de SIG com Base no Comportamento Geotécnico e Ambiental.** Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis-SC, 486p.
- IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. **Mining Day – A indústria de mineração em debate. Perspectivas da Mineração no Mundo e no Brasil** – Rio de Janeiro, 25 de novembro de 2014. IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. **Informações sobre a economia mineral brasileira 2015** – Outubro de 2015.
- INDERBITZEN, A. L. An erosion test fr soil. **Materials Research & Standards**, Philadelphia, v.1, n.7, p.553-554, 1961.
- IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Manual de ocupação de encostas.** CUNHA, M.A. (Coord). Sao Paulo: IPT, n.1831, 216 p. 1991.
- ISSMFE. *Progress Report (1982–1985) of the comitee on tropical soils: Peculiaridades of geotechnical behaviour of tropical lateritic and saprolitic soils.* In: International Conference on Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils, 1., 1985, Brasília/DF. Proceedings..., Brasília/DF: ABMS, 1985. p.1–45.
- JACINTHO, E.C.; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; CARDOSO, F.B.F.; SANTOS, R.M.M.; GUIMARAES, R.C.; LIMA, M.C.G. Solos Tropicais e o Processo Erosivo. In: CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M.M.; SOUZA, N.M.; MELO, M.T.S. (Org.). **Processos erosivos no centro-oeste brasileiro.** Brasília: Universidade de Brasília: FINATEC, p. 93-156, 2006.
- JESUS, A. S. **Investigação Multidisciplinar de Processos Erosivos Lineares: Estudo de Caso da Cidade de Anápolis – GO**, 340 p., 2013, Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Brasília, DF.
- JONGERIUS, A., SCHOODERBEEK, D., JAGER, A. 1972. **The application of the Quantimet 720 in soil micromorphometry.** The Microscope, 20:243-254.

- JUHÁSZ, C.E.P., COOPER, M., CURSI, P.R., KETZER, A.O., TOMA, R.S. 2007. **Micromorfologia de solo sob cerrado em relação à retenção de água.** Sci. Agric., 64(4):344-354.
- KÄMPF, N. **Ferro em Latossolos: Métodos e estudos.** Palestra apresentada no Simpósio Evolução dos Latossolos. VI Congresso Brasileiro de Geoquímica, Salvador, Bahia, 19 a 25/10/1997. Sociedade Brasileira de Geoquímica.
- KER, J. C., **Mineralogia, sorção e desorção de fosfato, magnetização e elementos traços de Latossolos do Brasil.** 1995. 181p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- KOETZ, M. **Método para determinação da erodibilidade e da tensão crítica de cisalhamento do solo em estradas não pavimentadas.** 2003. 71p., Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Viçosa, MG.
- KUNTSHIK, G. **Aplicação da equação universal da perda de solo na microbacia do Ribeirão das Araras, através de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento.** 1996. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INEP, São José dos Campos/ SP, 1996.
- LANE, L. J.; RENARD, K. G.; FOSTER, G. R. & LAFLEN, J. M. (1992). **Development and application of modern soil prediction technology.** Australian Journal of Soil Research, 21: 431 – 433.
- LEPRUN, J.C. 1979. **Les cuissares ferrugiuneses des pays cristallins de l'Afrique Occidentale sèche - Gènese, transformation, dégradation.** Tese de Doutorado, Université Louis Pasteur de Strasbourg, Strasbourg, 208 p.
- MACHADO, R. E. Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento – Piracicaba, 2002. 154p. (Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz, Universidade de São Paulo.
- MAGALHÃES, R. A. **Erosão: definições, tipos e formas de controle.** SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO, 7,2001, Goiânia/ GO. Anais..Goiânia/ GO, 2001. 11p.
- MELFI, A.J.; PEDRO, G.; NALOVIC, L. & QUEIROZ NETO, J.P. Étude sur l'alteration géochimique des itabirites du Brésil. Dissolution du quartz et instabilité

- de l'hématite primaire en conditions tropicalles hydrolysantes. Cah. ORSTOM, Sér. Pédol., 3:179-192, 1976.
- MEIRELES, J. M. F. Erosão de taludes de estradas. In: JORNADAS LUSO-BRASILEIRAS DE ENGENHARIA CIVIL, 2., 1967, Rio de Janeiro/RJ – São Paulo-SP. **Anais...** Rio de Janeiro/RJ – São Paulo-SP, 1967. p. 204-211.
- MENDES, C. A. R. **Erosão superficial em encosta íngreme sob cultivo perene e com pousio no município de Bom Jardim** – RJ. 2006. 227f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- MOTTA, N. O. **Caracterização geotécnica e dos processos erosivos na cidade de Campo Grande - MS**, 203 p., 2001. Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília.
- MOURA FILHO, W., BUOL, S.W. 1976. **Studies of a Latosol Roxo (Eutruxox) in Brazil: Micromorphology effect on ion release**. *Experientiae*, 21:161-177.
- MURPHY, C.P., BULLOCK, P., TURNER, R.H. 1977a. **The measurement and characterization of voids in soil thin sections by image analysis: Part I: Principles and techniques**. *Journal of Soil Science*, 28:498-508.
- MURPHY, C.P., BULLOCK, P., TURNER, R.H. 1977b. **The measurement and characterization of voids in soil thin sections by image analysis: Part I: Applications**. *Journal of Soil Science*, 28:509-518.
- NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo – SP. Editora Villibor, 1995. Cap. 7: Erosão na faixa marginal, p. 169-1696.
- OLIVEIRA, G. A. I.; CLEMENTE, L. C.; VIAL, D. S. **Excursão à Mina de Ouro de Morro Velho**. In *Anais, II. Simp. Geol. Minas Gerais*, Belo Horizonte, Soc. Bras. Geol., Núcleo Minas Gerais, Bol. N. 3, 1983, p. 497-505.
- OLIVEIRA, E.P. 2006. **Caracterização bio-físico-químico-mineralógica e micromorfológica de um perfil de alteração de granito-gnaiss de Curitiba, PR**. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 197 p.
- PAIVA, C. F. E. **Avaliação da erodibilidade de alguns horizontes residuais pertencentes a Bacia do Rio Una-Taubaté – SP**. 2004. 194f. Tese (Doutorado

- em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Rio de Janeiro, 2004.
- PASTORE, E.L. **Contribuição ao tema geotecnia e meio ambiente: erosão.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 8., 1986, Porto Alegre/RS. **Anais...** Porto Alegre/RS: ABMS, 1986. p.43-54.
- PASTORE, E.L. **Estudos para planejamento da conservação de estradas de terra do município e de estradas de terra do município e de usinas de açúcar e álcool de São Joaquim da Barra – SP.** In: Simpósio Internacional de pavimentação de rodovias de baixo volume de tráfego (SINBATRA), 1., 1997, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABPv, 1997. p. 1-11.
- PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas.** 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 355 p.
- PRANDINI, L.P. (1985). **Special Types of Gullies. Peculiarities of in situ behavior of tropical lateritic and saprolitic soils in their natural conditions (Theme 3). Peculiarities of Geotechnical Behavior of Tropical Lateritic and Saprolitic Soils.** Progress Report pp. 135-149.
- PRUSKI, F. F. **Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica.** 2. ed. Viçosa: Ed UFV, 2009. 279p.
- RAMIDAN, M. A. S. **Estudo de um processo de voçorocamento próximo a UHE de Itumbiara – GO.** 2003. 229f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2003.
- RENARD, K.G.; FOSTER, G.R.; WESSIES, G.A.; PORTER, J.P. **RUSLE – Revised Universal Soil Loss Equation.** Journal of Soil and Water Conservation, v.46, n.1, p.30-33, 1991.
- RESENDE, M. **Mineralogy, chemistry, morphology and geomorphology of some soils of the Central Plateau of Brazil.** West Lafayette, Purdue University, 1976. 237p. (Tese Ph.D).
- ROSIÈRE, C. A. & Chemale JR., F. 1991. **Textural and structural aspects of iron ores from Iron Quadrangle, Brazil Source, Transport and Deposition of Metals.** Roterdam (Balkema). Pagel & Leroy (Eds), p. 485-488.

- SANTOS, R. M. M. dos. **Caracterização geotécnica e análise do processo evolutivo das erosões no município de Goiânia**. 1997. 120 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Brasília, Brasília, DF.
- SARAIVA, S. L. C. **Apostila de Mecânica dos solos. Engenharia de Agrimensura**. 2007. 54f. in web: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAetXcAL/geologia-mecanica-dos-solos-prof-sergio-saraiva> Acesso:19/11/2015 às 17:28.
- SCHWERTMANN, U & TAYLOR, R. M. Iron oxides. In: DIXON, J. B.& WEED, S. B., eds. **Minerals in soil environments**. Madison, Soil Science Society of America, 1977. p.145-180.
- SILOS, V. R.; POLIVANOV, H.; SANTOS, L. V.; SILVA, A. S.; ÁLVARO, T. T.; CRUZ, B. L. A. (2011). **Micromorfologia aplicada a estudos geológico-geotécnicos**. Revista brasileira de geociências, 41, 256-262.
- STEPHAN, A. M. **Análise de processos erosivos superficiais por meio do ensaio de Inderbitzen** – Minas Gerais. 2010, 165f. (Tese Doutorado em Eng. Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.
- SUERTEGARAY, D.M.A. (2003) **Desertificação: recuperação e desenvolvimento sustentável**. In: GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B (Org.). Geomorfologia e meio ambiente. Rio de Janeiro: Bertland Brasil, 2003. p. 249-290.
- TALLIS, H.; RICKETTS, T., GUERRY, A.; WOOD, S.; SHARP, R.. InVEST 2.3.0 user's guide: interated valuation of environmental services and tradeoffs. 2012. Disponível em: <http://www.naturalcapitalproject.org/InVEST.html>. Acesso em: 24/08/2015 às 13:21.
- VARGAS, M. Introdução à mecânica dos solos. São Paulo: Mcgraw-Hill do Brasil, 1977.
- VEIGA, M. da. **Erodibilidade em entressulcos e algumas propriedades físicas, químicas e mineralógicas de solos do Rio Grande do Sul, em laboratório**. 1988. 116p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- VILAR, O.M.; PRANDI, E.C. Erosão dos solos. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA. **Solos do interior de São Paulo**. São Carlos/SP: ABMS/EESC-USP, 1993. Cap.7, p. 177-206.
- VITTE, A.C.; MELLO, J.P. de **Considerações sobre a erodibilidade dos solos e a erosividade das chuvas e suas consequências na morfogênese das vertentes:**

um balanço bibliográfico – Climatologia e Estudos da Paisagem – Rio Claro –
Vol. 2 – n.2.julho/dezembro/2007, p.107.

- WISCHMEIER, W. H.; JOHNSON, C. B.; CROSS, B. V. **A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites.** Journal of Soil and Water Conservation, Ankeny, v. 26, n. 5, p. 189-193, 1971. WISCHMEIER W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide planning.** DC: **USDA, Agriculture HANDBOOK**, Washington, n.537,1978. 58 p.
- YURONG, H., PENG, C., CHAOLIN, L., BAOHUA, Z., YU Z. 2006 **Micromorphology of landslide soil.** Journal of Mountain Science, 3:36-50.

ANEXO I

Análises granulométricas

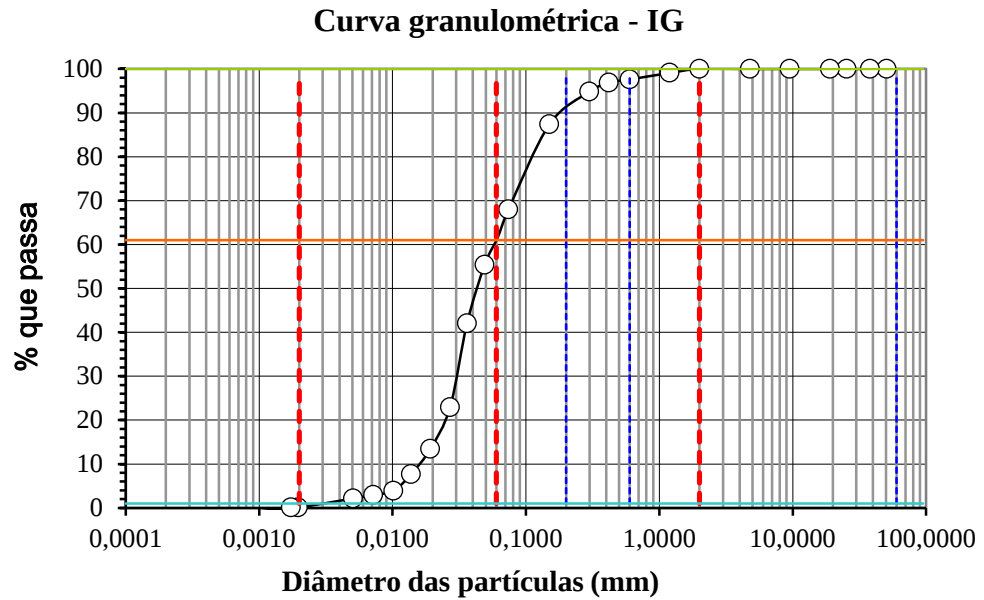


Figura 47: Curva granulométrica itabirito goethítico (IG).

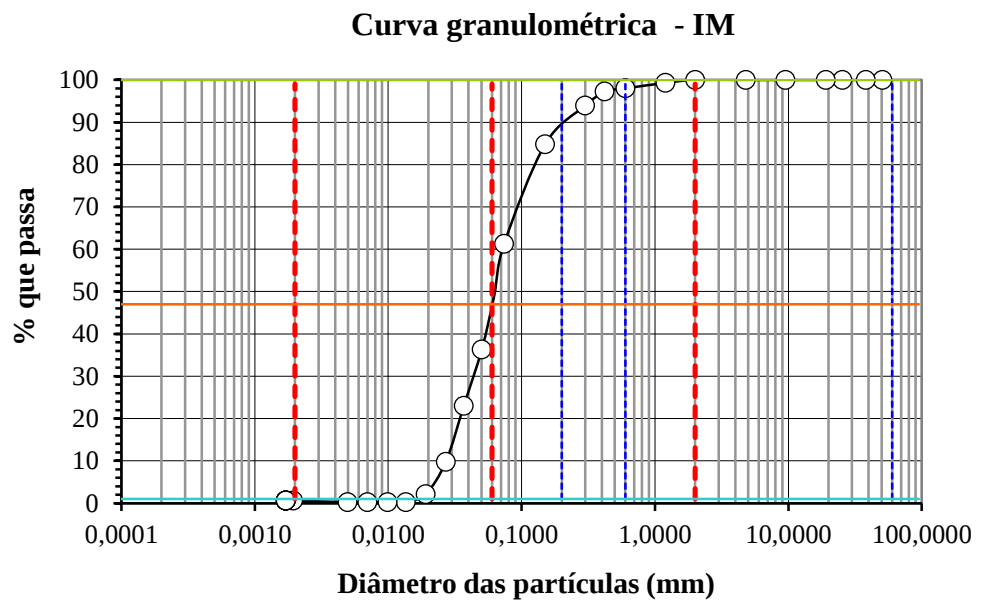


Figura 48: Curva granulométrica itabirito martítico (IM).

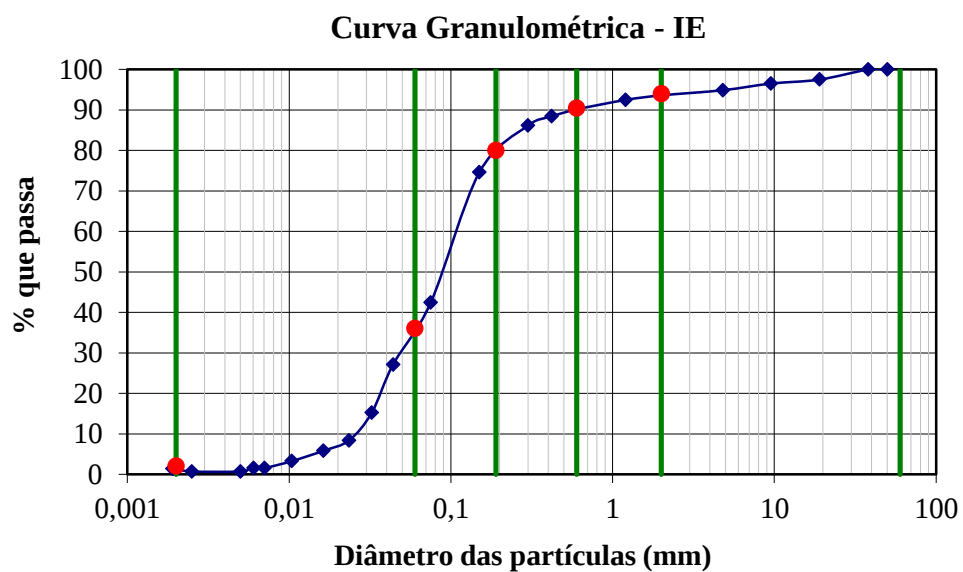


Figura 49: Curva granulométrica itabirito especularítico (IE).

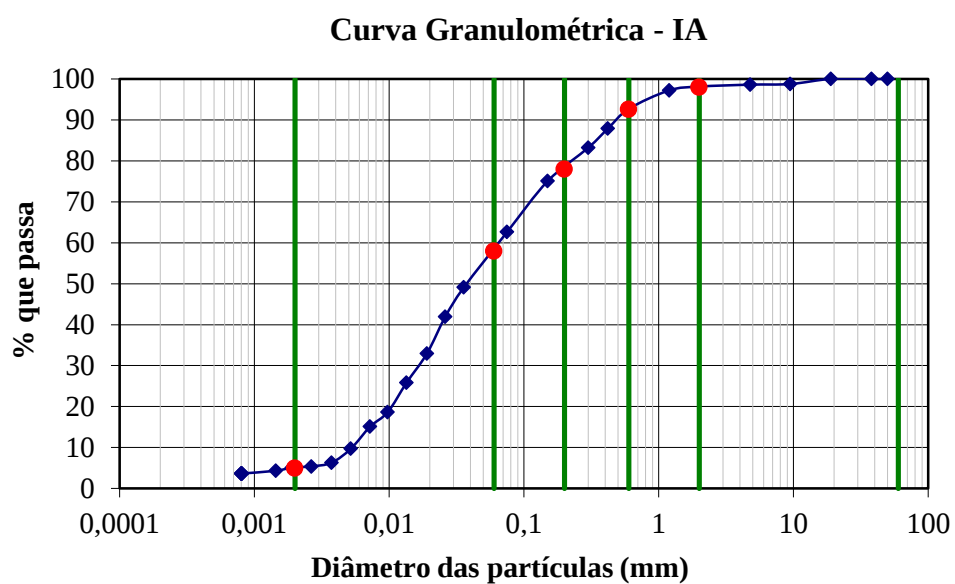


Figura 50: Curva granulométrica itabirito anfíbolítico (IA).

ANEXO II

Análises mineralógicas

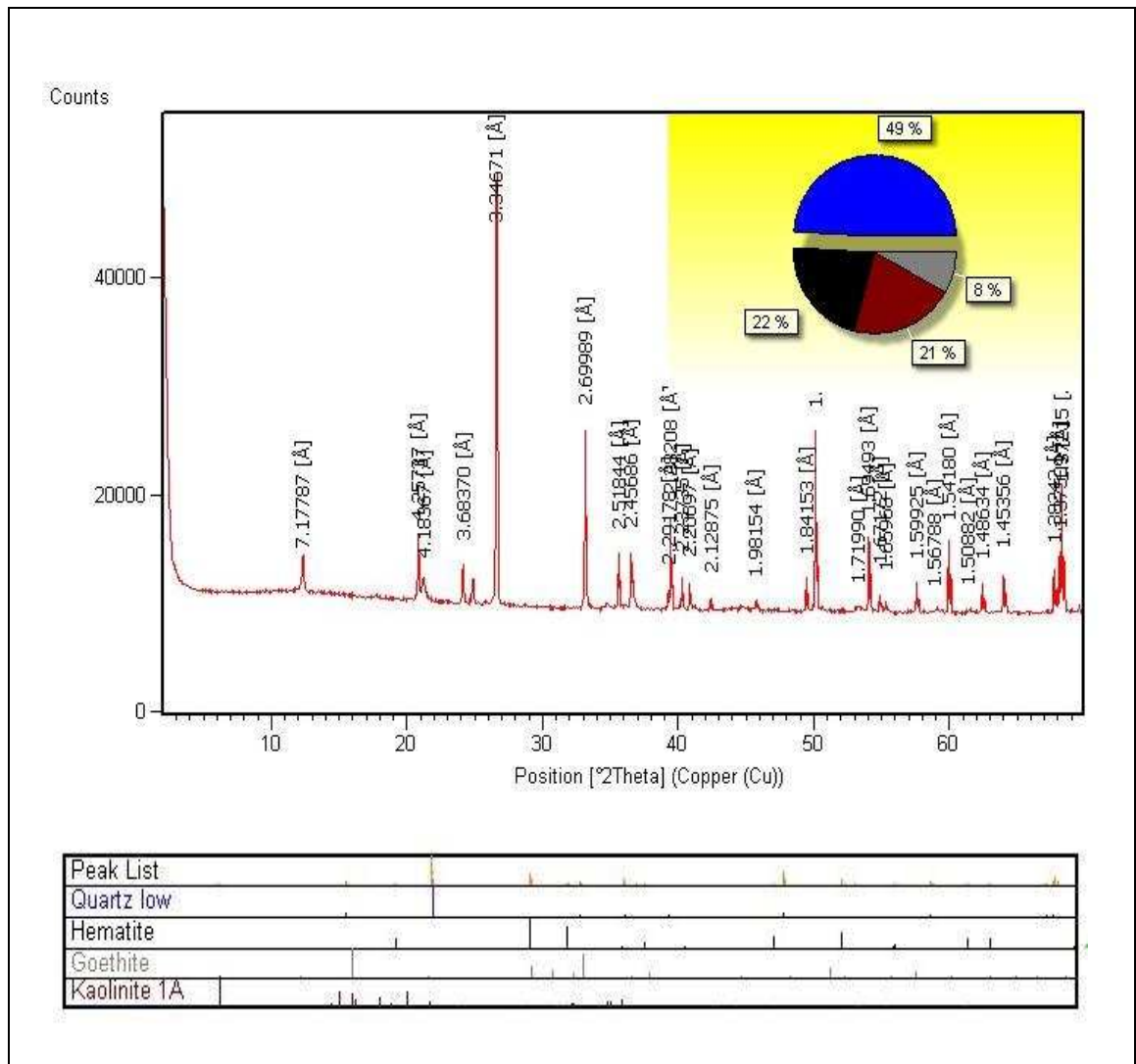


Figura 51: Análise mineralógica IG.

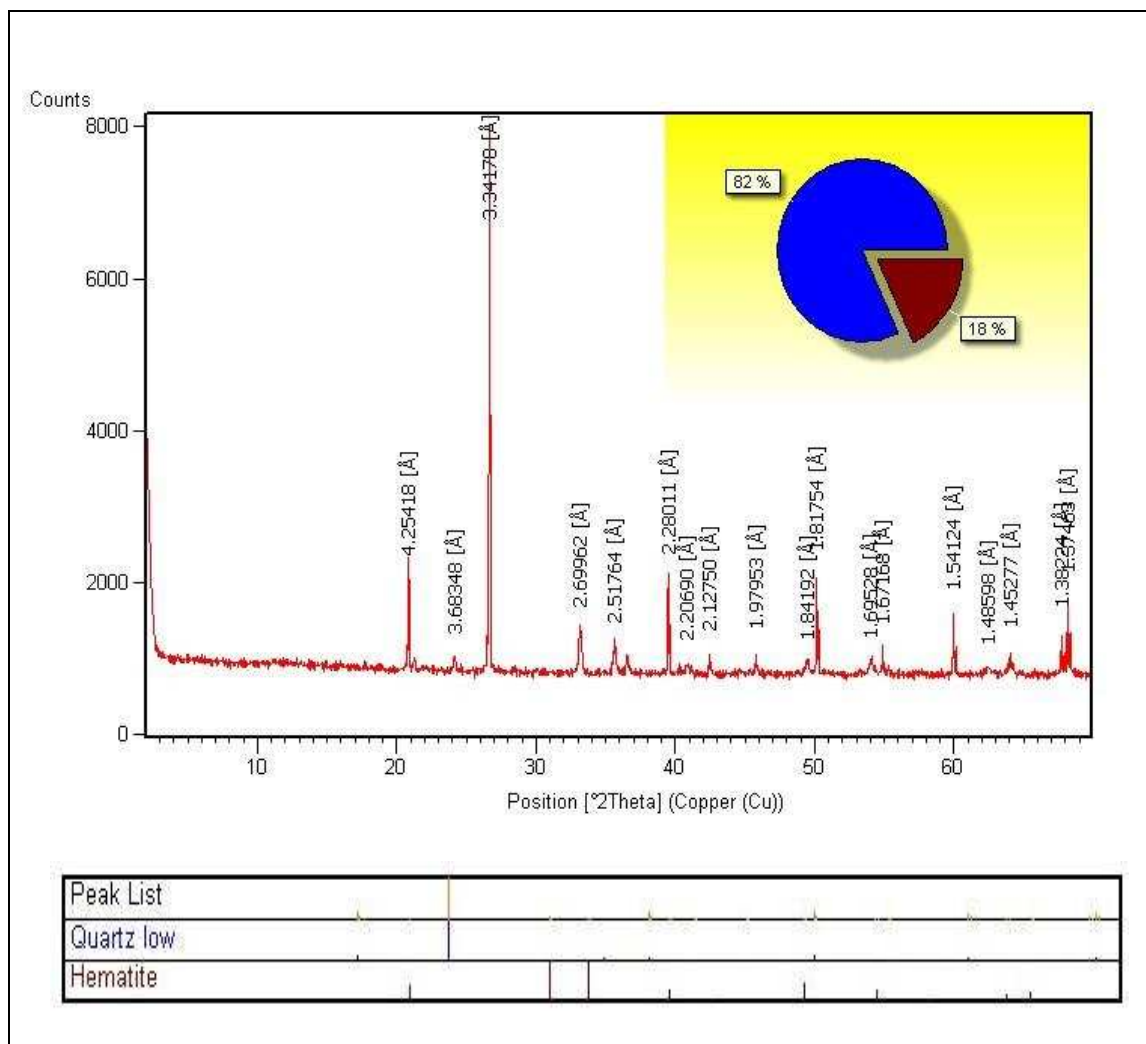


Figura 52: Análise mineralógica IM.

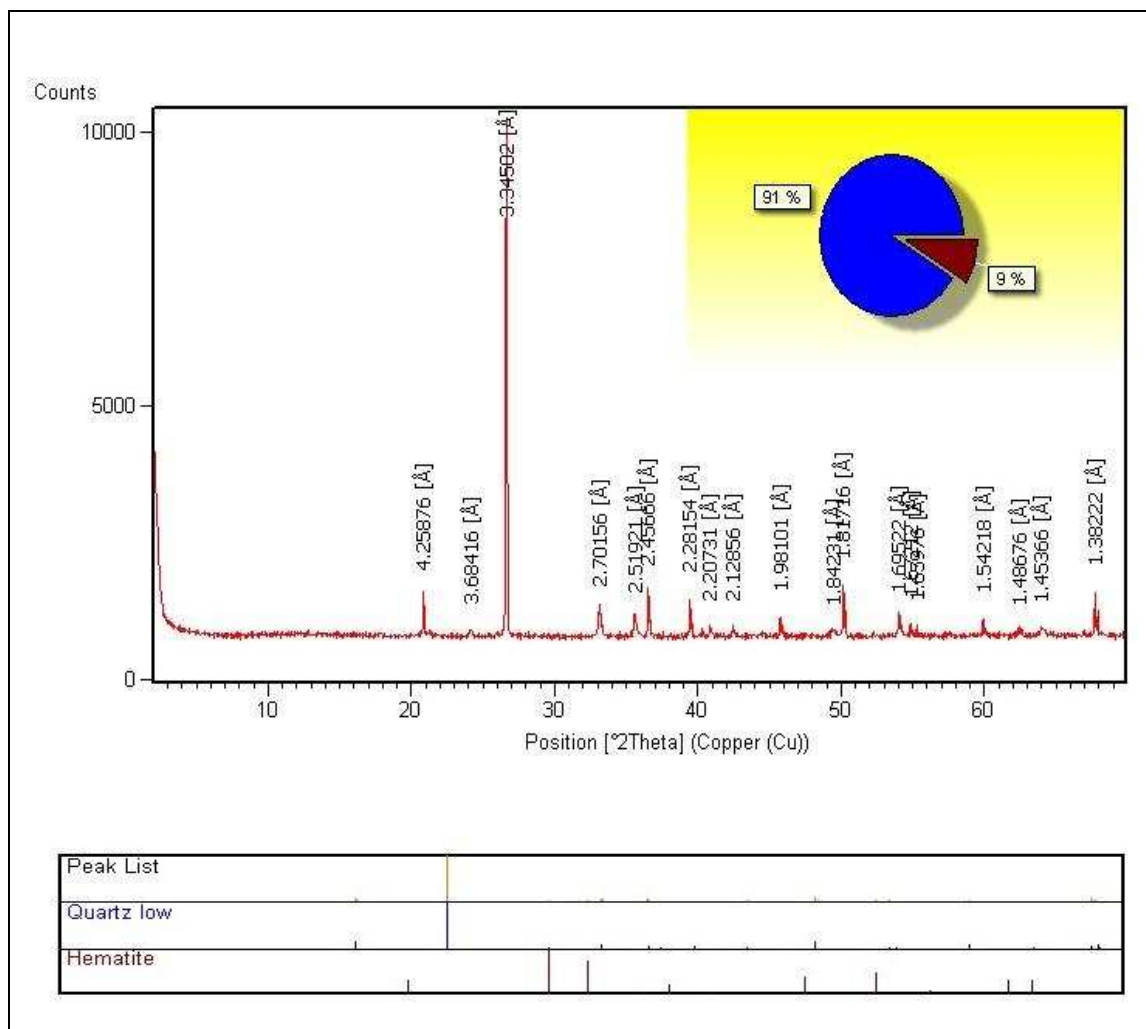


Figura 53: Análise mineralógica IE.

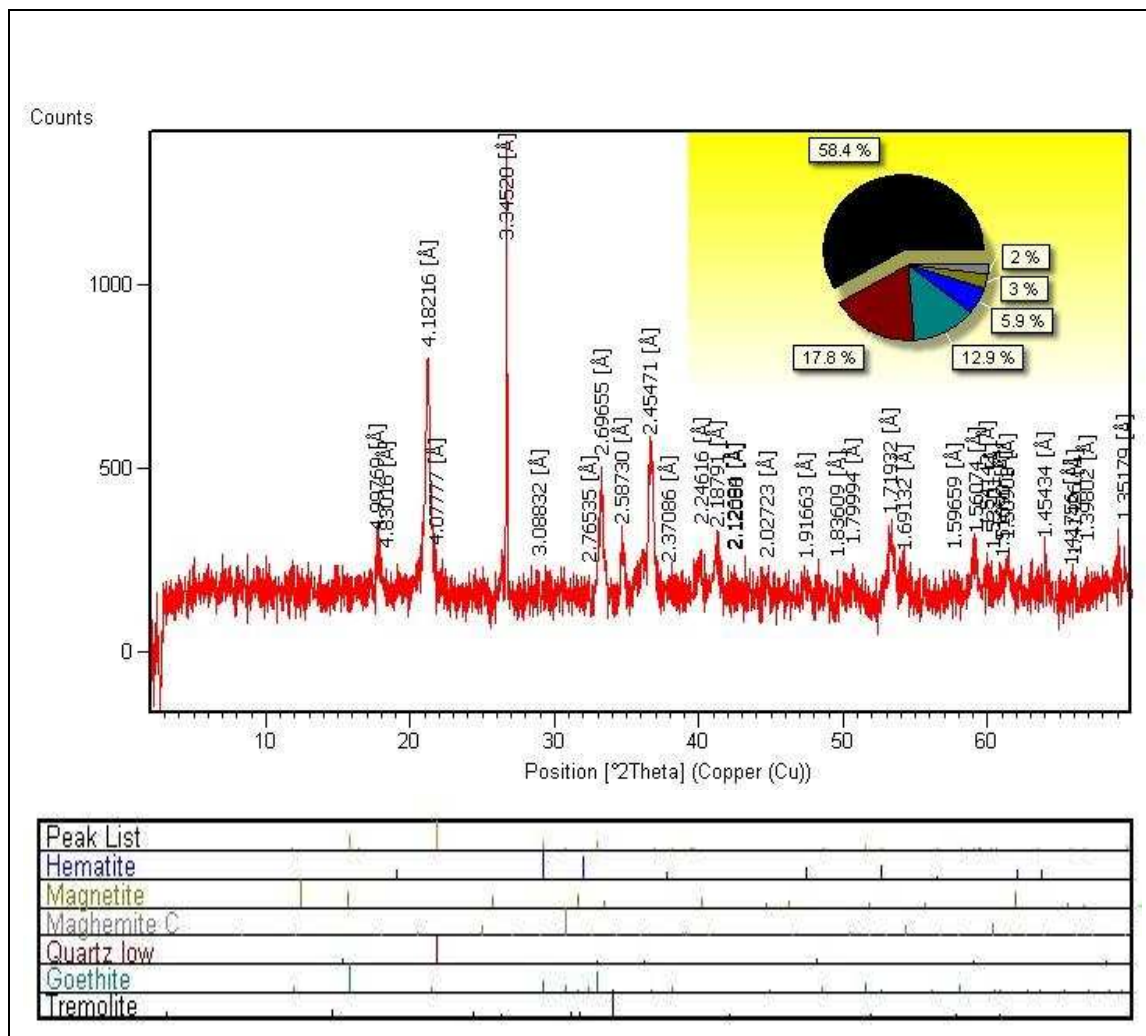


Figura 54: Análise mineralógica IA.