UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS

EDUARDO HENRIQUE SILVA MADUREIRA

CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E FÍSICO-QUÍMICA EM SOLO LATERÍTICO PARA USO EM COBERTURA ALCALINA PARA SOLO ÁCIDO

Ouro Preto – MG
2026

EDUARDO HENRIQUE SILVA MADUREIRA

CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E FÍSICO-QUÍMICA EM SOLO LATERÍTICO PARA USO EM COBERTURA ALCALINA PARA SOLO ÁCIDO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Minas.

Área de Concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. D.Sc. Adilson do Lago Leite.

Ouro Preto – MG
2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M183c Madureira, Eduardo Henrique Silva.
Caracterização geotécnica e físico-química em solo laterítico para uso em cobertura alcalina para solo ácido. [manuscrito] / Eduardo Henrique Silva Madureira. - 2026.
89 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Adilson do Lago Leite.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Geotecnia. 2. Drenagem ácida de minas. 3. Solo laterítico. I. Leite, Adilson do Lago. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624.13:622.5

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

FOLHA DE APROVAÇÃO

Eduardo Henrique Silva Madureira

"Caracterização geotécnica e fiísico-química em solo laterítico para uso em cobertura alcalina para solo ácido”

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Minas

Aprovada em 20 de julho de 2026

Membros da banca

Prof. Dr. - Adilson do Lago Leite - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Prof. Dr. - Tatiana Barreto dos Santos - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Eng. de Minas - Hyasinthe Evrad Simike Boulo - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Adilson do Lago Leite, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 24/07/2026

Documento assinado eletronicamente por **Adilson do Lago Leite**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/08/2026, às 18:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 , informando o código verificador **1151658** e o código CRC **1D2B4A27**.

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163
Telefone: 3135591546 - www.ufop.br

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por iluminar a minha trajetória e me abençoar durante toda a graduação. À minha mãe, Maria Nadurce, por todo o apoio incondicional, por possibilitar e incentivar os meus estudos desde sempre e por ser a minha maior fonte de força e inspiração. Ao seu companheiro, Herculino, pelo apoio e pelo incentivo a retomar os estudos nesta reta final. À minha companheira de vida, Ariani, por estar ao meu lado em todos os momentos, sendo o meu porto seguro ao longo de toda a graduação, e a toda a sua família, em especial Ariadna Gomes, pelo acolhimento e carinho, e Aline Gomes, pelo suporte nesta reta final. Ao Prof. D.Sc. Adilson do Lago Leite, pela orientação na realização deste trabalho, por todos os ensinamentos transmitidos, pela disponibilidade e pela agilidade nas respostas sempre que solicitado. Ao Eng. Simiké, pelo companheirismo ao longo de toda a trajetória deste trabalho e pelo apoio nas atividades laboratoriais. À coordenação do Laboratório do Núcleo de Geotecnia da Universidade Federal de Ouro Preto (NUGEO), por permitir a execução de todos os ensaios laboratoriais realizados neste estudo. Aos técnicos do Laboratório NUGEO, Diogo Baudson e Breno Marques, por toda a disponibilidade, ajuda ao longo da execução dos ensaios laboratoriais e por todos os ensinamentos. E à Universidade Federal de Ouro Preto, pelo ensino público, gratuito e de qualidade.

RESUMO

A drenagem ácida de rochas (DAR) constitui um dos principais impactos ambientais da mineração, resultante da oxidação de minerais sulfetados, especialmente a pirita, na presença de água e oxigênio. Entre as estratégias de mitigação, destacam-se as coberturas secas alcalinas, cuja eficiência depende das propriedades geotécnicas e físico-químicas dos materiais empregados. Este trabalho teve como objetivo realizar a caracterização geotécnica e físico-química de um solo laterítico, coletado no Distrito de Antônio Pereira (Ouro Preto, MG), e de uma amostra de solo ácido oriunda de uma antiga mina de pirita, visando à avaliação preliminar do potencial de aplicação do solo laterítico em coberturas secas alcalinas. Foram realizados ensaios geotécnicos (massa específica dos sólidos, análise granulométrica, limites de liquidez e de plasticidade, compactação Proctor Normal e coeficiente de permeabilidade) e físico-químicos (pH, potencial redox e condutividade elétrica), conforme normas da ABNT. Os resultados indicaram que a amostra de solo ácido apresenta processo ativo de DAR, evidenciado por pH médio de 3,34, potencial redox de 227,53 mV e condutividade elétrica de 986,10 µS/cm. O solo laterítico, por sua vez, apresentou pH médio de 6,21, potencial redox de 38,1 mV e condutividade elétrica de 26,47 µS/cm, além de condutividade hidráulica da ordem de 10^{-7} cm/s, compatível com barreiras de baixa permeabilidade. Concluiu-se que o solo laterítico reúne condições geotécnicas adequadas para compor camadas de cobertura, atuando como barreira física e hidráulica, embora sua atuação como barreira química possa ser potencializada pela associação com materiais alcalinos de maior reatividade como cal ou escórias siderúrgicas, para ampliar a eficiência do sistema de cobertura.

Palavras-chave: drenagem ácida de rochas; cobertura seca; solo laterítico; caracterização geotécnica.

ABSTRACT

Acid rock drainage (ARD) is one of the main environmental impacts associated with mining, resulting from the oxidation of sulfide minerals, particularly pyrite, in the presence of water and oxygen. Among the mitigation strategies, alkaline dry covers stand out, whose efficiency depends on the geotechnical and physicochemical properties of the materials employed. This study aimed to perform the geotechnical and physicochemical characterization of a lateritic soil collected in the District of Antônio Pereira (Ouro Preto, Minas Gerais, Brazil) and an acidic soil sample from a former pyrite mine, in order to preliminarily assess the potential application of the lateritic soil in alkaline dry covers. Geotechnical tests—including particle density of solids, particle-size analysis, liquid and plastic limits, Standard Proctor compaction, and coefficient of permeability—and physicochemical tests—including pH, redox potential, and electrical conductivity—were conducted in accordance with ABNT standards. The results indicated that the acidic soil sample exhibits an active ARD process, as evidenced by an average pH of 3.34, a redox potential of 227.53 mV, and an electrical conductivity of 986.10 µS/cm. The lateritic soil, in turn, presented an average pH of 6.21, a redox potential of 38.1 mV, and an electrical conductivity of 26.47 µS/cm, as well as a hydraulic conductivity on the order of 10^{-7} cm/s, which is compatible with low-permeability barriers. It was concluded that the lateritic soil has suitable geotechnical properties for use in cover layers, acting as a physical and hydraulic barrier. However, its performance as a chemical barrier could be enhanced by combining it with more reactive alkaline materials, such as lime or steelmaking slags, thereby improving the efficiency of the cover system.

Keywords: acid rock drainage; dry cover; lateritic soil; geotechnical characterization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Região da Companhia Mercantil e Industrial Ingá, em Itaguaí (RJ), afetada pela DAM 20
Figura 2 - Drenagem ácida de mina em córrego localizado em West Virginia (EUA) 21
Figura 3 - Fluxograma da metodologia adotada 34
Figura 4 - Localização da área de estudo 35
Figura 5 – Local de coleta da amostra de solo ácido 36
Figura 6 – Local de estudo do solo laterítico 37
Figura 7 - Local de coleta do solo laterítico 38
Figura 8 – Amostra de solo ácido em processo de secagem 39
Figura 9 – Quarteamento dos solos amostra de solo ácido (a) e laterítico (b) 40
Figura 10 – Equipamento de determinação de umidade 41
Figura 11 - Determinação da massa específica dos sólidos (Gs) em picnômetro: (a) amostra de solo ácido; (b) solo laterítico 42
Figura 12 - Ensaio de granulometria dos solos amostra de solo ácido (a) e laterítico (b) 43
Figura 13 – Solo ácido com e sem defloculante para o ensaio de sedimentação 43
Figura 14 - Ensaio de sedimentação da amostra de solo ácido 44
Figura 15 - Ensaio de sedimentação do solo laterítico 44
Figura 16 - Ensaio limite de liquidez dos solos lateríticos (a) e amostra de solo ácido (b) 45
Figura 17 - Ensaio limite de plasticidade da amostra de solo ácido 46
Figura 18 - Ensaio Proctor da amostra de solo ácido 47
Figura 19 - Ensaio Proctor do solo laterítico 48
Figura 20 – Ensaio de permeabilidade da amostra de solo ácido 49
Figura 21 – Ensaio de permeabilidade do solo laterítico 50
Figura 22 – pH amostra de solo ácido 51
Figura 23 - pH solo laterítico 51
Figura 24 – Determinação de Eh do solo ácido 52
Figura 25 – Condutividade elétrica do solo ácido 53
Figura 26 – Condutividade elétrica do solo laterítico 53
Figura 27 – Curvas granulométricas obtidas para a Amostra de solo ácido, ... 56
Figura 28 – Curvas granulométricas obtidas para solo laterítico, ... 58
Figura 29 – Reta de fluência da Amostra de solo ácido, traçada a partir dos teores de umidade e do número de golpes necessários no ensaio de determinação do limite de liquidez 61

Figura 30 – Reta de fluência do solo laterítico, traçada a partir dos teores de umidade e do número de golpes necessários no ensaio de determinação do limite de liquidez 61

Figura 31 – Carta de Plasticidade de Casagrande para Amostra de solo ácido 62

Figura 32 - Carta de Plasticidade de Casagrande para solo laterítico vermelho.....63

Figura 33 – Curvas de compactação e de saturação obtidas para a Amostra de solo ácido, através do ensaio de compactação Proctor Normal 65

Figura 34 – Curvas de compactação e de saturação obtidas para o solo laterítico, através do ensaio de compactação Proctor Normal 66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características principais dos sulfetos 18
Tabela 2 - Principais Sistemas de Controle para DAR 24
Tabela 3 - Métodos preventivos para controle da drenagem ácida de rochas (DAR) 26
Tabela 4 - Referências normativas utilizadas na preparação dos solos 39
Tabela 5 - Resultados obtidos para a massa específica dos sólidos dos solos 54
Tabela 6 – Frações granulométricas da Amostra de solo ácido, extraídas a 56
Tabela 7 – Frações granulométricas da Amostra de solo ácido extraídas a 57
Tabela 8 – Frações granulométricas do solo laterítico vermelho, extraídas a 58
Tabela 9 – Frações granulométricas do solo laterítico vermelho, extraídas a 59
Tabela 10 - Comparativo da distribuição granulométrica do solo laterítico estudado com resultados de outros solos lateríticos de Minas Gerais 60
Tabela 11 - Comparativo do índice de plasticidade do solo laterítico estudado com resultados de outros solos lateríticos de Minas Gerais 64
Tabela 12 - Comparativo da compactação do solo laterítico estudado com resultados de outros solos lateríticos de Minas Gerais 66
Tabela 13 - Potencial hidrogeniônico (pH) da Amostra de solo ácido 68
Tabela 14 - Potencial hidrogeniônico (pH) do solo laterítico vermelho 69
Tabela 15 - Potencial Redox (Eh) da Amostra de solo ácido 70
Tabela 16 - Potencial Redox (Eh) do solo laterítico vermelho 70
Tabela 17 – Tabela de Condutividade Elétrica do solo ácido 71
Tabela 18 – Tabela de Condutividade Elétrica do solo laterítico 72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AP – Potencial Acidificante (Acid Potential)

CE – Condutividade Elétrica

DAM – Drenagem Ácida de Mina

DAR – Drenagem Ácida de Rochas

Eh – Potencial Redox (Potencial de Oxirredução)

INAP – International Network for Acid Prevention

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

MEND – Mine Environment Neutral Drainage

NBR – Norma Brasileira

NP – Potencial Neutralizante

pH – Potencial Hidrogeniônico

SUCS – Sistema Unificado de Classificação dos Solos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14

1.1 Objetivos 15

1.2 Objetivos Específicos 15

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 17

2.1 Drenagem Ácida de Rochas (DAR) 17

2.2 Soluções preventivas 24

2.3 Coberturas Secas Alcalinas 26

2.3.1 Estrutura, materiais e funcionamento 27

2.3.2 Fatores influentes na eficiência da cobertura 29

2.3.3 Comparação com outras técnicas 30

2.3.4 Estudos de caso na literatura 31

2.4 Caracterização Geotécnica de Materiais para Cobertura 32

3 METODOLOGIA 34

3.1 Área de estudo, locais de coleta e materiais 34

3.1.1 Mina de Pirita 35

3.1.2 Solo laterítico 36

3.1.3 Procedimentos de coleta das amostras 38

3.2 Preparação dos solos para os ensaios laboratoriais 39

3.3 Caracterização geotécnica dos solos 41

3.3.1 Determinação da massa específica dos sólidos (Gs) 41

3.3.2 Análise Granulométrica 42

3.3.3 Ensaio de Determinação do Limite de Liquidez 45

3.3.4 Ensaio de Determinação do Limite de Plasticidade 45

3.3.5 Ensaio de Compactação Proctor 46

3.3.6 Ensaio de Determinação do Coeficiente de Permeabilidade 48

3.4 Caracterização Físico-Química dos Solos 50

3.4.1 Determinação do pH 50

3.4.2 Determinação do Potencial de Oxirredução (Eh) 51

3.4.3 Determinação da Condutividade Elétrica e Temperatura 52

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 54

4.1 Ensaios de Caracterização Física dos Materiais 54

4.1.1 Determinação da Massa Específica dos Sólidos 54

4.1.2 Análise Granulométrica 55

4.1.3 Limite de Liquidez 60

4.1.4 Limite de Plasticidade 62
4.2 Ensaios de Compactação 64
4.3 Ensaio de Permeabilidade à Carga Variável 67
4.4 Caracterização Físico-Química 68
4.4.1 Potencial Hidrogeniônico 68
4.4.2 Potencial Redox (Eh) 69
4.4.3 Condutividade Elétrica 71
5 CONCLUSÃO 73
6 ESTUDOS SUGERIDOS 74
REFERÊNCIAS 75
APÊNDICE A – RESULTADOS DETALHADOS DOS ENSAIOS LABORATORIAIS 84
A.1 SOLO ÁCIDO 84
A.1.1 Ensaios de Caracterização Física do Solo 84
A.1.1.1 Ensaio de Determinação da Massa Específica dos Sólidos 84
A.1.1.2 Ensaio de Análise Granulométrica 84
A.1.1.3 Ensaio de Determinação do Limite de Liquidez 85
A.1.1.4 Ensaio de Determinação do Limite de Plasticidade 86
A.1.2 Ensaios de Compactação 86
A.1.2.1 Ensaio de Compactação Proctor 86
A.1.3 Ensaio de Permeabilidade à Carga Variável 86
A.2 SOLO LATERÍTICO 87
A.2.1 Ensaios de Caracterização Física do Solo 87
A.2.1.1 Ensaio de Determinação da Massa Específica dos Sólidos 87
A.2.1.2 Ensaio de Análise Granulométrica 87
A.2.1.3 Ensaio de Determinação do Limite de Liquidez 88
A.2.1.4 Ensaio de Determinação do Limite de Plasticidade 88
A.2.2 Ensaios de Compactação 89
A.2.2.1 Ensaio de Compactação Proctor 89
A.2.3 Ensaio de Permeabilidade à Carga Variável 89

1 INTRODUÇÃO

A geração de drenagem ácida de rochas (DAR) é um dos principais desafios ambientais enfrentados pela indústria da mineração. Esse fenômeno ocorre quando minerais sulfetados, como a pirita (FeS_2), entram em contato com o oxigênio e a água, desencadeando uma reação química que resulta na formação de ácido sulfúrico. Os produtos dessas reações podem ser transportados pelo fluxo hídrico, contaminando aquíferos, corpos d'água superficiais e solos adjacentes (DEPARTMENT OF MINES AND PETROLEUM – DMP, 2009).

A DAR constitui uma grave ameaça ao meio ambiente, pois reduz o pH da água e pode elevar sua concentração em elementos químicos tóxicos, como ferro, manganês, cobre, zinco e outros metais pesados. Além disso, esse processo pode persistir por décadas ou até séculos após o encerramento das atividades mineradoras, devido à lenta oxidação dos minerais sulfetados e à contínua liberação de acidez e metais ao ambiente (MEND PROGRAM, 2009).

Nesse contexto, diversas estratégias têm sido desenvolvidas para mitigar a acidez gerada pela oxidação dos sulfetos, entre as quais se destacam as coberturas secas alcalinas. Essas estruturas são projetadas para restringir a infiltração de água e a difusão de oxigênio sobre materiais sulfetados expostos, minimizando a formação de soluções ácidas e contaminantes. Constituem-se de camadas de materiais alcalinos aplicadas sobre os resíduos da mineração, atuando como barreiras físicas e químicas que reduzem significativamente os processos de oxidação e dissolução de metais (MORAES, 2010).

A eficiência dessas coberturas depende de múltiplos fatores, como espessura, compactação e condutividade hidráulica. Camadas saturadas, mais espessas e com baixa condutividade hidráulica tendem a ser mais eficazes na contenção da água e do oxigênio, fatores cruciais no controle da oxidação e na mitigação da drenagem ácida (MENDONÇA, 2007).

A seleção dos materiais utilizados nas coberturas aplicadas à disposição de resíduos é determinante para sua durabilidade e eficácia. Estudos indicam que coberturas de solos de granulometria fina apresentam baixa permeabilidade e boa capacidade de retenção de água, enquanto materiais alcalinos como o calcário são

amplamente empregados em função da elevada capacidade de neutralização da acidez (BORMA; SOARES, 2002). Escórias siderúrgicas também têm demonstrado propriedades adequadas para aplicação em sistemas de controle da drenagem ácida, destacando-se pela sua alcalinidade e estabilidade geoquímica (ALMEIDA, 2016). Adicionalmente, características como resistência à erosão e potencial de revegetação são fundamentais para assegurar a funcionalidade e a sustentabilidade das coberturas (SOUZA; BORMA; MENDONÇA, 2003).

Solos lateríticos ou latossolos são um dos mais representativos dos chamados “solos tropicais”, de ampla ocorrência no Brasil, compondo mais de 70% de seu território (MELFI, 1994). Seu uso em camadas compactadas em aplicações geotécnicas remonta décadas, principalmente para pavimentos em geral, de modo que é grande a perspectiva do uso desses materiais em coberturas.

A caracterização geotécnica dos solos empregados nas coberturas secas é essencial para avaliar sua viabilidade como barreira de contenção. Parâmetros como granulometria, limites de Atterberg, compactação e condutividade hidráulica são analisados para determinar a capacidade do material reter umidade e restringir a percolação de água até os materiais sulfetados (SOUZA; BORMA; MENDONÇA, 2003). Paralelamente, a caracterização físico-química avalia a capacidade dos materiais de neutralizar a acidez e restringir a mobilidade dos metais dissolvidos, sendo ensaios de pH e condutividade elétrica, fundamentais para essa análise (APPELO; POSTMA, 2005).

1.1 Objetivos

O objetivo geral foi realizar a caracterização geotécnica e físico-química de um solo laterítico visando à avaliação preliminar de sua potencial aplicação em coberturas secas alcalinas para controle da drenagem ácida.

1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos foram:

- Coletar amostra de solo ácido fruto de DAR;

- Coletar amostra de solo laterítico para compor as misturas alcalinas que seriam utilizadas nas coberturas;
- Realizar a caracterização dos materiais utilizados na cobertura alcalina e do solo ácido, com base em ensaios geotécnicos: granulometria, limites de Atterberg, compactação e condutividade hidráulica; e físico-químicos: pH, potencial redox (Eh) e condutividade elétrica;
- Com base em dados da literatura, avaliar de modo preliminar a adequabilidade desses materiais para compor uma cobertura alcalina no controle da geração de drenagem ácida.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica deste trabalho abrange aspectos técnicos e científicos relacionados à drenagem ácida de rochas (DAR), tecnologias de controle, coberturas secas alcalinas e caracterização geotécnica e físico-química de materiais. Nesse contexto, esses temas estabelecem a base para o desenvolvimento experimental apresentado nos capítulos seguintes.

2.1 Drenagem Ácida de Rochas (DAR)

Segundo Goldberg (2021), a drenagem ácida de rochas (DAR) é definida como o escoamento de soluções ácidas geradas a partir da oxidação de minerais sulfetados, especialmente em ambientes expostos à atmosfera em decorrência de atividades antrópicas, como a mineração e grandes obras de engenharia civil.

Trata-se de um processo geoquímico que ocorre quando minerais sulfetados, particularmente a pirita (FeS_2), entram em contato com água, oxigênio e, frequentemente, com microrganismos oxidantes, como bactérias do gênero *Acidithiobacillus* (ASSIS, 2006). Essa interação promove a geração de íons férricos (Fe^{3+}) e ácido sulfúrico (H_2SO_4), resultando em acidificação da água e maior liberação de metais potencialmente tóxicos.

Conforme Assis (2006), os mecanismos que governam a formação da DAR estão relacionados à oxidação química e bacteriana da pirita e de outros sulfetos metálicos, como a calcopirita ($CuFeS_2$), a arsenopirita (FeAsS) e pirrotita (FeS) (Tabela 1). Cumpre destacar que a reação de oxidação ácida não é comum a todos os sulfetos: minerais como galena (PbS), esfalerita (ZnS) e calcocita (CuS) apresentam baixa reatividade e maior estabilidade química frente à oxidação, o que os tornam menos suscetíveis à geração de drenagem ácida (BUZZI, 2012).

Tabela 1 - Características principais dos sulfetos

Mineral	Fórmula	Densidade (g/cm³)	Composição aproximada	Ocorrência no Brasil	Principais aplicações
Pirita	FeS_2	4,95 – 5,10	Fe 46,6%, S 53,4%; pode conter Ni e Co	AM, BA, CE, GO, TO, MA, MT, MS, MG, PR, PE, RS, RN, RJ, SC, SP	Fonte de enxofre para H_2SO_4, aproveitada também como minério de ferro e associada ao ouro e cobre
Arsenopirita	AsFeS	5,9 – 6,2	Fe 34,3%, As 46%, S 19,7%	MG e SP	Usada em ligas de chumbo, fabricação de pigmentos, pesticidas, esmaltes, vidros e preservação de madeira
Calcopirita	$CuFeS_2$	4,1 – 4,3	Cu 34,6%, Fe 30,4%, S 35%	AL, BA, GO, MT, MG, PA, PB, PR, RN, RS, SC, SP	Principal minério de cobre
Pirrotita	FeS	4,50 – 4,87	Fe 60,4%, S 39,6%; fórmula variável ($Fe_{1-x}S$, $0 \leq x \leq 0,2$)	PI	Empregada na produção de ácido sulfúrico; pode conter Ni e Co
Galena	PbS	7,40 – 7,60	Pb 86,6%, S 13,4%; pode incluir traços de Zn, Cd, Sb, As, Bi e Se	SP, PR, MG, BA, CE, GO, ES, MS, MA, PA, PI, RN, RS, SC	Principal minério de chumbo; também fornece prata e elementos associados

Fonte: Adaptado de Duarte (2011).

A pirita é talvez o sulfeto metálico mais comum na crosta terrestre e o principal responsável pela geração da drenagem ácida (SOUZA, 2021). De acordo com Goldberg (2021), o processo de oxidação desse mineral foi investigado em ambientes controlados e naturais, evidenciando a formação de espécies intermediárias sulfoxianionadas, como tiossulfato ($S_2O_3^{2-}$) e sulfito (SO_3^{2-}), e a dependência das reações em relação ao pH e à concentração de oxigênio dissolvido.

A reação estequiométrica da oxidação da pirita, promovida por seus dois principais agentes oxidantes, o oxigênio molecular (O_2) e o ferro na forma férrica (Fe^{3+}), vem sendo descrita na literatura há várias décadas (GARRELS; THOMPSON, 1960; SINGER; STUMM, 1970; LOWSON, 1982). Em meio aquoso, o processo de oxidação da pirita pelo O_2 pode ser representado pela seguinte equação:

$$FeS_2(s) + 7/2\ O_2 + H_2O \rightarrow Fe^{2+} + 2\ SO_4^{2-} + 2\ H^+ \qquad \text{(Eq. 1).}$$

Quando há disponibilidade de oxigênio molecular, o ferro ferroso (Fe^{2+}) é convertido a Fe^{3+} conforme indicado na Eq. 2. Em condições de pH relativamente elevado, esse Fe^{3+} tende a se precipitar sob a forma de hidróxido férrico, como representado na Eq. 3:

$$4Fe^{2+} + O_2 + 4H^+ \rightarrow 4Fe^{3+} + 2H_2O \qquad \text{(Eq. 2)}$$

$$Fe^{3+} + 3H_2O \rightarrow Fe(OH)_3(s) + 3H^+ \qquad \text{(Eq. 3)}$$

Em ambientes com pH neutro a levemente alcalino, onde há maior tendência à formação de hidróxido de ferro, por exemplo, em minas desativadas situadas em formações geológicas com teores relevantes de minerais carbonáticos ou argilosos, é possível combinar as três equações da seguinte maneira:

$$FeS_2(s) + 15/4\ O_2 + 7/2\ H_2O \rightarrow Fe(OH)_3(s) + 2\ SO_4^{2-} + 4H^+ \qquad \text{(Eq. 4)}$$

Em condições de pH ácido, o ferro férrico (Fe^{3+}) permanece solubilizado e pode desempenhar o papel de agente oxidante secundário da pirita, conforme representado a seguir:

$$FeS_2(s) + 14Fe^{3+} + 8H_2O \rightarrow 15Fe^{2+} + 2\ SO_4^{2-} + 16H^+ \qquad \text{(Eq. 5)}$$

As equações mostram que as reações de oxidação da pirita são interdependentes. A interação entre a Eq. 2 e a Eq. 5 estabelece um ciclo autocatalítico: a oxidação da FeS_2 libera Fe^{2+}, que é convertido a Fe^{3+} e, por sua vez, volta a oxidar a pirita, produzindo mais Fe^{2+}. Esse mecanismo evidencia que a prevenção da drenagem ácida de rocha (DAR) é mais indicada que o tratamento posterior, uma vez que o processo pode se auto manter por longos períodos (SINGER; STUMM, 1970).

Embora a oxidação abiótica de Fe^{2+} para Fe^{3+} seja extremamente lenta em valores de pH inferior a 4, Singer e Stumm (1970) demonstraram que a mediação microbiana pode acelerar essa reação em mais de 10^6 vezes, atuando como catalisador biológico fundamental para a intensificação da DAR. Estudos posteriores corroboram essa constatação, indicando que comunidades microbianas compostas por bactérias e arqueias acidotolerantes, oxidantes de ferro e de enxofre, desempenham papel decisivo na aceleração dessas reações e geração do

escoamento ácido (BAKER; BANFIELD, 2003; MÉNDEZ-GARCÍA *et al*., 2015; NORDSTROM, 2015; WILLIAMSON *et al.,* 2006).

As Figura 1 e Figura 2 ilustram áreas no Brasil e no mundo onde a oxidação de minerais sulfetados resultou na acidificação das drenagens, evidenciada pela presença do precipitado de hidróxido férrico.



Figura 1 - Região da Companhia Mercantil e Industrial Ingá, em Itaguaí (RJ), afetada pela DAM
Fonte: ENSP/Fiocruz apud EcoDebate (2010).



Figura 2 - Drenagem ácida de mina em córrego localizado em West Virginia (EUA)
Fonte: WVU Photo/Raymond Thompson Jr. apud WEST VIRGINIA UNIVERSITY (2019).

Como salientado por Borma e Soares (2002) a DAR representa um dos impactos ambientais mais significativos associados à mineração, devido ao seu potencial de persistência e à contaminação de corpos hídricos superficiais e subterrâneos.

Appelo e Postma (2005) destacam que a água constitui o meio ambiental mais sensível aos efeitos da DAR, em razão de sua elevada capacidade de dissolver e transportar íons metálicos em ambientes ácidos. A oxidação de minerais sulfetados, especialmente da pirita (FeS_2), promove a formação de ácido sulfúrico e a mobilização de metais pesados e elementos traço, como ferro, manganês, zinco, cobre, alumínio e arsênio. Esse processo provoca a acidificação dos corpos hídricos e o aumento das concentrações de íons metálicos dissolvidos, tornando os ambientes aquáticos potencialmente tóxicos para a biota. Além disso, águas subterrâneas contaminadas por arsênio podem representar risco elevado à saúde humana, associando-se a lesões cutâneas e maior risco de câncer, sendo sua presença frequentemente relacionada a condições geológicas redutoras ou à liberação a partir de rejeitos minerais ricos em sulfetos.

No que se refere à biodiversidade, os efeitos da drenagem ácida de rochas (DAR) podem ser altamente prejudiciais. A acidificação dos corpos hídricos e o aumento das concentrações de metais como ferro, alumínio e manganês resultam na

eliminação de espécies aquáticas sensíveis, levando à simplificação da teia trófica, à perda de serviços ecossistêmicos e à redução da resiliência ambiental (JOHNSON; HALLBERG, 2005; YOUNGER, 2002).

A recuperação de áreas afetadas por DAR exige não apenas medidas de controle físico-químico, como a neutralização da acidez e a remoção de metais, mas também ações de restauração ecológica, como a reintrodução gradual da vegetação nativa e da fauna associada, visando à reestruturação dos habitats naturais (SHEORAN; SHEORAN, 2006).

A DAR configura-se como uma das mais persistentes e complexas formas de contaminação ambiental associadas à mineração de sulfetos. Conforme destaca o manual técnico do MEND Program (2009), a previsão da química da drenagem deve considerar todo o ciclo de vida do empreendimento, incluindo as fases posteriores ao encerramento das atividades, visto que materiais geológicos sulfetados expostos, escavados ou perturbados permanecem potenciais geradores de acidez. A necessidade de monitoramento prolongado e de ações mitigadoras duradouras decorre da variabilidade das propriedades geoquímicas dos materiais e da limitação dos métodos de previsão quanto à precisão e à abrangência temporal. Dessa forma, a persistência da DAR é reconhecida como um desafio contínuo para o planejamento ambiental, exigindo medidas preventivas, preditivas e corretivas que ultrapassem a etapa operacional da mina até o pós-fechamento.

Casos de drenagem ácida de rochas são registrados em diversos contextos minerários no mundo. Na América do Norte, destaca-se a iniciativa do governo canadense por meio do programa MEND (Mine Environment Neutral Drainage), que tem desenvolvido diretrizes técnicas para o controle da DAR em regiões frias (MEND PROGRAM, 2012). Os estudos de caso analisados pelo programa demonstram que o sucesso a longo prazo depende do equilíbrio entre desempenho técnico, custos e condições ambientais específicas de cada mina.

Em Minas Gerais, a pesquisa de Mello et al. (2006) avaliou preliminarmente o potencial de geração de drenagem ácida no estado, a partir de amostras de minério, estéril e rejeito de sete empreendimentos minerários. Com base no balanço ácido-base (ABA), os autores identificaram quatro sítios com potencial de geração de drenagem ácida, estimando um potencial conjunto de 3,14 a 10,37 bilhões de m³ de

água a pH 2,0, o que equivale a 31,4 a 103,7 bilhões de m³ a pH 3,0, conforme o critério analítico adotado, com custo de neutralização com calcário estimado entre US$ 7,8 e 25,9 milhões.

No Brasil, a problemática também se manifesta em áreas de mineração de ouro e ferro, sobretudo em Minas Gerais. Assis (2006) destaca a experiência em Paracatu, onde experimentos com sistemas de cobertura indicaram a eficácia da indução de barreiras geoquímicas, como a neoformação de jarosita, na redução da lixiviação de arsênio, ferro e enxofre. Ainda assim, a geração de acidez persiste, com valores de pH próximos a 3,0, revelando que, embora certas práticas reduzam a mobilização de contaminantes, a estabilidade química de longo prazo depende da adoção de estratégias integradas e contínuas de manejo ambiental.

O controle da drenagem ácida de rocha (DAR) pode ser conduzido por meio de diferentes estratégias, classificadas em três categorias principais: métodos preventivos, de contenção e de remediação. Este último abrange tanto os tratamentos passivos quanto os ativos (RUBIO; SILVA, 2009).

As medidas preventivas têm como finalidade impedir ou reduzir significativamente a oxidação dos sulfetos, restringindo o contato destes com o oxigênio e a água.

As ações de contenção, por sua vez, visam reduzir o transporte e a liberação de efluentes ácidos, normalmente por meio da implantação de barreiras físicas e sistemas de drenagem controlada, como canais de desvio e diques de confinamento.

Os métodos de remediação estão voltados ao tratamento do efluente ácido gerado, podendo ser subdivididos em passivos e ativos. Os sistemas passivos utilizam processos naturais - como a reação da água com materiais alcalinos (calcário, escória de aciaria, entre outros) e a atividade microbiana redutora -, promovendo a neutralização gradual e a remoção de metais. Em contraste, os métodos ativos demandam adição contínua de reagentes alcalinos, como cal ou hidróxido de sódio, além de monitoramento operacional constante, implicando maiores custos de manutenção e controle químico (KONTOPOULOS, 1998, apud SANTOS, 2020; SKOUSEN *et al.,* 2017). Assim, a escolha entre prevenção, contenção ou remediação deve considerar o estágio do empreendimento, do balanço entre potencial neutralizante (NP) e potencial acidificante (AP) e as condições hidrogeológicas locais,

de modo a garantir eficiência geoquímica e viabilidade técnica do sistema adotado (MEND PROGRAM, 2009).

A Tabela 2 faz um resumo geral dos métodos mais aplicados no controle e remediação de DAR.

Tabela 2 - Principais Sistemas de Controle para DAR

Sistemas aplicáveis ao controle da DAR	
Categoria	Exemplos / Ações
Métodos Preventivos	- Remoção/isolamento dos sulfetos - Exclusão de oxigênio por cobertura de água - Exclusão de oxigênio por cobertura seca - Aditivos alcalinos - Bactericidas
Métodos de Contenção	- Prevenção dos fluxos de água - Paredes reativas porosas - Disposição em estrutura de contenção
Métodos de Remediação	**Sistemas Ativos:** - Neutralização e precipitação - Adsorção / Troca iônica - Osmose reversa - Eletrodiálise **Sistemas Passivos:** - Filtro aeróbico de calcário - Dreno anaeróbico de calcário - Barreira Permeável Reativa - Pântanos (Wetlands construídos) - Reator de fluxo vertical

Fonte: Kontopoulos (1998) citado por Schneider (2006).

2.2 Soluções preventivas

A prevenção da drenagem ácida de rochas (DAR) pode assumir caráter químico, bacteriológico ou físico, conforme o mecanismo predominante de oxidação dos minerais sulfetados e as condições ambientais do sistema (ABREU *et al.,* 2012). Embora a Tabela 2 apresente um conjunto mais amplo de métodos preventivos, destacam-se, a seguir, aqueles diretamente associados às estratégias de cobertura seca e ao emprego de materiais alcalinos.

A DAR é controlada principalmente pela restrição dos fatores determinantes de sua geração, notadamente a disponibilidade de oxigênio, água e microrganismos, condições indispensáveis para o desencadeamento das reações de oxidação dos minerais sulfetados (SOUZA, 2021). Assim, as coberturas secas e úmidas têm sido

aplicadas como barreiras físicas de baixa permeabilidade, capazes de reduzir a infiltração de água e a difusão de gases (POZO-ANTONIO *et al.,* 2014).

Estudos pioneiros conduzidos por Yanful (1993) evidenciaram que a taxa de difusão de oxigênio através das camadas de solo constitui parâmetro determinante para o desempenho das coberturas secas, sendo expressivamente reduzida quando as camadas apresentam elevado grau de saturação e grau de compactação próxima à ótima. Ensaios subsequentes em escala de campo confirmam a influência direta da densidade seca e umidade ótima na limitação do fluxo difusivo de O_2 (YANFUL et al., 1999).

Além das barreiras de cobertura, destacam-se o *blending* e a co-disposição de rejeitos sulfetados com materiais alcalinos, configurando-se como estratégias de controle preventivo aplicadas diretamente na fonte geradora. Essas técnicas consistem na mistura controlada de materiais potencialmente acidificantes com insumos de caráter básico, capazes de promover neutralização in situ e reduzir a mobilidade de metais (SOUZA, 2021). De acordo com Mylona et al. (2000), a reatividade dessas misturas está associada à precipitação de compostos férricos, à elevação do pH, que inibe a atividade microbiana, e à formação de revestimentos protetores sobre os grãos sulfetados, contribuindo para a neutralização direta da acidez gerada.

Tabela 3 - Métodos preventivos para controle da drenagem ácida de rochas (DAR)

Controle	Método	Vantagens	Desvantagens	Referências
Oxigênio/água	Interceptação de águas superficiais e subterrâneas	Fácil aplicação, baixo custo e pode ser usado em conjunto com outros métodos.	Requer estudos hidrológicos e hidrogeológicos detalhados antes da instalação.	Pozo-*Antonio et al.* (2014); Roychowdhury et al. (2015)
Oxigênio/água	Cobertura úmida (*Water cover*)	Eficaz para estabilizar rejeitos; relativamente menos dispendioso em minas de grande escala.	Exige disponibilidade hídrica; inviável em regiões áridas ou com fortes variações sazonais de chuvas.	Roychowdhury *et al.* (2015); Sahoo *et al.* (2013); Simate & Ndlovu (2014); Li *et al*. (2018); Park *et al*. (2019)
Oxigênio/água	Cobertura seca (*Dry cover*)	Estabiliza resíduos de mineração; possibilidade de combinar materiais; aplicável em diferentes contextos.	Raramente previne totalmente a DAR devido à condutividade hidráulica e saturação hídrica; pode gerar efeitos indiretos na paisagem.	Pozo-Antonio *et al*. (2014); Moodley *et al*. (2018)
pH	Aplicação de produtos químicos	Produtos acessíveis e de baixo custo; reduz a liberação de acidez.	Perda de eficiência em poucos anos; necessidade de grandes volumes de reagentes.	Pozo-Antonio *et al.* (2014)
pH	Co-disposição e blending	Permite uso de resíduos industriais e rochas naturais; promove neutralização *in situ*.	Requer cálculo rigoroso do balanço NP/AP e mistura homogênea para ser eficaz.	Park *et al.* (2019); Roychowdhury *et al*. (2015)

2.3 Coberturas Secas Alcalinas

Entre os métodos de prevenção da DAR, destacam-se as coberturas secas alcalinas, baseadas na utilização de camadas de materiais de caráter alcalino, com propriedades físicas e químicas capazes de reduzir a percolação de água e a difusão de oxigênio e, simultaneamente, neutralizar a acidez gerada pela oxidação dos sulfetados (ABREU *et al*., 2012). Segundo Murta, Leite e Lima (2008), o emprego desses materiais tem potencial para elevar o pH do meio e reduzir a mobilidade de metais, configurando medida preventiva aplicável em diferentes contextos geotécnicos.

O princípio de funcionamento baseia-se na disposição em camadas funcionais de baixa permeabilidade, que atuam como barreiras de controle hidráulico e geoquímico,

minimizando a geração de ácido e favorecendo a imobilização de elementos dissolvidos (PARK *et al.,* 2019; SOUZA, 2021). Nesses sistemas, o desempenho depende da configuração multicamadas, da compactação e da interação geoquímica entre os insumos alcalinos e o meio de aplicação, aspectos que determinam a eficiência e a estabilidade a longo prazo das coberturas (MEND PROGRAM, 2009; ABREU *et al.,* 2012; ALMEIDA, 2016).

2.3.1 Estrutura, materiais e funcionamento

Estruturadas em sistemas multicamadas, as coberturas secas alcalinas são projetadas para prevenir a geração de drenagem ácida, combinando barreiras físicas e propriedades químicas que limitam a percolação de água e fluxo de oxigênio e, simultaneamente, neutralizam a acidez gerada pela oxidação de sulfetos. Segundo Almeida (2016), essas coberturas são aplicadas sobre materiais com potencial de geração de acidez, como solos ou rejeitos contendo sulfetos, e organizadas verticalmente de modo a garantir estabilidade geotécnica e controle geoquímico.

Na base da cobertura, costuma-se dispor uma camada de material alcalino, que atua como zona de neutralização e suporte estrutural do sistema (ABREU et al., 2012; ALMEIDA, 2016; MEND PROGRAM, 2009; INAP, 2021). Conforme Murta, Leite e Lima (2008), podem ser utilizados, em diferentes configurações, insumos como cal virgem, calcário, cinza pesada e outros resíduos industriais com potencial alcalinizante, cuja escolha depende da reatividade, disponibilidade local e custo. Acima dessa camada, é instalada uma barreira de solo de baixa permeabilidade, geralmente constituída por silte argiloso compactado ou argila compactada, com a função de manter elevada saturação na zona reativa, restringindo a difusão de oxigênio e limitando a percolação excessiva de água para as camadas inferiores. Conforme o MEND Program (2009), corroborado por Almeida (2016), a eficiência dessa configuração depende da espessura, do grau de compactação e da continuidade hidráulica entre as camadas, sendo recomendado o uso de solos com condutividade hidráulica inferior a 1×10^{-7} cm/s e grau de saturação superior a 85% para favorecer o desempenho a longo prazo.

Yanful (1993) e Yanful et al. (1999) demonstraram, em estudos experimentais e de campo, que camadas finas e altamente saturadas limitam significativamente o

fluxo de oxigênio, reduzindo a oxidação dos sulfetos e favorecendo o equilíbrio geoquímico da cobertura.

Diversos materiais de caráter alcalino são empregados como agentes neutralizantes, destacando-se o calcário, a escória de aciaria, a cinza pesada, a dolomita, a cal hidratada e certas argilas com capacidade de tamponamento. A escolha baseia-se em critérios de reatividade, compatibilidade físico-química, disponibilidade e durabilidade (ABREU *et al.,* 2012; PARK *et al.,* 2019).

Galatto et al. (2007) verificaram que a combinação de cinza pesada com substrato silte-argiloso e cobertura vegetal reduziu significativamente a acidez e favoreceu a precipitação de metais em rejeitos sulfetados de carvão. Embora o estudo tenha sido realizado em rejeitos piritosos, o mecanismo de neutralização, baseado na dissolução de compostos alcalinos e na elevação gradual do pH, é análogo aos observados em solos de caráter ácido.

Skousen et al. (1987), em revisão de procedimentos de controle de drenagem ácida de mina, descrevem o uso de materiais alcalinos na neutralização de materiais ácidos, sendo o potencial de neutralização um dos parâmetros centrais do balanço ácido-base. Já Ziemkiewicz e Skousen (1998) descrevem o uso de materiais alcalinos, como calcário e escória de aço, que, ao se dissolverem, liberam íons alcalinos e contribuem para a neutralização do ácido sulfúrico gerado pela oxidação dos sulfetos.

Complementarmente, Borma e Soares (2002) comparam essas coberturas às utilizadas em aterros sanitários, compostas por camadas de argila compactada e material granular, além de uma camada superficial para suporte à vegetação. Em alguns projetos, podem ser incluídas camadas arenosas com função de barreira capilar ou geomembranas, conforme as exigências do projeto. O'Kane (2002) ressalta que a camada superficial deve atuar como proteção física e suporte a revegetação, contribuindo para o controle da erosão.

A seleção e disposição dos materiais que compõem a cobertura devem considerar a compatibilidade química entre as camadas e suas propriedades físico-hídricas (INAP, 2021). Souza, Borma e Mendonça (2003) enfatizam a necessidade da caracterização geotécnica e mineralógica prévia, além da definição de parâmetros construtivos como a energia de compactação e o teor de umidade ótimo. Conforme Park et al. (2019) e Butar *et al.* (2025), a estabilidade e a eficiência das coberturas

dependem tanto da configuração física quanto da interação geoquímica entre os materiais alcalinos e o solo ácido, aspectos que controlam a condutividade hidráulica e o potencial de neutralização.

2.3.2 Fatores influentes na eficiência da cobertura

As coberturas secas alcalinas destacam-se pela durabilidade e baixa exigência operacional. Essas características minimizam a necessidade de tratamento ativo do material ácido abaixo, favorecendo a revegetação e contribuindo para o fechamento de mina com menores custos operacionais (ABREU *et al.*, 2012; ALMEIDA, 2016; INAP, 2018).

O desempenho prolongado decorre da liberação gradual de alcalinidade, que mantém o pH do material abaixo em níveis estáveis e reduz a solubilização de metais. Segundo INAP (2021), esse comportamento confere estabilidade química e durabilidade ao sistema, reduzindo a necessidade de manutenção. Por atuarem diretamente na fonte geradora da drenagem ácida, essas estruturas diminuem a dependência de tratamentos externos e contribuem para o fechamento ambiental de áreas mineradas com menor custo operacional.

Entre os materiais empregados nas camadas reativas, destacam-se a cal e o calcário (MURTA; LEITE; LIMA, 2008). Materiais como escória de aciaria e cinzas industriais também vêm sendo utilizados em estudos recentes (ABREU *et al.*, 2012; ALMEIDA, 2016). Yanful et al. (1999) reforçam que o desempenho de longo prazo depende da interação entre propriedades físicas e reações geoquímicas, uma vez que a dissolução contínua dos compostos alcalinos mantém o pH e reduz a mobilidade de metais.

A eficiência do sistema está associada a um conjunto de fatores interdependentes, que envolvem tanto as propriedades físico-químicas dos materiais, quanto as condições ambientais externas. Entre os aspectos físicos, destacam-se a compactação e a granulometria dos materiais empregados, que influenciam diretamente a permeabilidade e a capacidade de retenção de água (MEND PROGRAM, 2009). Modelagens numéricas realizadas por Yanful (2006) demonstraram que pequenas variações no grau de compactação ou na umidade das camadas podem alterar significativamente o fluxo de oxigênio e o balanço hídrico da

cobertura, afetando seu desempenho a longo prazo. Conforme O'Kane et al. (2002), a compactação adequada e o uso de materiais finos com capacidade de tamponamento, como argilas e resíduos industriais alcalinos, a exemplo da escória de aciaria, favorecem a manutenção da umidade e contribuem para o controle do pH.

Por outro lado, camadas excessivamente porosas ou mal compactadas podem aumentar a infiltração e o fluxo de oxigênio, favorecendo a oxidação dos sulfetos e comprometendo a eficácia da barreira (MEND PROGRAM, 2009). A continuidade dessas reações pode resultar na formação de sulfatos e outros minerais secundários, indicativos de instabilidade geoquímica e perda de capacidade neutralizante (INAP, 2021).

As condições climáticas também exercem influência significativa: a distribuição de chuvas, taxas de evaporação e variações sazonais de umidade afetam o transporte de soluções e o desempenho hidráulico das camadas (INAP, 2021; MEND PROGRAM, 2009). Em regiões semiáridas ou com elevada amplitude térmica, são necessários ajustes na espessura e no controle de compactação para garantir a durabilidade da neutralização (MEND PROGRAM, 2009). Além disso, a heterogeneidade dos materiais de base, entendida como a variação nas propriedades físicas, químicas e mineralógicas do solo ou rejeito que sustenta a cobertura, influencia o equilíbrio geoquímico e a eficiência da neutralização, tornando necessário o monitoramento contínuo das condições químicas e mineralógicas (INAP, 2021; SRACEK *et al.*, 2004).

2.3.3 Comparação com outras técnicas

Em comparação com outras abordagens de controle da drenagem ácida, como as coberturas úmidas (inundação) e os tratamentos químicos ativos, as coberturas secas apresentam vantagens operacionais, mas também limitações de projeto e desempenho.

Os tratamentos ativos baseiam-se na adição contínua de reagentes alcalinos, como cal ou hidróxido de sódio, para neutralizar a acidez e precipitar metais. Embora eficazes, exigem operação permanente, alto custo e monitoramento constante, sendo mais indicados para o tratamento de efluentes já formados (MEND PROGRAM, 2009; RUBIO; SILVA, 2009).

As coberturas úmidas, baseadas na submersão dos rejeitos, são eficazes na inibição da oxidação por restringirem a difusão do oxigênio na coluna d'água e por manterem um ambiente geoquimicamente estável (MEND PROGRAM, 2009; YANFUL, 2006). No entanto, conforme destacam (BORMA; SOARES, 2002), sua aplicação depende de condições hidrológicas favoráveis, podendo ser inviável em regiões com déficit hídrico, elevados custos de contenção e condições construtivas proibitivas.

As coberturas secas, por sua vez, apresentam boa viabilidade de longo prazo e baixa demanda operacional quando bem projetadas. Contudo, a eficácia depende de dimensionamento adequado e da integração a outras medidas preventivas, com controle de compactação, espessura e balanço hídrico (BORMA; SOARES, 2002). Em relação à dessaturação e à difusão de oxigênio, camadas com alta saturação e baixa permeabilidade reduzem significativamente o fluxo de O_2 (YANFUL, 1993; YANFUL et al., 1999).

2.3.4 Estudos de caso na literatura

Na literatura encontram-se diferentes exemplos da aplicação de materiais alcalinos em coberturas secas para prevenção da drenagem ácida. Park *et al.* (2019) relatam experiências em que cal e calcário foram empregados sobre rejeitos sulfetados para neutralizar o meio e reduzir a oxidação. O relatório MEND Program (2009), no Canadá, descreve casos de campo em que coberturas de calcário e escórias industriais foram utilizadas com sucesso em pilhas de estéril e barragens de rejeito, atuando como barreiras físico-químicas. Em escala experimental, Butar *et al.* (2025) estudaram na Suécia a aplicação de solução silicatada alcalina em rocha estéril piritosa, verificando a formação de uma camada passiva que reduziu a liberação de metais.

No Brasil, Almeida (2016) analisou a viabilidade do uso de escórias de aciaria em coberturas secas alcalinas, destacando seu potencial de neutralização e aplicação em rejeitos de mineração. De forma semelhante, Murta, Leite e Lima (2008) avaliaram, em colunas de lixiviação, coberturas compostas por solo laterítico, cal hidratada e dolomita, verificando aumento do pH e redução da acidez em pilhas de estéril da mina

Osamu Utsumi (MG), o que confirma a eficiência dessas misturas alcalinas na mitigação da drenagem ácida.

2.4 Caracterização Geotécnica de Materiais para Cobertura

A caracterização geotécnica e físico-química de materiais empregados em coberturas secas permite compreender o comportamento do sistema frente à infiltração, à retenção de umidade e à reatividade química.

Corrêa et al. (2010) ressaltam que o conhecimento das propriedades físicas e hidráulicas do solo é essencial para o projeto de camadas capazes de manter elevado grau de saturação e restringir a percolação. Os ensaios geotécnicos possibilitam determinar parâmetros como granulometria, limites de Atterberg, limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP), massa específica dos grãos (GS), densidade seca máxima, umidade ótima e condutividade hidráulica, os quais orientam o controle da compactação e a avaliação do comportamento hidráulico (SOARES et al., 2010). A interpretação desses parâmetros é fundamental para avaliar o desempenho do solo compactado, pois valores adequados de plasticidade e condutividade hidráulica reduzida limitam a difusão de oxigênio e a oxidação de sulfetos, favorecendo a estabilidade geoquímica (INAP, 2021; PARK et al., 2019; YANFUL et al., 1999).

Os ensaios laboratoriais seguem procedimentos padronizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), destacando-se: NBR 7181:2016 (Análise granulométrica de solos), NBR 6459:2016 e NBR 7180:2016 (Limites de liquidez e plasticidade), NBR 6458:2016 (Massa específica dos grãos), NBR 7182:2016 (Ensaio de compactação) e NBR 14545:2021 (Coeficiente de permeabilidade de solos argilosos – método da carga variável). O uso dessas normas garante a comparabilidade e a reprodutibilidade dos resultados, permitindo avaliar o potencial de cada material para uso em camadas de cobertura (CORRÊA et al., 2010; SOARES et al., 2010).

A caracterização físico-química complementa a avaliação geotécnica ao permitir analisar a resposta do material às reações de oxidação e neutralização. São usualmente determinados o pH, o potencial redox (Eh) e a condutividade elétrica (CE), parâmetros que indicam a eficiência da cobertura na mitigação da drenagem ácida e na manutenção do equilíbrio geoquímico (INAP, 2021; MEND PROGRAM, 2009). A

integração entre as propriedades físicas e químicas é determinante para o dimensionamento de coberturas estáveis, capazes de reduzir a percolação, limitar a oxidação dos sulfetos e garantir o desempenho de longo prazo (INAP, 2021; MEND PROGRAM, 2009).

3 METODOLOGIA

Os métodos adotados no presente trabalho e sua sequência de aplicação são ilustrados no fluxograma da Figura 3.

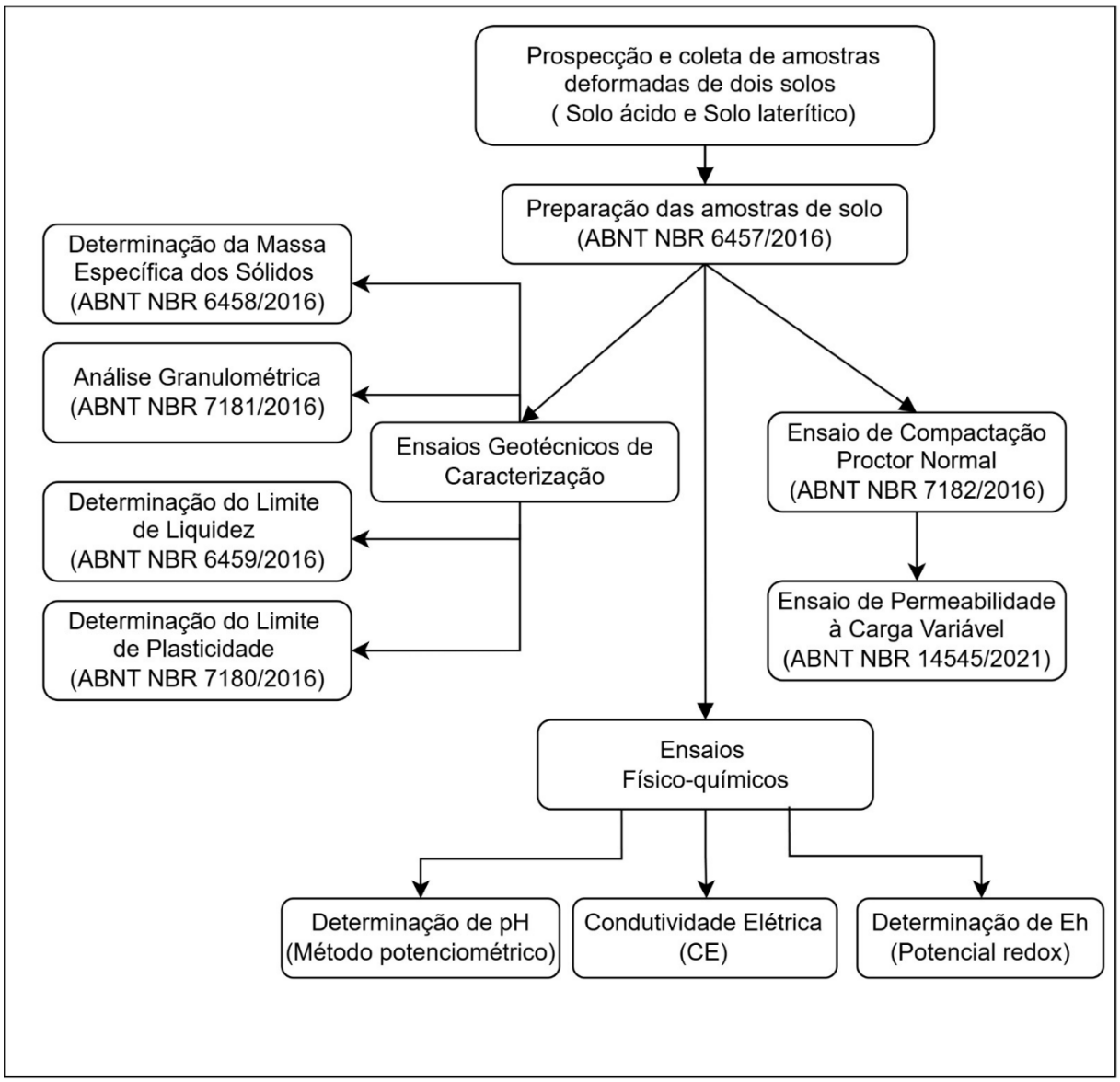


Figura 3 - Fluxograma da metodologia adotada

Fonte: Autoria própria.

3.1 Área de estudo, locais de coleta e materiais

A amostra de solo ácido foi coletada em uma antiga mina de pirita localizada em Ouro Preto (MG), atualmente afetada por intenso processo erosivo. Para servir como

substrato da cobertura alcalina, foi coletada uma amostra de um solo laterítico proveniente do Distrito de Antônio Pereira, também pertencente a Ouro Preto.

A escolha desses materiais está associada à proposta de avaliar preliminarmente a eficiência de coberturas secas alcalinas aplicadas sobre material com potencial ácido. A seguir, são detalhados os procedimentos de coleta e o tratamento adotado para a preparação das amostras.

3.1.1 Mina de Pirita

O solo ácido utilizado neste estudo foi coletado na área da antiga exploração de pirita. A localização da área de coleta é apresentada na Figura 4.

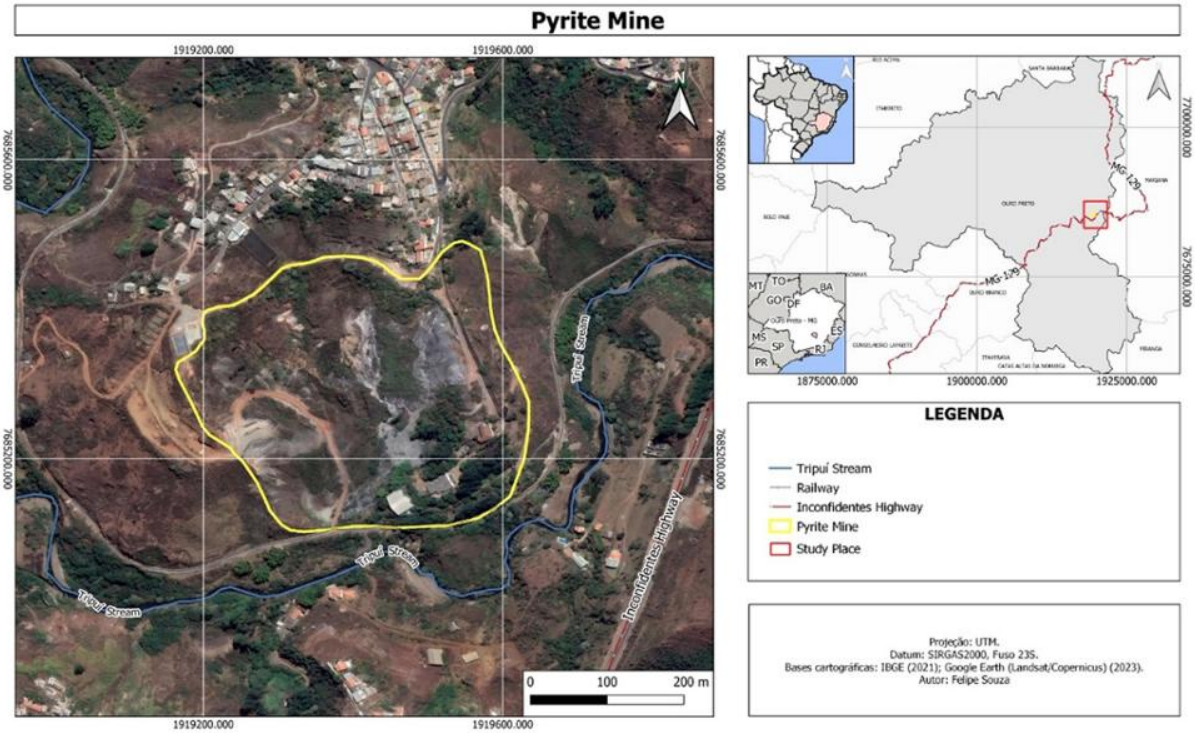


Figura 4 - Localização da área de estudo
Fonte: LEITE e SOUZA (2024).

Segundo Moraes (2010), a Mina de Pirita foi explorada entre a década de 1930 e o início da década de 1960, período em que a pirita (FeS_2) era extraída para a produção de ácido sulfúrico. Após o encerramento das atividades minerárias, a área foi abandonada.

Atualmente, essa área apresenta sérios problemas ambientais, como voçorocamento e escoamento de drenagem ácida em direção ao Ribeirão do Carmo, conforme já relatado por Souza e Costa (1994 apud ALMEIDA, 2016).

Em função dessas características, o material foi coletado na parte inferior da voçoroca que tomou conta da mina de pirita, nas cercanias da Casa de Reabilitação Lírios do Campo (material amarelado da Figura 5). Esse local apresenta elevado potencial de geração de acidez, típico de ambientes com presença significativa de sulfetos expostos às condições atmosféricas. Trata-se de um material representativo de ambientes associados à drenagem ácida de rocha, frequentemente utilizado em estudos voltados à avaliação de processos de acidificação e de técnicas de mitigação ambiental, o que justifica sua seleção para os ensaios realizados nesta pesquisa (MORAES, 2010).



Figura 5 – Local de coleta da amostra de solo ácido
Fonte: Autoria própria.

3.1.2 Solo laterítico

O material utilizado neste estudo foi coletado no distrito de Antônio Pereira, pertencente ao município de Ouro Preto (MG), e selecionado para avaliação da viabilidade de utilização como camada de cobertura nos ensaios realizados nesta pesquisa.

O material apresenta coloração vermelha intensa, característica comum em solos lateríticos desenvolvidos na região do Quadrilátero Ferrífero, associada à

presença de óxidos de ferro formados durante processos de intemperismo tropical (MAGALHÃES, 2022). No presente trabalho, esse material foi denominado solo laterítico.

A localização da área de estudo é apresentada na Figura 6, enquanto a Figura 7 mostra o ponto de coleta do material utilizado nos ensaios. Ambas as figuras mostram a coloração avermelhada que denota a maior concentração de ferro, típica de solos que experimentaram laterização avançada.

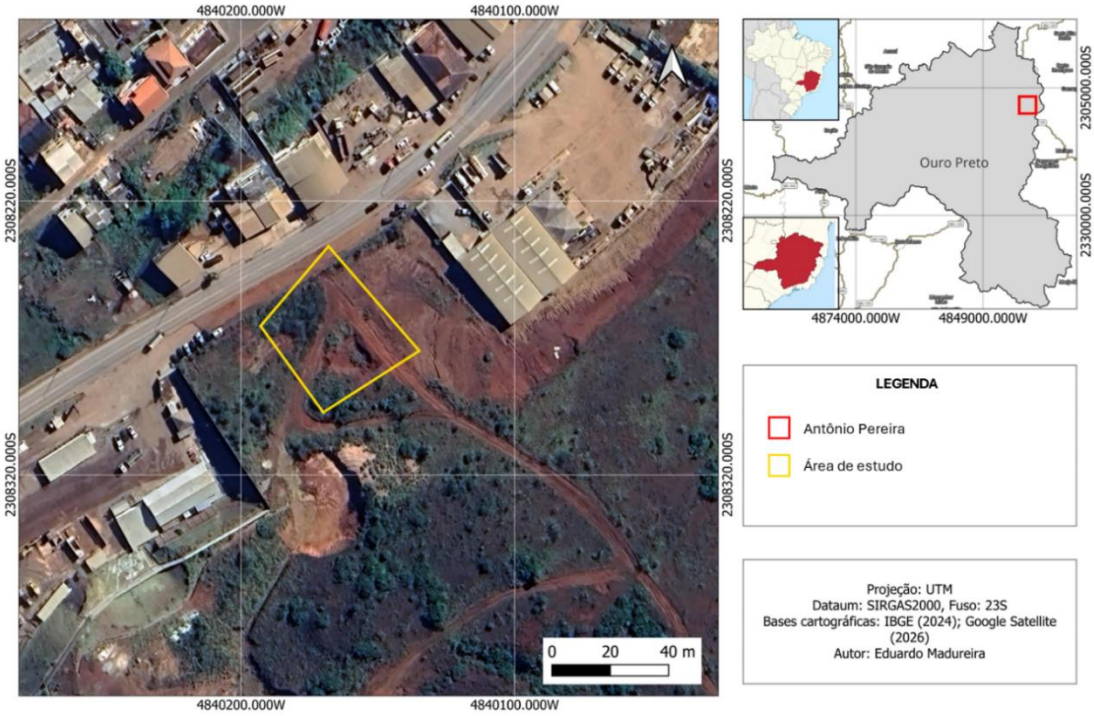


Figura 6 – Local de estudo do solo laterítico

Fonte: Autoria própria.



Figura 7 - Local de coleta do solo laterítico
Fonte: Autoria própria.

3.1.3 Procedimentos de coleta das amostras

As amostras da Mina de Pirita e do solo laterítico foram obtidas por meio de amostragem deformada manual, adotando-se procedimentos compatíveis com a preparação de materiais para ensaios geotécnicos, conforme orientações da ABNT NBR 6457:2016. A retirada do material foi realizada diretamente nos pontos previamente selecionados, utilizando-se ferramentas manuais, como pá e picareta, buscando-se obter amostras representativas das condições locais.

Após a coleta, o material foi acondicionado em sacos plásticos resistentes e transportado ao laboratório, onde foram conduzidas as etapas subsequentes de preparação das amostras e realização dos ensaios previstos neste estudo.

3.2 Preparação dos solos para os ensaios laboratoriais

A preparação dos solos coletados foi realizada conforme as referências normativas aplicáveis, sintetizadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Referências normativas utilizadas na preparação dos solos

Etapa / Ensaio	Norma(s) técnica(s)
Preparação para ensaios de caracterização geotécnica e compactação Proctor Normal	ABNT NBR 6457:2016
Preparação para ensaio de permeabilidade à carga variável	ABNT NBR 6457:2016; ABNT NBR 14545:2021
Peneiras utilizadas nos ensaios laboratoriais	ABNT NBR NM ISO 3310-1:2010;

Na etapa de preparação, as amostras da Mina de Pirita e do solo laterítico foram inicialmente submetidas à secagem ao ar, em temperatura ambiente, até a obtenção da umidade higroscópica (Figura 8).



Figura 8 – Amostra de solo ácido em processo de secagem
Fonte: Autoria própria.

Em seguida, realizou-se o quarteamento do material seco, com o objetivo de obter porções representativas para as análises previstas (Figura 9). Posteriormente, as frações destinadas à caracterização geotécnica e físico-química foram submetidas

ao destorroamento manual, de forma a preservar as características naturais dos grãos, conforme orientações da ABNT NBR 6457:2016. As amostras assim preparadas foram então utilizadas nas etapas experimentais descritas nas seções subsequentes.



Figura 9 – Quarteamento dos solos amostra de solo ácido (a) e laterítico (b)
Fonte: Autoria própria.

Durante a execução dos ensaios de caracterização geotécnica e de compactação, foi necessária, em diferentes etapas, a determinação do teor de umidade das amostras. Essa determinação foi realizada conforme os procedimentos prescritos no Anexo A da ABNT NBR 6457:2016. Adicionalmente, foi utilizado um determinador de umidade elétrico portátil, ilustrado na Figura 10, empregado como método auxiliar para o controle do teor de umidade das amostras ao longo das análises.



Figura 10 – Equipamento de determinação de umidade
Fonte: Autoria própria.

3.3 Caracterização geotécnica dos solos

3.3.1 Determinação da massa específica dos sólidos (Gs)

A determinação da massa específica dos sólidos (Gs) foi realizada conforme a ABNT NBR 6458/2016, com o objetivo de determinar a relação entre a massa e o volume das partículas sólidas constituintes dos solos analisados. O procedimento foi executado utilizando-se material previamente preparado e passante na peneira de abertura 4,8 mm, conforme prescrito na referida norma.

Para cada solo (solo ácido e solo laterítico), foram realizadas três determinações em picnômetros, com aplicação de vácuo para eliminação de ar aprisionado na água destilada. Adotou-se como valor representativo a média dos resultados obtidos, desde que a diferença entre as determinações não excedesse 0,02 g/cm³, conforme estabelecido em norma.



Figura 11 - Determinação da massa específica dos sólidos (Gs) em picnômetro: (a) amostra de solo ácido; (b) solo laterítico

Fonte: Autoria própria.

3.3.2 Análise Granulométrica

O ensaio de análise granulométrica foi realizado conforme a ABNT NBR 7181, com a finalidade de caracterizar a distribuição do tamanho das partículas dos materiais e fornecer subsídios à interpretação de seu comportamento geotécnico. A distribuição granulométrica constitui parâmetro fundamental na avaliação de propriedades como permeabilidade, retenção de água e organização estrutural do solo, aspectos diretamente relacionados ao desempenho dos materiais como camada de cobertura (DAS; SOBHAN, 2014).

A determinação da granulometria foi conduzida por meio de análise conjunta, envolvendo peneiramento (Figura 12) e sedimentação (Figura 13, Figura 14 e Figura 15), de modo a abranger tanto as frações grossas quanto os finos presentes nos solos.

Na etapa de sedimentação, empregou-se hexametafosfato de sódio como agente defloculante, visando à adequada dispersão das partículas finas e a obtenção de resultados mais representativos da fração argilosa e silto-argilosa. Os ensaios foram realizados em duplicata para cada material, adotando-se a média dos valores como representativa.

A partir das porcentagens retidas e passantes e da fração obtida por sedimentação, foram traçadas as curvas granulométricas.



Figura 12 - Ensaio de granulometria dos solos amostra de solo ácido (a) e laterítico (b)

Fonte: Autoria própria.



Figura 13 – Solo ácido com e sem defloculante para o ensaio de sedimentação

Fonte: Autoria própria.

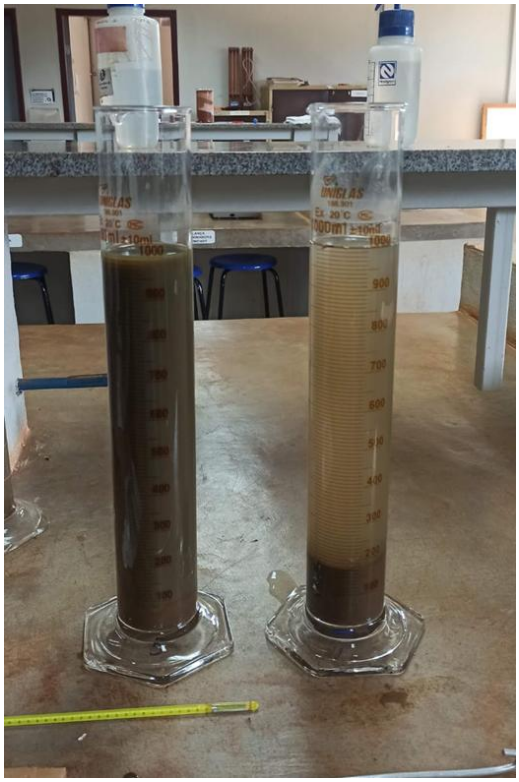


Figura 14 - Ensaio de sedimentação da amostra de solo ácido

Fonte: Autoria própria.



Figura 15 - Ensaio de sedimentação do solo laterítico

Fonte: Autoria própria.

3.3.3 Ensaio de Determinação do Limite de Liquidez

O ensaio de determinação do limite de liquidez (LL) foi realizado conforme a ABNT NBR 6459, com a finalidade de determinar o teor de umidade correspondente à transição do solo do estado plástico para o estado líquido, constituindo parâmetro fundamental na avaliação da consistência dos materiais finos. O limite de liquidez está associado à plasticidade e à capacidade de retenção de água do solo, refletindo a interação entre as partículas finas e a água presente no sistema.

Para ambos os materiais analisados (solo ácido e solo laterítico), o ensaio foi conduzido com material previamente preparado e passante na peneira de abertura 0,425 mm (nº 40), conforme prescrito na norma. O valor adotado para cada solo corresponde à média das determinações obtidas.



Figura 16 - Ensaio limite de liquidez dos solos lateríticos (a) e amostra de solo ácido (b)
Fonte: Autoria própria.

3.3.4 Ensaio de Determinação do Limite de Plasticidade

O ensaio de determinação do limite de plasticidade (LP) foi realizado conforme a ABNT NBR 7180, com a finalidade de determinar o teor de umidade correspondente à transição do solo do estado semissólido para o estado plástico. Esse parâmetro complementa a caracterização da consistência dos materiais finos, permitindo avaliar sua plasticidade e comportamento frente à variação de umidade.

Para ambos os materiais analisados (solo ácido e solo laterítico), o ensaio foi conduzido utilizando-se a fração previamente preparada e passante na peneira de

abertura 0,425 mm (nº 40), conforme prescrito na norma. O valor representativo adotado corresponde à média das determinações obtidas.



Figura 17 - Ensaio limite de plasticidade da amostra de solo ácido

Fonte: Autoria própria.

3.3.5 Ensaio de Compactação Proctor

O ensaio de compactação Proctor Normal foi realizado conforme a ABNT NBR 7182, visando à determinação da relação entre o teor de umidade e a massa específica seca dos solos analisados, bem como da umidade ótima de compactação e da respectiva massa específica seca máxima. Os parâmetros obtidos foram utilizados na avaliação do comportamento dos materiais sob compactação.

A compactação foi conduzida sob energia Proctor Normal, utilizando-se material previamente preparado e ajustado a diferentes teores de umidade, de modo a abranger os ramos seco e úmido da curva de compactação, como ilustram as figuras

Figura 18 e Figura 19. Para cada material (amostra de solo ácido e solo laterítico), foram moldados corpos de prova independentes, sem reaproveitamento de material entre os pontos ensaiados. A partir dos resultados, foram traçadas as curvas de compactação, permitindo a determinação dos parâmetros característicos de cada solo.



Figura 18 - Ensaio Proctor da amostra de solo ácido

Fonte: Autoria própria.



Figura 19 - Ensaio Proctor do solo laterítico

Fonte: Autoria própria.

3.3.6 Ensaio de Determinação do Coeficiente de Permeabilidade

O ensaio de determinação do coeficiente de permeabilidade foi realizado conforme a ABNT NBR 14545/2021, utilizando-se o método de carga variável por se tratar de materiais com alto teor de finos. O ensaio teve como objetivo determinar a condutividade hidráulica dos solos compactados, parâmetro fundamental para a avaliação do comportamento dos materiais quanto à passagem de fluxo de água e ao seu desempenho em aplicações geotécnicas.

Os corpos de prova foram moldados a partir dos materiais previamente compactados no teor de umidade ótima, sob energia Proctor Normal. Após a moldagem, os corpos de prova foram submetidos à saturação e ensaiados em permeâmetro de carga variável (Figura 21), assegurando-se condições adequadas de fluxo através do solo.

A partir das leituras de carga hidráulica ao longo do tempo foi determinada a condutividade hidráulica, posteriormente corrigida para a temperatura de referência de 20°C.

Para a amostra de solo ácido, em função da baixa permeabilidade e da elevada duração prevista para o ensaio convencional, adotou-se adaptação experimental utilizando corpo de prova moldado em anel de adensamento, submetido ao método de carga variável (Figura 20). A adaptação teve como finalidade viabilizar a determinação da condutividade hidráulica do material, mantendo condições compatíveis com o comportamento hidráulico esperado.



Figura 20 – Ensaio de permeabilidade da amostra de solo ácido
Fonte: Autoria própria.



Figura 21 – Ensaio de permeabilidade do solo laterítico

Fonte: Autoria própria.

3.4 Caracterização Físico-Química dos Solos

3.4.1 Determinação do pH

A determinação do pH foi realizada por método potenciométrico, empregando aproximadamente 10 g de solo seco e 25 mL de água destilada, correspondendo à proporção 1:2,5 (m/v), conforme procedimentos descritos na literatura (CAMARGO et al., 2009). A suspensão foi submetida à agitação magnética por 5 minutos e mantida em repouso por cerca de 10 minutos para estabilização antes da leitura. O ensaio tem por finalidade avaliar a atividade dos íons hidrogênio (H^+) na fase líquida em equilíbrio com a matriz sólida, constituindo parâmetro indicativo das condições químicas do solo.

As medições foram realizadas com pHmetro digital Digimed DM-22 (Figura 22 e Figura 23), previamente calibrado com soluções tampão padrão (pH 4,0; 7,0 e 10,0), assegurando a confiabilidade das leituras, realizadas à temperatura ambiente (aproximadamente 20 °C).

Para cada material (solo ácido e solo laterítico), as determinações foram executadas em triplicata, sendo adotada como valor representativo a média aritmética das leituras obtidas.



Figura 22 – pH amostra de solo ácido

Fonte: Autoria própria.



Figura 23 - pH solo laterítico

Fonte: Autoria própria.

3.4.2 Determinação do Potencial de Oxirredução (Eh)

O potencial de oxirredução (Eh) foi determinado por método potenciométrico, utilizando eletrodo combinado de ORP acoplado a medidor portátil modelo HI98190 (Hanna Instruments), conforme a Figura 24. As medições foram realizadas em suspensão solo:água, nas mesmas condições adotadas para a determinação do pH.

O ensaio tem por finalidade avaliar a tendência do sistema em atuar como meio oxidante ou redutor, a partir da diferença de potencial elétrico gerada pelas reações de transferência de elétrons presentes na suspensão, constituindo indicador das condições redox do meio.

Para cada material (solo ácido e solo laterítico), as determinações foram realizadas em triplicata, sendo adotada como valor representativo a média das leituras obtidas.

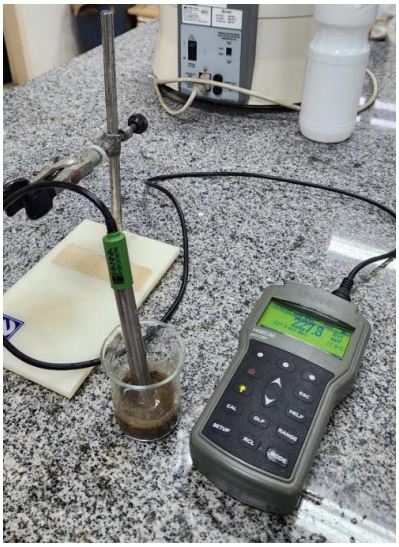


Figura 24 – Determinação de Eh do solo ácido
Fonte: Autoria própria.

3.4.3 Determinação da Condutividade Elétrica e Temperatura

A condutividade elétrica (CE) das amostras foi determinada por meio de mistura solo-água. Para cada ensaio, aproximadamente 10 g de solo seco foram pesados e misturados a 75 mL de água destilada. Em seguida, a mistura foi agitada em agitador magnético durante 5 minutos e mantida em repouso por 10 minutos para sedimentação parcial das partículas sólidas.

Após esse procedimento, as leituras foram realizadas utilizando um condutivímetro Digimed DM-32 previamente calibrado. Para cada amostra foram efetuadas três leituras consecutivas de condutividade elétrica, sendo adotada a média aritmética dos valores obtidos como resultado representativo.



Figura 25 – Condutividade elétrica do solo ácido

Fonte: Autoria própria.



Figura 26 – Condutividade elétrica do solo laterítico

Fonte: Autoria própria

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios de caracterização geotécnica e físico-química realizados com o solo ácido e com o solo laterítico, com foco na avaliação preliminar da adequabilidade desses materiais para aplicação em cobertura alcalina sobre solo ácido.

4.1 Ensaios de Caracterização Física dos Materiais

4.1.1 Determinação da Massa Específica dos Sólidos

Tabela 5 - Resultados obtidos para a massa específica dos sólidos dos solos

Amostra	ρs (g/cm³)
Solo laterítico vermelho	3,006
Amostra de solo ácido	2,794

Fonte: Autoria própria.

Os resultados de massa específica dos sólidos indicaram valores de 3,006 g/cm³ para o solo laterítico vermelho e de 2,794 g/cm³ para a Amostra de solo ácido. A maioria dos solos apresenta valores de Gs entre 2,6 e 2,9, sendo aproximadamente 2,65 para areias quartzosas e entre 2,6 e 2,9 para solos com frações de silte e argila (DAS; SOBHAN, 2014). Almeida (2005) acrescenta que a densidade dos grãos depende principalmente dos constituintes mineralógicos, sendo os menores valores associados a materiais com maior teor de matéria orgânica e os maiores à presença de óxidos de ferro. Assim, o valor da Amostra de solo ácido encontra-se dentro da faixa usual para solos minerais. Já o solo laterítico apresentou valor superior ao intervalo indicado para solos comuns. Segundo Pinto (2006), os solos lateríticos apresentam elevada concentração de ferro e alumínio na forma de óxidos e hidróxidos. Dessa forma, o maior valor do solo laterítico vermelho é compatível com a natureza desse material.

4.1.2 Análise Granulométrica

As curvas granulométricas da Amostra de solo ácido são apresentadas na Figura 27**.** A curva em azul refere-se ao ensaio com adição de defloculante, enquanto a curva em preto refere-se ao ensaio sem defloculante. A comparação entre os dois ensaios permitiu avaliar a influência da dispersão das partículas finas na distribuição granulométrica do material. Observa-se diferença considerável entre as curvas, sobretudo nas frações mais finas, indicando que a ausência de defloculante favorece a aglomeração dessas partículas e altera a distribuição granulométrica aparente da amostra. Assim, os resultados obtidos com defloculante foram considerados mais representativos, uma vez que o agente dispersante favorece a individualização das partículas finas e reduz a interferência da aglomeração na curva granulométrica.

Na Figura 27, as faixas destacadas no gráfico representam a transição entre as frações granulométricas de argila, silte, areia e pedregulho. No intervalo correspondente à fração areia, também são indicadas as subdivisões em areia fina, média e grossa. As frações granulométricas foram definidas de acordo com a ABNT NBR 6502/2022, sendo apresentadas na Tabela 6 (com defloculante) e na Tabela 7 (sem defloculante).

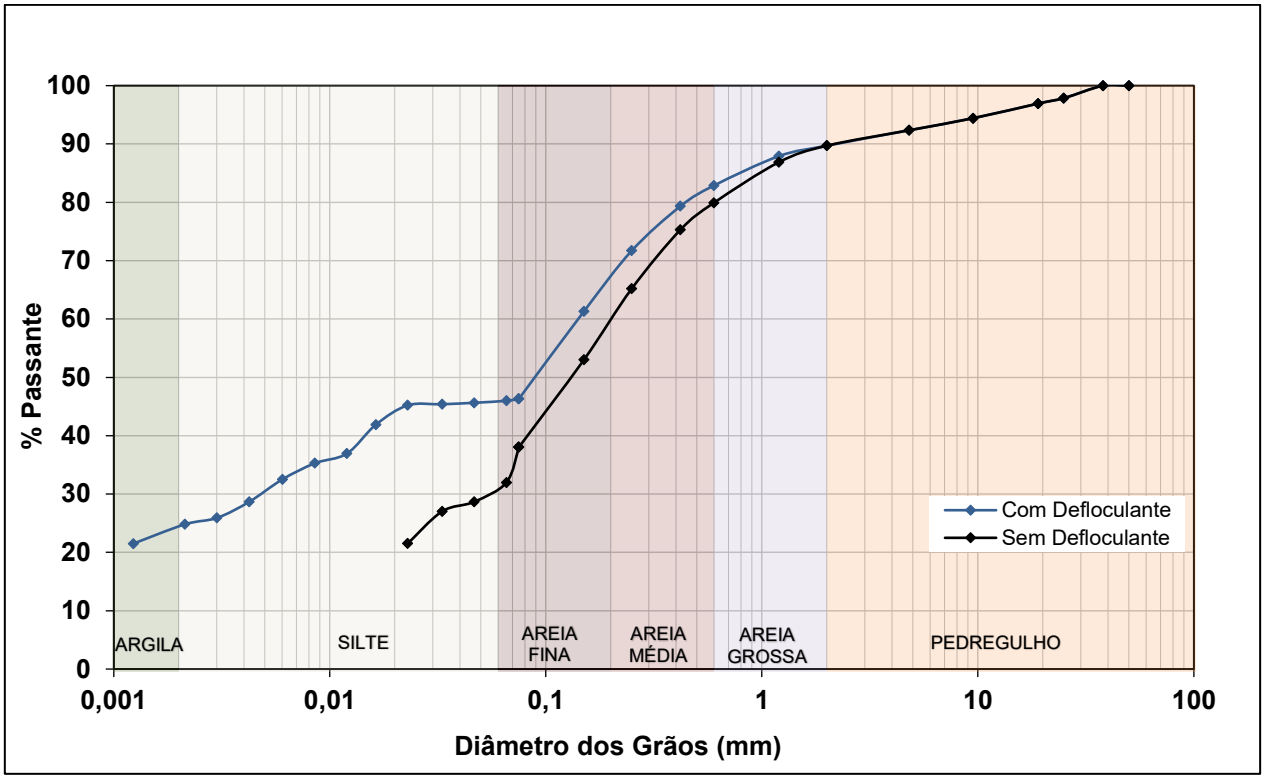


Figura 27 – Curvas granulométricas obtidas para a Amostra de solo ácido, através dos ensaios de análise granulométrica conjunta, em que a fase de sedimentação foi realizada com a adição (azul) e sem a adição de hexametafosfato de sódio (preto)

Fonte: Autoria própria.

Tabela 6 – Frações granulométricas da Amostra de solo ácido, extraídas a partir da curva granulométrica obtida pelo ensaio de análise granulométrica conjunta, cuja fase de sedimentação foi realizada com a adição de hexametafosfato de sódio

Frações Granulométricas - ABNT 6502/2022		**Limite Inferior**	**Limite Superior**	**% Solo Analisado**
Pedregulho	Grosso	20,0 mm	60,0 mm	3%
	Médio	6,0 mm	20,0 mm	4%
	Fino	2,0 mm	6,0 mm	3,0%
Areia	Grossa	0,60 mm	2,0 mm	7,0%
	Média	0,20 mm	0,60 mm	16,0%
	Fina	0,06 mm	0,20 mm	21,0%
Silte		0,002 mm	0,06 mm	21,0%
Argila		<	0,002 mm	25,0%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7 – Frações granulométricas da Amostra de solo ácido extraídas a partir da curva granulométrica obtida pelo ensaio de análise granulométrica conjunta, cuja fase de sedimentação foi realizada sem a adição de hexametafosfato de sódio

Frações Granulométricas - ABNT 6502/2022		Limite Inferior	Limite Superior	% Solo Analisado
Pedregulho	Grosso	20,0 mm	60,0 mm	3%
	Médio	6,0 mm	20,0 mm	4%
	Fino	2,0 mm	6,0 mm	4,0%
Areia	Grossa	0,60 mm	2,0 mm	9,0%
	Média	0,20 mm	0,60 mm	20,5%
	Fina	0,06 mm	0,20 mm	28,5%
Silte		0,002 mm	0,06 mm	31,0%
Argila		<	0,002 mm	0,0%

Fonte: Autoria própria.

Como esperado, no ensaio sem defloculante, a Amostra de solo ácido apresentou redução da fração argila e aumento das frações areia e silte. Com o uso de defloculante, a fração argila (25%) tornou-se a de maior participação individual, seguida pelo silte (21%), enquanto as frações grossas (areia e pedregulho) somaram 54% do material.

As curvas granulométricas do solo laterítico são apresentadas na Figura 28. A curva em azul refere-se ao ensaio com adição de defloculante, enquanto a curva em preto refere-se ao ensaio sem defloculante.

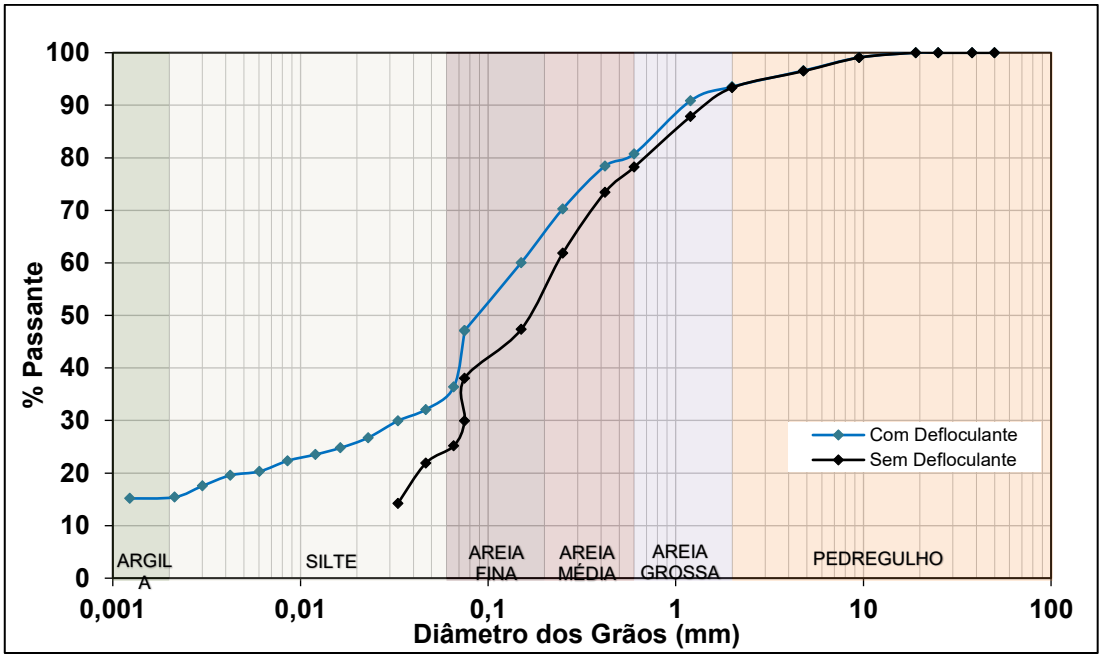


Figura 28 – Curvas granulométricas obtidas para solo laterítico, através dos ensaios de análise granulométrica conjunta, em que a fase de sedimentação foi realizada com a adição (azul) e sem a adição de hexametafosfato de sódio (preto)

Fonte: Autoria própria.

As frações granulométricas do solo laterítico vermelho com defloculante são apresentadas na Tabela 8 e, sem defloculante, na Tabela 9.

Tabela 8 – Frações granulométricas do solo laterítico vermelho, extraídas a partir da curva granulométrica obtida pelo ensaio de análise granulométrica conjunta, cuja fase de sedimentação foi realizada com a adição de hexametafosfato de sódio

Frações Granulométricas - ABNT 6502/2022		Limite Inferior	Limite Superior	% Solo Analisado
Pedregulho	Grosso	20,0 mm	60,0 mm	0,0%
	Médio	6,0 mm	20,0 mm	3,0%
	Fino	2,0 mm	6,0 mm	3,0%
Areia	Grossa	0,60 mm	2,0 mm	14,0%
	Média	0,20 mm	0,60 mm	15,0%
	Fina	0,06 mm	0,20 mm	30,0%
Silte		0,002 mm	0,06 mm	20,0%
Argila		<	0,002 mm	15,0%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 9 – Frações granulométricas do solo laterítico vermelho, extraídas a partir da curva granulométrica obtida pelo ensaio de análise granulométrica conjunta, cuja fase de sedimentação foi realizada sem a adição de hexametafosfato de sódio

Frações Granulométricas - ABNT 6502/2022		Limite Inferior	Limite Superior	% Solo Analisado
Pedregulho	Grosso	20,0 mm	60,0 mm	0%
	Médio	6,0 mm	20,0 mm	3,0%
	Fino	2,0 mm	6,0 mm	2,0%
Areia	Grossa	0,60 mm	2,0 mm	17,0%
	Média	0,20 mm	0,60 mm	22,0%
	Fina	0,06 mm	0,20 mm	31,0%
Silte		0,002 mm	0,06 mm	25,0%
Argila		<	0,002 mm	0%

Fonte: Autoria própria.

Com o uso de defloculante, o solo laterítico apresentou predominância da fração areia, com participação das frações silte e argila. Já no ensaio sem defloculante, observou-se redução da fração argila e aumento das frações areia e silte. Assim, para a interpretação granulométrica do material, consideram-se os resultados obtidos com o uso de defloculante.

A fração fina (silte + argila) responde por 35% do solo laterítico, participação suficiente para conferir ao material capacidade de retenção de água e de manutenção de elevados graus de saturação após a compactação, ainda que a fração arenosa seja predominante (59%). Esse conteúdo de finos é relevante para o controle da drenagem ácida, pois a manutenção da camada próxima à saturação limita a difusão de oxigênio em direção ao material sulfetado (YANFUL et al., 1999).

Confrontados com os critérios granulométricos da literatura de coberturas secas, os resultados situam o solo laterítico em faixa favorável. O teor de argila de 15% alcança o limiar mínimo indicado por Aubertin et al. (1995) para a camada fina de retenção de umidade, e o teor de pedregulho, de cerca de 6%, permanece abaixo do limite de 10% proposto pelos mesmos autores. A predominância arenosa não descaracteriza o material para esse uso: Nicholson et al. (1989) admitem a presença de fração grossa desde que os finos sejam suficientes para preencher os vazios entre

as partículas maiores, condição coerente com a baixa condutividade hidráulica posteriormente obtida (item 4.2).

Tabela 10 - Comparativo da distribuição granulométrica do solo laterítico estudado com resultados de outros solos lateríticos de Minas Gerais

Estudo (local de coleta)	Argila	Silte	Areia	Pedregulho	Finos
Presente estudo (Antônio Pereira, Ouro Preto/MG)	15%	20%	59%	6%	35%
Morandini e Leite (2015), amostra SL (Antônio Pereira, Ouro Preto/MG)	29%	16%	54%	1%	45%
Carvalho (2017), amostra SL01 (Passagem de Mariana/MG)	17,9%	21,0%	55,0%	6,1%	38,9%

As diferenças observadas na distribuição granulométrica dos solos lateríticos comparados podem estar relacionadas, principalmente, à heterogeneidade natural dos perfis, às diferentes condições e posições de coleta e às particularidades dos procedimentos de preparação e dispersão adotados em cada estudo.

4.1.3 Limite de Liquidez

A reta de fluência do ensaio realizado para a Amostra de solo ácido encontra-se na Figura 29, incluindo a equação da reta ajustada e o coeficiente de determinação (R^2). A partir da reta traçada, o limite de liquidez da amostra foi determinado em 36,4%. Destaca-se o bom ajuste da reta de fluência, comprovado pelo valor de R^2 próximo de 1.

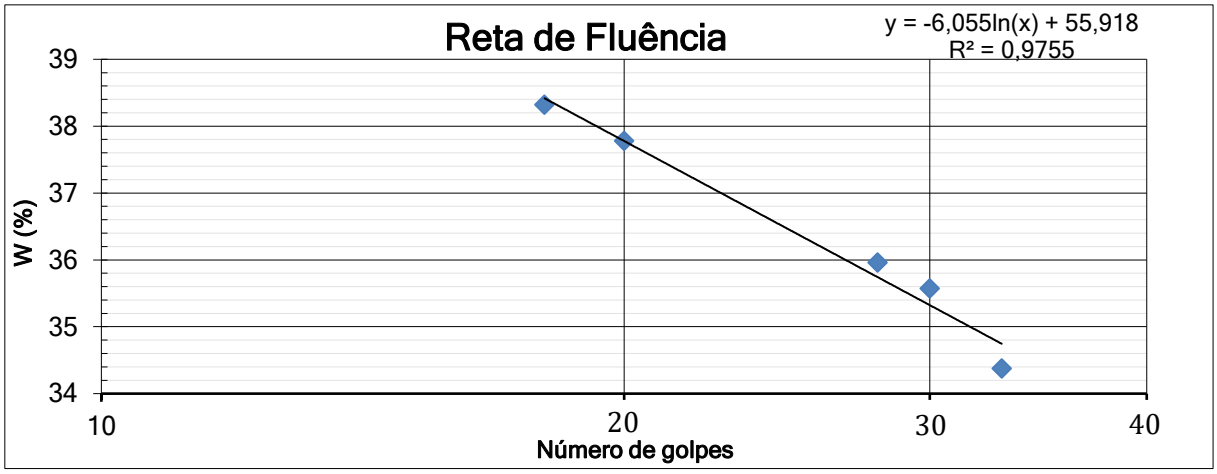


Figura 29 – Reta de fluência da Amostra de solo ácido, traçada a partir dos teores de umidade e do número de golpes necessários no ensaio de determinação do limite de liquidez

Fonte: Autoria própria.

A reta de fluência do ensaio realizado para o solo laterítico encontra-se na Figura 30, incluindo a equação da reta ajustada e o coeficiente de determinação (R^2). A partir da reta traçada, o limite de liquidez do solo foi determinado em 29,40%.

O valor obtido para o limite de liquidez deve ser interpretado em conjunto com os resultados de limite de plasticidade e índice de plasticidade, de modo a permitir melhor compreensão do comportamento de consistência do material.

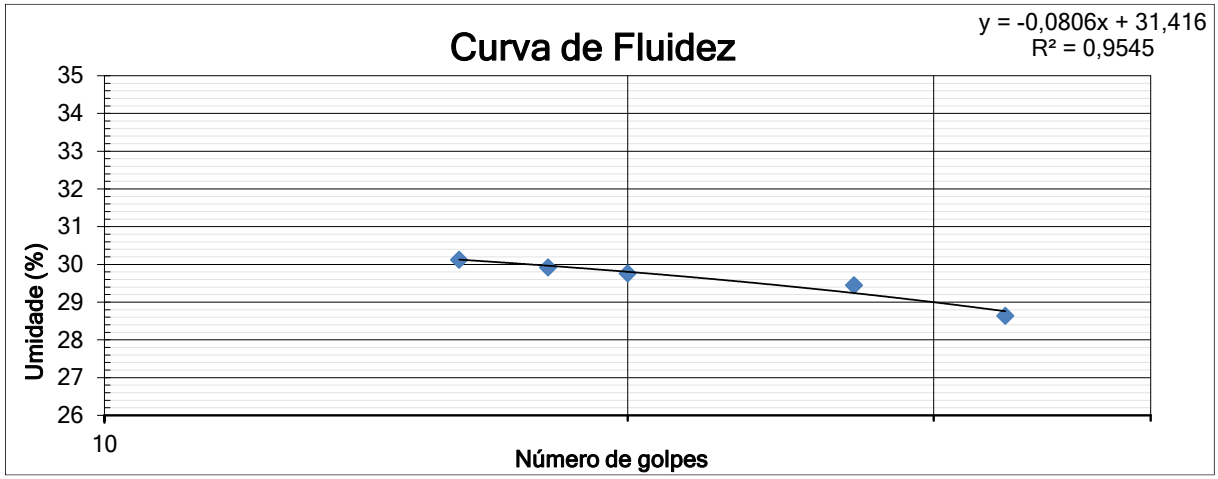


Figura 30 – Reta de fluência do solo laterítico, traçada a partir dos teores de umidade e do número de golpes necessários no ensaio de determinação do limite de liquidez

Fonte: Autoria própria.

4.1.4 Limite de Plasticidade

Obteve-se um limite de plasticidade para a Amostra de solo ácido igual a 26%. Em conjunto com o limite de liquidez de 36,4%, esse resultado conduz a um índice de plasticidade de aproximadamente 10,4%. Esses valores são próximos aos reportados por Almeida (2016) para a amostra AM2, proveniente do mesmo local de estudo, que apresentou LL de 39,3%, LP de 27,6% e IP de 11,7%, indicando coerência entre os resultados obtidos.

Considerando que a curva granulométrica com defloculante indicou teor de finos superior a 12%, empregou-se a Carta de Plasticidade de Casagrande para avaliar o comportamento plástico da fração fina e auxiliar na classificação do material segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), conforme apresentado na Figura 31.

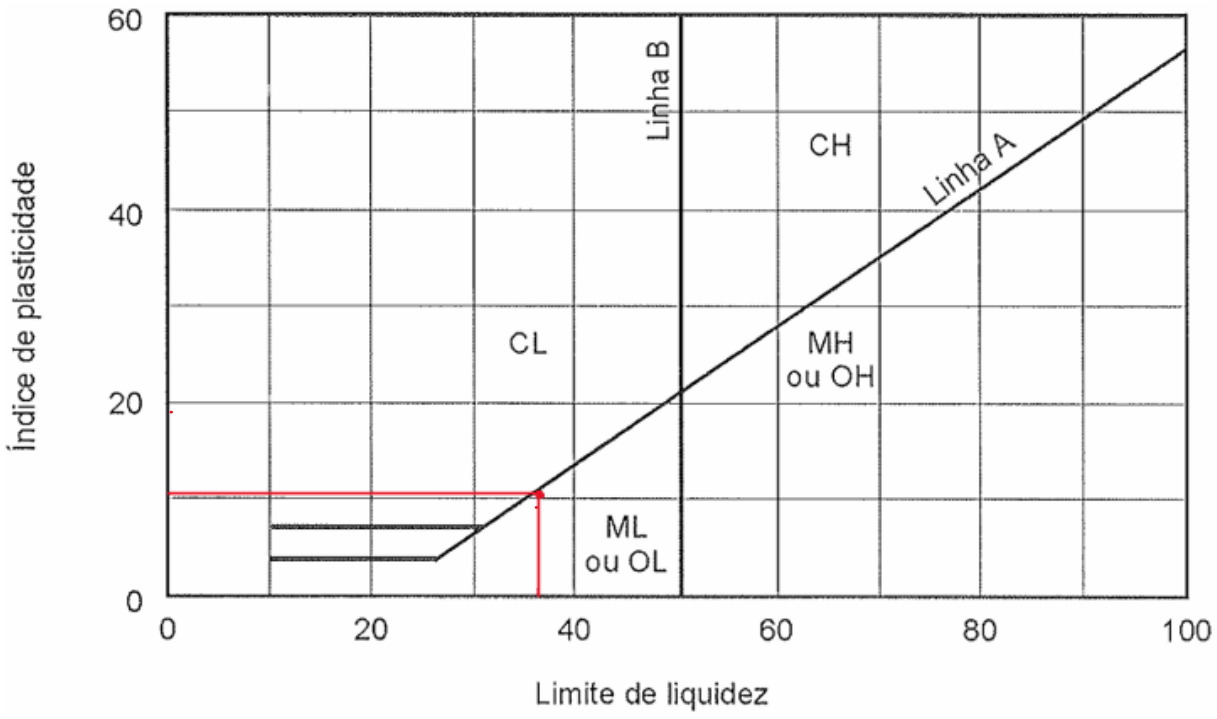


Figura 31 – Carta de Plasticidade de Casagrande para Amostra de solo ácido

Fonte: Autoria própria.

Nota: CL – argila de baixa plasticidade; CH – argila de alta plasticidade; ML – silte de baixa plasticidade; MH – silte de alta plasticidade; OL – solo orgânico de baixa plasticidade; OH – solo orgânico de alta plasticidade (SUCS); Linha A: separa argilas (acima) de siltes e solos orgânicos (abaixo); LL – limite de liquidez; IP – índice de plasticidade.

A classificação do material deve ser definida a partir da análise conjunta da granulometria e da posição do ponto na carta de plasticidade. Para os valores obtidos neste trabalho, o ponto correspondente situa-se abaixo da Linha A, caracterizando comportamento siltoso de baixa plasticidade (ML) para a fração fina da Amostra de solo ácido. Considerando ainda a predominância da fração arenosa na composição granulométrica, esse resultado permite classificar o material, segundo o SUCS, como areia siltosa (SM).

Para o solo laterítico, foram obtidos valores de limite de liquidez de 29,40% e limite de plasticidade de 23%, resultando em índice de plasticidade de 6,40%. Considerando esses parâmetros, utilizou-se a Carta de Plasticidade de Casagrande para avaliar o comportamento da fração fina do material e subsidiar sua classificação geotécnica, conforme apresentado na Figura 32.

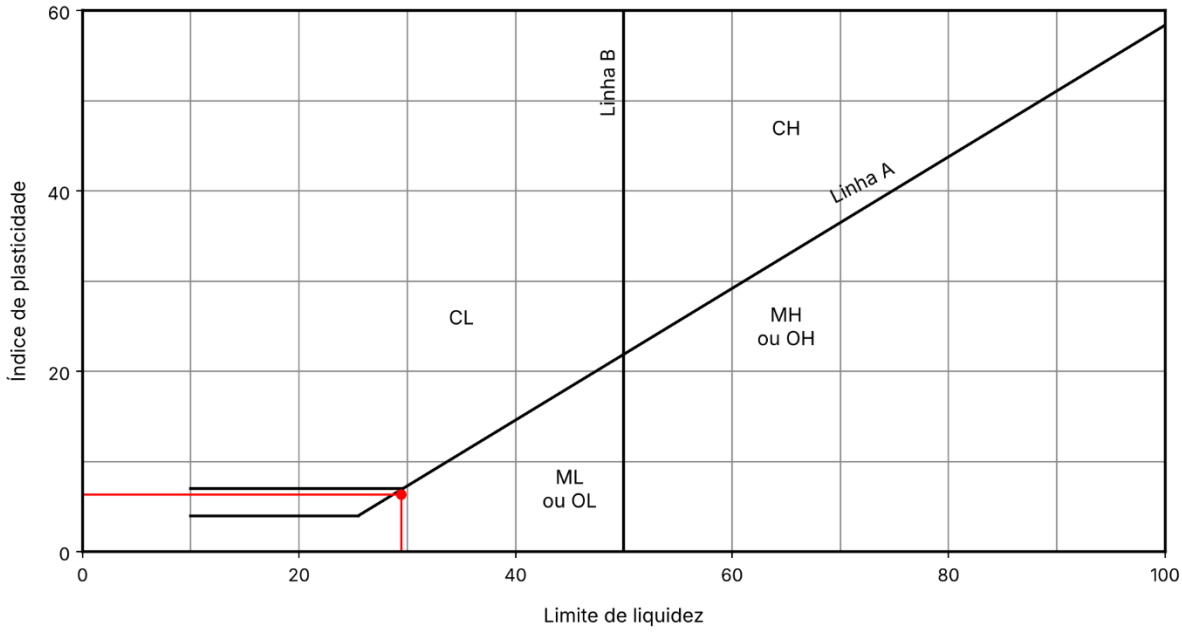


Figura 32 - Carta de Plasticidade de Casagrande para solo laterítico vermelho

Fonte: Autoria própria.

Nota: siglas conforme legenda da Figura 31.

A partir da posição do ponto correspondente na carta de plasticidade, observa-se que o material se situa ligeiramente abaixo da Linha A e fora da zona CL-ML, o que indica comportamento siltoso de baixa plasticidade (ML) para a fração fina. Considerando a predominância da fração arenosa (59%) e o teor de finos de 35%, o material é classificado, segundo o SUCS, como areia siltosa (SM).

Os valores obtidos indicam baixa plasticidade para a fração fina do solo laterítico. O limite de liquidez de 29,4% situa-se dentro da faixa de valores mínimos de 25% a 30% indicada por Aubertin et al. (1995) para a camada de material fino de coberturas secas. Entretanto, o índice de plasticidade de 6,4% encontra-se abaixo do mínimo de 10% a 20% recomendado pelos autores. Por outro lado, o IP obtido permanece bem abaixo da faixa de 30% a 40%, para a qual os autores apontam possíveis dificuldades de compactação.

Nicholson et al. (1989) indicam preferência por materiais de baixa plasticidade para a camada fina de coberturas secas. Nesse sentido, a fração fina do solo laterítico tem comportamento siltoso e situa-se distante da região de alta plasticidade. Dessa forma, os limites de Atterberg indicam, preliminarmente, condições favoráveis de trabalhabilidade, embora o IP inferior ao recomendado por Aubertin et al. (1995) indique a necessidade de avaliar o material em conjunto com os demais ensaios realizados.

Conforme apresentado na Tabela 11 o índice de plasticidade de 6,4% obtido neste estudo é inferior aos valores de 11% e 12,2% verificados, respectivamente, por Morandini e Leite (2015), para solo laterítico natural coletado nas proximidades de Antônio Pereira, e por Carvalho (2017). Essa diferença indica menor plasticidade da amostra estudada em relação a outros solos lateríticos da região de Ouro Preto e Mariana.

Tabela 11 - Comparativo do índice de plasticidade do solo laterítico estudado com resultados de outros solos lateríticos de Minas Gerais

Estudo	Local de coleta	IP (%)
Presente estudo	Antônio Pereira, Ouro Preto/MG	6,40
Morandini e Leite (2015), amostra SL	Antônio Pereira, Ouro Preto/MG	11
Carvalho (2017), amostra SL01	Passagem de Mariana/MG	12,2

4.2 Ensaios de Compactação

Para a amostra de solo ácido, obteve-se, por meio do ensaio de compactação Proctor Normal, as curvas de compactação e de saturação apresentadas na Figura 33. O teor de umidade ótima obtido foi da ordem de 20,25%, enquanto a massa

específica aparente seca máxima foi de aproximadamente 1,638 g/cm³, em condições de saturação próximo a 80%.

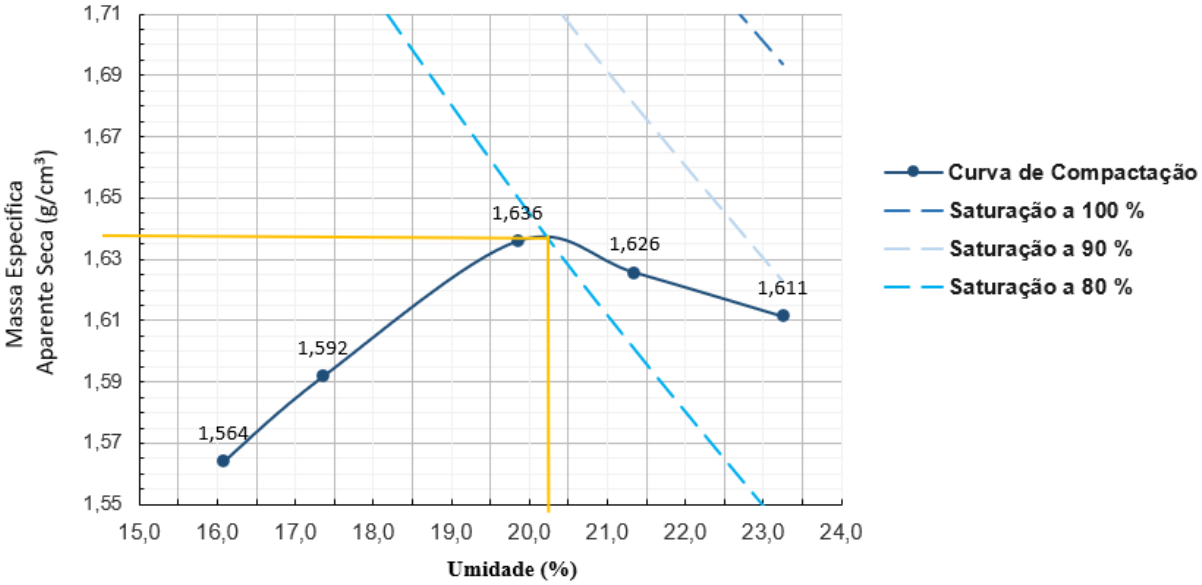


Figura 33 – Curvas de compactação e de saturação obtidas para a Amostra de solo ácido, através do ensaio de compactação Proctor Normal

Fonte: Autoria própria.

Considerando a classificação granulométrica do material como areia siltosa, observa-se que a compactação foi influenciada pela presença da fração fina, refletindo em massa específica seca máxima moderada e teor de umidade ótima relativamente elevado.

Para o solo laterítico utilizado como material de cobertura, obteve-se, por meio do ensaio de compactação Proctor Normal, teor de umidade ótima da ordem de 20,00% e massa específica aparente seca máxima de aproximadamente 1,845 g/cm³.

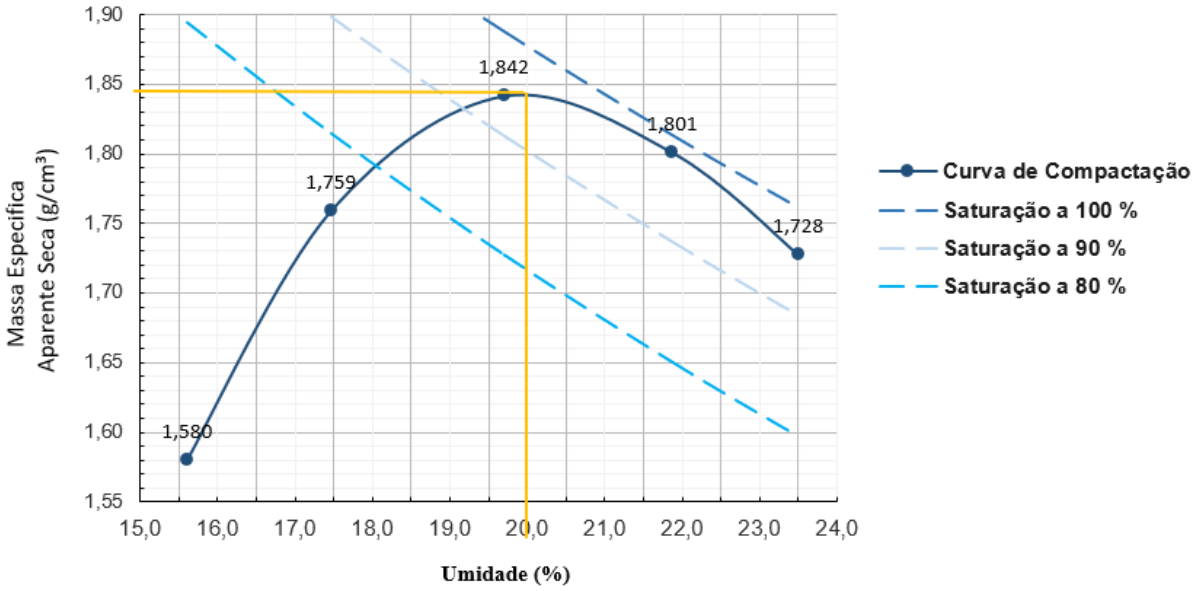


Figura 34 – Curvas de compactação e de saturação obtidas para o solo laterítico, através do ensaio de compactação Proctor Normal

Fonte: Autoria própria.

Para o solo laterítico, foram obtidas uma massa específica aparente seca máxima de 1,845 g/cm³ e umidade ótima de 20,0%. A Tabela 12 apresenta a comparação desses parâmetros com os resultados obtidos por outros autores para solos lateríticos da região, ensaiados sob a energia Proctor Normal.

Tabela 12 - Comparativo da compactação do solo laterítico estudado com resultados de outros solos lateríticos de Minas Gerais

Estudo (local de coleta)	Massa específica seca máxima (ρ_dmáx) (g/cm³)	Umidade ótima (W_{ot}) (%)
Presente estudo (Antônio Pereira, Ouro Preto/MG)	1,845	20,0
Morandini e Leite (2015), amostra SL (Antônio Pereira, Ouro Preto/MG)	1,823	12,5
Carvalho (2017), amostra SL01 (Passagem de Mariana/MG)	1,848	20,9

Conforme apresentado na Tabela 12, a massa específica aparente seca máxima obtida neste estudo, de 1,845 g/cm³, aproxima-se dos valores de 1,823 g/cm³ e 1,848 g/cm³ encontrados, respectivamente, por Morandini e Leite (2015) e Carvalho (2017). Essa compatibilidade indica que o comportamento de compactação do solo

estudado é coerente com o de outros solos lateríticos provenientes da região de Ouro Preto e Mariana.

Em relação à umidade ótima, o valor de 20,0% obtido neste trabalho é da mesma ordem do resultado de 20,9% apresentado por Carvalho (2017), porém superior aos 12,5% determinados por Morandini e Leite (2015). Essa diferença pode estar relacionada às particularidades granulométricas, mineralógicas e de plasticidade dos materiais analisados.

Do ponto de vista da aplicação em coberturas secas, a umidade ótima de 20,0% indica que o material necessita de um teor de água relativamente elevado para atingir sua máxima densificação. Esse resultado não comprova, isoladamente, que a camada permanecerá com elevado grau de saturação durante sua operação. Entretanto, caso a camada compactada seja mantida em condição próxima da saturação, ocorre redução do volume de poros preenchidos por ar e, consequentemente, da difusão de oxigênio através do solo, o que contribui para limitar a oxidação dos sulfetos presentes no material ácido subjacente (YANFUL, 1993; YANFUL et al., 1999). Dessa forma, os parâmetros de compactação indicam, preliminarmente, potencial de utilização do solo laterítico em coberturas secas destinadas ao controle da drenagem ácida.

4.3 Ensaio de Permeabilidade à Carga Variável

O ensaio de permeabilidade à carga variável forneceu condutividade hidráulica de $1{,}61 \times 10^{-6}$ cm/s para a amostra de solo ácido, valor coerente com o teor de finos identificado na caracterização e situado na faixa de baixa permeabilidade (LAMBE; WHITMAN, 1969).

O solo laterítico apresentou $1{,}14 \times 10^{-7}$ cm/s, uma ordem de grandeza abaixo do solo ácido: a cobertura é menos permeável que o material subjacente, restringindo a percolação antes que ela atinja o solo sulfetado. O valor atende à recomendação de Aubertin et al. (1995) para a camada fina de coberturas, cujo critério é condutividade hidráulica inferior a cerca de 10^{-6} a 10^{-7} cm/s, e coincide com a ordem de grandeza que Yanful (1993) associou à redução efetiva da infiltração e do fluxo de oxigênio em coberturas secas.

Esse desempenho está diretamente relacionado às condições de compactação dos corpos de prova, preparados na umidade ótima, sob energia Proctor Normal e em condição próxima à linha de saturação. No ramo seco da curva de compactação, a presença de torrões e de macroporos entre agregados tende a aumentar a condutividade hidráulica em duas a três ordens de grandeza (MITCHELL; HOOPER; CAMPANELLA, 1965), variação de magnitude semelhante à diferença entre resultados de laboratório e de campo relatada por Aubertin et al. (1995).

4.4 Caracterização Físico-Química

4.4.1 Potencial Hidrogeniônico

Os resultados obtidos para o potencial hidrogeniônico (pH) da amostra de solo ácido são apresentados na Tabela 13**.**

Tabela 13 - Potencial hidrogeniônico (pH) da Amostra de solo ácido

Ensaio	Temperatura (°C**)**	pH
pH 1	20	3,35
pH 2	20	3,35
pH 3	20	3,34
Média	20	3,34

Fonte: Autoria própria.

Considerando-se a média dos ensaios, a amostra de solo ácido apresentou pH igual a 3,34, indicando elevada acidez do solo. Valores nessa faixa são compatíveis com ambientes associados à drenagem ácida de rocha (DAR), nos quais a oxidação de minerais sulfetados promove a redução do pH do meio (MORAES, 2010).

Os resultados obtidos para o potencial hidrogeniônico (pH) da amostra de solo laterítico vermelho são apresentados na Tabela 14**.**

Tabela 14 - Potencial hidrogeniônico (pH) do solo laterítico vermelho

Ensaio	Temperatura (°C)	pH
pH 1	20	6,30
pH 2	20	6,33
pH 3	20	6,01
Média	20	6,21

Fonte: Autoria própria.

Conforme apresentado na Tabela 14, o solo laterítico apresentou pH médio igual a 6,21, indicando leve acidez, condizente com solos laterizados.

Do ponto de vista da função de barreira química, o pH próximo da neutralidade indica que o solo laterítico não contribui para a acidificação do sistema, porém sugere também capacidade limitada de neutralização de acidez. Assim, o material deve ser entendido prioritariamente como barreira física e hidráulica, e sua eventual atuação como barreira química depende da incorporação de aditivos alcalinos, como cal ou escórias siderúrgicas, cuja dosagem deve ser definida em estudos específicos de neutralização.

4.4.2 Potencial Redox (Eh)

Os valores de Eh obtidos para a Amostra de solo ácido, mostrados na Tabela 15, apresentaram média igual a 227,53 mV, indicando meio oxidante no material analisado. Esse comportamento é compatível com ambientes associados à drenagem ácida de rocha (DAR), nos quais ocorrem reações de oxidação de minerais sulfetados. Moraes (2010) associou elevados valores de Eh a condições oxidantes favoráveis à oxidação de sulfetos em sistemas submetidos à DAR.

Tabela 15 - Potencial Redox (Eh) da Amostra de solo ácido

Ensaio	Temperatura (°C)	Eh (mV)
Eh 1	22,2	224,9
Eh 2	22,2	227,8
Eh 3	22,1	229,9
Média	22,17	227,53

Fonte: Autoria própria.

Os resultados de potencial redox obtidos para o solo laterítico são apresentados na Tabela 16**.** O material apresentou potencial redox médio igual a 38,1mV, valor inferior ao observado para a Amostra de solo ácido, indicando condições menos oxidantes no material analisado. Esse resultado é coerente com a aplicação de materiais compactados em sistemas de cobertura seca para mitigação da DAR.

Tabela 16 - Potencial Redox (Eh) do solo laterítico vermelho

Ensaio	Temperatura (°C)	Eh (mV)
Eh 1	22,1	38,3
Eh 2	22,1	38,6
Eh 3	22,1	37,4
Média	22,1	38,1

Fonte: Autoria própria.

Para avaliar os valores de Eh obtidos, adotou-se o critério apresentado pelo MEND Program (1991), segundo o qual a ocorrência simultânea de Eh superior a 450 mV e pH inferior a 3,5 indica ambiente fortemente oxidante influenciado pela atividade da bactéria *Thiobacillus ferrooxidans*.

O solo ácido apresentou Eh médio de 227,53 mV e pH de 3,34. Embora o pH seja inferior a 3,5, o Eh permanece abaixo do limiar de 450 mV, de modo que a amostra não atende simultaneamente às duas condições estabelecidas por esse

critério. Ainda assim, o Eh do solo ácido foi substancialmente superior ao observado no solo laterítico e, quando interpretado conjuntamente com o baixo pH e a elevada condutividade elétrica, indica condição relativamente mais oxidante e compatível com processos de oxidação associados à DAR.

O solo laterítico apresentou Eh médio de 38,1 mV, indicando condição redox consideravelmente menos oxidante nas condições do ensaio. Esse resultado é preliminarmente favorável à sua aplicação como material de cobertura. Contudo, a eventual redução das condições oxidantes no material sulfetado subjacente dependerá da capacidade da camada compactada de restringir o ingresso de oxigênio, não podendo ser inferida apenas a partir do Eh medido no solo laterítico.

4.4.3 Condutividade Elétrica

Os resultados de condutividade elétrica (CE) e temperatura das amostras são apresentados nas tabelas abaixo.

Tabela 17 – Tabela de Condutividade Elétrica do solo ácido

Ensaio	Temperatura (°C)	CE (µS/cm)
CE 1	21,5	989,17
CE 2	21,4	987,56
CE 3	21,4	981,56
Média	21,43	986,10

Fonte: Autoria própria.

Tabela 18 – Tabela de Condutividade Elétrica do solo laterítico

Ensaio	Temperatura (°C)	CE (µS/cm)
CE 1	21,1	26,69
CE 2	21,1	26,64
CE 3	21,3	26,07
Média	21,17	26,47

Fonte: Autoria própria.

O solo ácido apresentou condutividade elétrica média de 986,10 µS/cm, enquanto o solo laterítico apresentou valor médio de 26,47 µS/cm. As temperaturas registradas durante as medições foram semelhantes para ambos os materiais, com médias próximas de 21 °C.

Observa-se que a condutividade elétrica do solo ácido foi aproximadamente 37 vezes superior à observada para o solo laterítico. Segundo Moraes (2010), a condutividade elétrica está associada à concentração de íons dissolvidos em solução. Dessa forma, os resultados sugerem maior disponibilidade de espécies químicas dissolvidas no solo ácido, comportamento compatível com os valores médios de pH (3,34) e potencial redox (227,53 mV) obtidos para esse material. Por outro lado, o solo laterítico apresentou baixa condutividade elétrica, associada ao pH médio de 6,21 e ao potencial redox médio de 38,1 mV, indicando menor concentração iônica e maior estabilidade química quando comparado ao solo ácido.

Nesse sentido, a condutividade elétrica do solo ácido atua como indicador indireto da intensidade do processo de DAR na área. Em contrapartida, o baixo valor obtido para o solo laterítico evidencia pequena quantidade de sais solúveis, característica desejável em materiais de cobertura, pois reduz o risco de o próprio material contaminar o meio.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou o potencial de um solo laterítico para compor camadas de cobertura seca sobre solo ácido proveniente da antiga mina de pirita de Ouro Preto/MG, cuja caracterização físico-química indicou condições ácidas e relativamente oxidantes, compatíveis com um ambiente afetado por drenagem ácida de rochas.

O conjunto dos ensaios indica que o material atende, preliminarmente, aos requisitos de uma camada de retenção de umidade, com função essencialmente física e hidráulica. Essa avaliação apoia-se na convergência de três evidências: a condutividade hidráulica, da ordem de 10^{-7} cm/s, inferior à do solo ácido subjacente, situa a cobertura na faixa capaz de restringir a infiltração e a difusão de oxigênio, sendo essa relação entre as camadas o que sustenta o efeito de barreira; a fração fina, expressiva, porém de baixa plasticidade, confere retenção de umidade e boa compactação; e o comportamento quimicamente estável e pouco reativo indica um material que não introduz novas fontes de contaminação ao sistema.

Essa indicação, contudo, limita-se ao que os ensaios demonstram. A caracterização atesta propriedades favoráveis, mas não o desempenho: a retração e a fissuração por dessecação não foram avaliadas diretamente; o IP (6,4%) ficou abaixo do mínimo sugerido por Aubertin et al. (1995); a capacidade de neutralização é baixa, de modo que, isolado, o material atua sobre o transporte de água e oxigênio, mas não sobre a acidez já gerada; e os valores de condutividade hidráulica referem-se a corpos de prova moldados em laboratório.

Conclui-se, assim, que o solo laterítico é uma alternativa promissora para a camada de retenção de umidade de sistemas de cobertura seca voltados ao controle da drenagem ácida, desde que compreendido como barreira física e hidráulica e, preferencialmente, associado a materiais de maior reatividade alcalina. O trabalho cumpre, portanto, a etapa preliminar de seleção de materiais, cabendo às investigações futuras a verificação de seu desempenho em condições mais próximas às de campo.

6 ESTUDOS SUGERIDOS

Recomenda-se a realização de ensaios de dilatação volumétrica e de ciclos de umedecimento e secagem, a fim de avaliar diretamente a retração e a fissuração por dessecação do solo laterítico, comportamento aqui inferido apenas a partir da carta de plasticidade. Sugerem-se, a determinação da curva de retenção de água e do valor de entrada de ar e a realização de ensaios de difusão de oxigênio, voltados à verificação do desempenho da cobertura no controle do transporte de oxigênio.

Indica-se também a realização de ensaios cinéticos, para estimar o potencial de geração de acidez em longo prazo, bem como o estudo de misturas do solo laterítico com materiais de elevada reatividade alcalina e que sejam realizadas simulações numéricas, a fim de avaliar, além da condutividade hidráulica, os mecanismos de transporte de água e de oxigênio através do sistema de cobertura e a geração da drenagem ácida ao longo do tempo. As modelagens numéricas serão úteis também para o monitoramento geotécnico da área após a implantação da cobertura. Por fim, sugere-se a implantação de instrumentação em campo, com monitoramento contínuo, de modo a verificar a durabilidade e a eficiência do sistema de cobertura em escala real.

REFERÊNCIAS

ABREU, Adriana Trópia de; FARIA, Efigênia Miranda de; GUIMARÃES, Juliana Alves Costa; LEITE, Adilson do Lago; LENA, Jorge Carvalho de. Avaliação em laboratório do uso de sistemas de coberturas alcalinas para prevenção da drenagem ácida de mina. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 36, n. 3, p. 787-801, 2012.

ALMEIDA, Gil Carvalho Paulo de. *Caracterização física e classificação dos solos*. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, Departamento de Transportes, 2005.

ALMEIDA, Rodrigo Pereira de. *Avaliação de coberturas secas utilizando escória de aciaria na redução de drenagem ácida de rocha*. 2016. 212 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

APPELO, C. A. J.; POSTMA, D. *Geochemistry, groundwater and pollution*. 2. ed. Amsterdam: A.A. Balkema Publishers, 2005. Cap. 6.2: Adsorbents in soils and aquifers, p. 242-247. Disponível em: https://www.usb.ac.ir/FileStaff/4685_2019-6-10-0-15-56.pdf. Acesso em: 12 mar. 2025.

ASSIS, Igor Rodrigues de. *Mitigação da lixiviação de arsênio, ferro e enxofre e revegetação de substratos minerados em área de ocorrência de drenagem ácida*. 2006. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM ISO 3310-1: Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação – Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico.* Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6457: amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm — Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água*. Rio de Janeiro:

ABNT, 2016. Anexo B: Determinação da massa específica dos grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6459: solo – determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6502: Solos e rochas* – Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7180: solo – determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7181: solo – análise granulométrica*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7182: solo – ensaio de compactação*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14545: solo argiloso – determinação do coeficiente de permeabilidade – método da carga variável*. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

AUBERTIN, M.; CHAPUIS, R. P.; AACHIB, M.; BUSSIÈRE, B.; RICARD, J.-F.; TREMBLAY, L. *Évaluation en laboratoire de barrières sèches construites à partir de résidus miniers.* Rapport MEND/NEDEM 2.22.2a. Ottawa: CANMET, 1995.

BAKER, Brett J.; BANFIELD, Jillian F. Microbial communities in acid mine drainage. *FEMS Microbiology Ecology*, Amsterdam, v. 44, n. 2, p. 139-152, 2003.

BORMA, L. S.; SOARES, P. S. M. Drenagem ácida e gestão de resíduos sólidos de mineração. In: *Extração de ouro: princípios, tecnologia e meio ambiente*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2002. Cap. 10, p. 253-276.

BUTAR, T. B.; PUTRA, D. P.; SIHOMBING, M. P. H.; SAPUTRA, A. D.; NAPITUPULU, R. Prevention of acid rock drainage formation through pyrite inhibition using silica. *Scientific Reports*, v. 15, n. 1, p. 1-14, 2025.

BUZZI, Daniella Cardoso. *Aplicação da eletrodiálise no tratamento da drenagem ácida de minas visando à recuperação de ácido sulfúrico*. 2012. 137 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. *Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas*. Campinas: Instituto Agronômico, 2009. 77 p. (Boletim Técnico, 106).

CARVALHO, Mateus Verçosa de. *Influência do reuso de amostras no ensaio de compactação de dois latossolos de Minas Gerais*. 2017. 36 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

CORRÊA, F. R.; SOARES, A. B.; BORBA, A. W.; LIMA, G. S. A geotechnical solution to reduce acid mine drainage generation at Recreio Mine, southern Brazil. In: INTERNATIONAL MINE WATER CONFERENCE, 2010, Pretoria. *Proceedings [...]*. Pretoria: International Mine Water Association, 2010. p. 779-784.

DAS, Braja M.; SOBHAN, Khaled. *Fundamentos de engenharia geotécnica*. Tradução: Novemitis do Brasil. Revisão técnica: Roberta Boszczowski. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

DEPARTMENT OF MINES AND PETROLEUM. *Environmental notes on mining – acid mine drainage*. Perth: Government of Western Australia, 2009. Disponível em: https://www.dmp.wa.gov.au/Documents/Environment/ENV-MEB-220.pdf. Acesso em: 19 mar. 2025.

DUARTE, Marcelo Guimarães. *Ensaios laboratoriais para avaliação da drenagem ácida na barragem da UHE Irapé*. 2011. 135 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

ECO DEBATE. Trabalho de pesquisadora da ENSP/Fiocruz propõe reintegração de áreas contaminadas por metais pesados. *EcoDebate*, [s. l.], 3 fev. 2010. Disponível em: https://www.ecodebate.com.br/2010/02/03/trabalho-de-pesquisadora-da-

enspfiocruz-propoe-reintegracao-de-areas-contaminadas-por-metais-pesados/. Acesso em: 28 set. 2025.

GALATTO, S. L.; LOPES, R. P.; BACK, A. J.; BIF, D. Z.; SANTO, E. L. Emprego de coberturas secas no controle da drenagem ácida de mina: estudos em campo. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 12, n. 2, p. 229-236, abr./jun. 2007.

GARRELS, R. M.; THOMPSON, M. E. Oxidation of pyrite by iron sulfate solutions. *American Journal of Science*, Bradley Volume, v. 258-A, p. 57-67, 1960.

GOLDBERG, Madison Liana. *Pyrite oxidation mechanisms and acid mine drainage prevention*. 2021. 76 f. Thesis (Master of Science in Hydrologic Sciences) – University of Nevada, Reno, 2021.

INTERNATIONAL NETWORK FOR ACID PREVENTION (INAP). *The global acid rock drainage guide (GARD guide)*. Capítulo 7. [S. l.]: Golder Associates, 2018. Disponível em: https://www.gardguide.com/index.php?title=Chapter_7. Acesso em: 24 jul. 2025.

INTERNATIONAL NETWORK FOR ACID PREVENTION (INAP). *The global acid rock drainage guide (GARD guide)*. Chapter 6: prevention and mitigation. [S. l.: s. n.], 2021. Disponível em: https://gardguide.com. Acesso em: 28 out. 2025.

JOHNSON, D. B.; HALLBERG, K. B. Acid mine drainage remediation options: a review. *Science of the Total Environment*, v. 338, p. 3-14, 2005.

LAMBE, T. William; WHITMAN, Robert V. *Soil mechanics*. New York: John Wiley & Sons, 1969.

LEITE, Adilson do Lago; SOUZA, Felipe Andrade de. Sensitivity of ordinary rock weathering tests to acid rock drainage. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 83, art. 334, 2024.

LI, Y.; LI, W.; XIAO, Q.; SONG, S.; LIU, Y.; NAIDU, R. Acid mine drainage remediation strategies: a review on migration and source controls. *Minerals and Metallurgical Processing*, v. 35, n. 3, p. 148-158, 2018.

LOWSON, Richard T. Aqueous oxidation of pyrite by molecular oxygen. *Chemical Reviews*, Washington, v. 82, n. 5, p. 461-497, out. 1982.

MAGALHÃES, Tayanne Pimenta. *Avaliação geotécnica de solos compactados para a recuperação do aterro controlado de Ouro Preto, MG*. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2022.

MELFI, A. J. *Lateritas e processos de laterização*. Aula Inaugural de 1994. São Carlos: Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1994.

MELLO, Jaime Wilson Vargas de; DIAS, Luiz Eduardo; DANIEL, Alfredo Mucci; ABRAHÃO, Walter Antonio Pereira; DESCHAMPS, Eleonora; SCHAEFER, Carlos Ernesto G. Reynald. Preliminary evaluation of acid mine drainage in Minas Gerais State, Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 365-375, 2006.

MEND PROGRAM. *Acid rock drainage prediction manual*. MEND Project 1.16.1b. Ottawa: MEND, 1991.

MEND PROGRAM. *Prediction manual for drainage chemistry from sulphidic geologic materials*. MEND Report 1.20.1. Ottawa: MEND, dez. 2009.

MEND PROGRAM. *Cold regions cover system design technical guidance document*. MEND Report 1.61.5c. Ottawa: MEND, jul. 2012.

MÉNDEZ-GARCÍA, Celia; PELÁEZ, Ana I.; MESA, Victoria; SÁNCHEZ, Jesús; GOLYSHINA, Olga V.; FERRER, Manuel. Microbial diversity and metabolic networks in acid mine drainage habitats. *Frontiers in Microbiology*, Lausanne, v. 6, n. 475, p. 1-17, 2015.

MENDONÇA, R. M. G. *Estudo da difusão de oxigênio em materiais de cobertura*. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

MITCHELL, James K.; HOOPER, Don R.; CAMPANELLA, Richard G. Permeability of compacted clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, v. 91, n. SM4, p. 41-65, 1965.

MOODLEY, I.; SHERIDAN, C. M.; KAPPELMEYER, U.; AKCIL, A. Environmentally sustainable acid mine drainage remediation: research developments with a focus on waste/by-products. *Minerals Engineering*, v. 126, p. 207-220, 2018.

MORAES, N. C. *Abatimento de drenagem ácida de mina com cobertura de entulho de construção civil: uma proposta de reabilitação de uma antiga mina de pirita*. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

MORANDINI, T. L. C.; LEITE, A. do L. Characterization and hydraulic conductivity of tropical soils and bentonite mixtures for CCL purposes. *Engineering Geology*, Amsterdam, v. 196, p. 251-267, 2015.

MURTA, F. C.; LEITE, A. L.; LIMA, H. M. Estudos cinéticos de sistemas de coberturas alcalinas em pilha de estéril para a prevenção ácida de mina. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 38, n. 1, p. 227-236, 2008.

MYLONA, E.; MENDES, M.; KLEIN, B. Acid mine drainage: prevention, treatment options, and strategies. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, v. 14, n. 3, p. 243-266, 2000.

NICHOLSON, R. V.; GILLHAM, R. W.; CHERRY, J. A.; REARDON, E. J. *Reduction of acid generation in mine tailings through the use of moisture-retaining cover layers as oxygen barriers.* Canadian Geotechnical Journal, v. 26, n. 1, p. 1–8, 1989.

NORDSTROM, D. Kirk. Baseline and premining geochemical characterization of mined sites. *Applied Geochemistry*, Oxford, v. 63, p. 1-19, 2015.

O'KANE, M.; AYRES, B.; CHRISTENSEN, D.; MEIERS, G. *CANMET – CETEM manual on cover system design for reactive mine waste*. OKC Report No. 689-01. [S. l.: s. n.], jun. 2002.

PARK, I.; TABELIN, C. B.; JEON, S.; LI, X.; SENO, K.; ITO, M.; HIROYOSHI, N. A review of recent strategies for acid mine drainage prevention and mine tailings recycling. *Chemosphere*, v. 219, p. 588-606, 2019.

PINTO, Carlos de Souza. *Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas*. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

POZO-ANTONIO, S.; PUENTE-LUNA, I.; LAGÜELA-LÓPEZ, S.; VEIGA-RÍOS, M. Techniques to correct and prevent acid mine drainage: a review. *DYNA*, Medellín, v. 81, n. 184, p. 73-80, 2014.

ROYCHOWDHURY, A.; SARKAR, D.; DATTA, R. Remediation of acid mine drainage-impacted water. *Current Pollution Reports*, v. 1, n. 3, p. 131-141, 2015.

RUBIO, J.; SILVA, R. D. R. da. Tratamento ativo de drenagem ácida de minas de carvão: situação atual e tendências tecnológicas. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 23., 2009, Gramado. *Anais* [...]. Gramado, 2009. p. 381-389.

SAHOO, P. K.; KIM, K.; EQUEENUDDIN, S. M.; POWELL, M. A. Current approaches for mitigating acid mine drainage. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, v. 226, p. 1-32, 2013.

SANTOS, Karine Batista dos. *Tratamento de drenagem ácida de minas por neutralização/precipitação – efeito do pH, agente neutralizante e tratamento complementar por biossorção com microalgas*. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

SCHNEIDER, Carlos Henrique. *Controle da drenagem ácida de minas na mineração de carvão de Santa Catarina: caso da Mina UM II – Verdinho*. 2006. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

SHEORAN, A. S.; SHEORAN, V. Heavy metal removal mechanism of acid mine drainage in wetlands: a critical review. *Minerals Engineering*, v. 19, p. 105-116, 2006. DOI: 10.1016/j.mineng.2005.08.006.

SIMATE, G. S.; NDLOVU, S. Acid mine drainage: challenges and opportunities. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 2, n. 3, p. 1785-1803, 2014.

SINGER, Philip C.; STUMM, Werner. Acidic mine drainage: the rate-determining step. *Science*, v. 167, n. 3921, p. 1121-1123, 1970.

SKOUSEN, J. G.; SENCINDIVER, J. C.; SMITH, R. M. *A review of procedures for surface mining and reclamation in areas with acid-producing materials*. Publicação EWRC 871. Morgantown: West Virginia University, Energy and Water Research Center; National Mine Land Reclamation Center, 1987. 40 p.

SKOUSEN, J.; ZIPPER, C. E.; ROSE, A.; ZIEMKIEWICZ, P. F.; NAIRN, R.; McDONALD, L. M.; KLEINMANN, R. L. Review of passive systems for acid mine drainage treatment. *Mine Water and the Environment*, v. 36, n. 1, p. 133-153, 2017.

SOARES, A. B.; POSSA, M. V.; SOUZA, V. P.; SOARES, P. S. M.; BARBOSA, M. C.; UBALDO, M. O.; BERTOLINO, A. V. F. A.; BORMA, L. S. Design of a dry cover pilot test for acid mine drainage abatement in southern Brazil, part II: pilot unit construction and initial monitoring. *Mine Water and the Environment*, v. 29, n. 4, p. 277–284, 2010.

SOUZA, Ana Carolina Reinesch. *Remediation of acid rock drainage: current prevention and mitigation methods*. 2021. Major Project (Master of Land and Water Systems) – Faculty of Land and Food Systems, University of British Columbia, Vancouver, 2021.

SOUZA, V. P.; BORMA, L. D. S.; MENDONÇA, R. M. G. Projeto de coberturas secas para controle da drenagem ácida em depósitos geradores de acidez. In: SEMINÁRIO BRASIL-CANADÁ DE RECUPERAÇÃO AMBIENTAL DE ÁREAS MINERADAS, 2003, Florianópolis. *Anais [...]*. Florianópolis: [s. n.], 2003.

SRACEK, O.; CHOQUETTE, M.; GÉLINAS, P.; LEFEBVRE, R.; NICHOLSON, R. V. Geochemical characterization of acid mine drainage from a waste rock pile, Mine Doyon, Québec, Canada. *Journal of Contaminant Hydrology*, v. 69, p. 45–71, 2004.

WEST VIRGINIA UNIVERSITY. WVU awarded $5 million to continue rare earth project, build acid mine drainage treatment facility. *WVU Today*, [s. l.], 1 out. 2019. Disponível em: https://wvutoday.wvu.edu/stories/2019/10/01/wvu-awarded-5-million-to-continue-rare-earth-project-build-acid-mine-drainage-treatment-facility. Acesso em: 28 set. 2025.

WILLIAMSON, M. A.; KIRBY, C. S.; RIMSTIDT, J. D. Iron dynamics in acid mine drainage. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACID ROCK DRAINAGE, 7., 2006, St. Louis. *Proceedings [...]*. Lexington: American Society of Mining and Reclamation, 2006. p. 2411-2423.

YANFUL, E. K. Oxygen diffusion through soil covers on sulphidic mine tailings. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 119, n. 8, p. 1207-1228, 1993.

YANFUL, E. K.; MOUSAVI, S. M.; DE SOUZA, L.-P. A numerical study of soil cover performance. *Journal of Environmental Management*, [s. l.], v. 81, n. 1, p. 72-92, 2006.

YANFUL, E. K.; SIMMS, P. H.; PAYANT, S. C. Soil covers for controlling acid generation in mine tailings: a laboratory evaluation of the physics and geochemistry. *Water, Air, and Soil Pollution*, v. 114, p. 347-375, 1999.

YOUNGER, P. L.; BANWART, S. A.; HEDIN, R. S. *Mine water: hydrology, pollution, remediation*. [S. l.]: Springer-Verlag, 2002.

ZIEMKIEWICZ, P. F.; SKOUSEN, J. G. The use of steel slag in acid mine drainage treatment and control. In: WEST VIRGINIA SURFACE MINE DRAINAGE TASK FORCE SYMPOSIUM, 19., 1998, Morgantown. *Proceedings* [...]. Morgantown: West Virginia University, 1998.

APÊNDICE A – RESULTADOS DETALHADOS DOS ENSAIOS LABORATORIAIS

A.1 SOLO ÁCIDO

A.1.1 Ensaios de Caracterização Física do Solo

A.1.1.1 Ensaio de Determinação da Massa Específica dos Sólidos

Umidade média do solo (%)	7,28	
Determinação	**2**	**3**
Massa do Picnômetro + Amostra + Água (g)	724,59	734,2
Temperatura (°C)	24	24,2
Massa do Picnômetro + Água (g)	693,66	704,13
Densidade da água à temperatura (g/cm³)	0,9973	0,9973
Massa do solo úmido (g)	50,03	50,09
Massa do solo seco (g)	46,63	46,69
Massa específica dos sólidos (g/cm³)	2,785	2,803
Diferença (g/cm³)	0,018	
Média – Massa específica dos sólidos (g/cm³)	**2,794**	

A.1.1.2 Ensaio de Análise Granulométrica

PENEIRAMENTO GROSSO		
PENEIRA		(%) PASSANTE
Nº	ABERTURA (mm)	
2"	50	100
1 ¹/2 "	38	100
1"	25	97,86
3/4"	19	96,93

3/8"	9,5	94,41
nº 4	4,8	92,35
nº10	2	89,7

PENEIRAMENTO FINO					
ENSAIO COM DEFLOCULANTE			**ENSAIO SEM DEFLOCULANTE**		
PENEIRA		PASSANTE (%)	PENEIRA		PASSANTE (%)
Nº	ABERTURA (mm)		Nº	ABERTURA (mm)	
16	1,2	87,92	16	1,2	86,89
30	0,6	82,87	30	0,6	79,92
40	0,42	79,34	40	0,42	75,3
60	0,25	71,72	60	0,25	65,22
100	0,15	61,30	100	0,15	53
200	0,075	46,30	200	0,075	38,03

SEDIMENTAÇÃO			
ENSAIO COM DEFLOCULANTE		**ENSAIO SEM DEFLOCULANTE**	
DIÂMETRO DOS GRÃOS (mm)	PASSANTE (%)	DIÂMETRO DOS GRÃOS (mm)	PASSANTE (%)
0,075	46,3	0,07500	38,03
0,05975	45,98	0,06529	31,98
0,04299	45,64	0,04668	28,67
0,03085	45,39	0,03319	27,02
0,02204	45,21	0,02401	21,50
0,01577	41,90	-	-
0,01172	36,94	-	-
0,00834	35,28	-	-
0,00595	32,53	-	-
0,00426	28,67	-	-
0,00302	25,91	-	-
0,00216	24,81	-	-
0,00127	21,50	-	-

A.1.1.3 Ensaio de Determinação do Limite de Liquidez

Teor de Umidade (%)	34,38	35,57	35,96	37,78	38,32
Número de golpes	33	30	28	20	18

A.1.1.4 Ensaio de Determinação do Limite de Plasticidade

Teor de Umidade (%)	25,81	26,32	26,5	25,81	25,69
Umidade Média (%)	26,02				
LP (%)	26				

A.1.2 Ensaios de Compactação

A.1.2.1 Ensaio de Compactação Proctor

Curva de Compactação		Massa específica seca (g/cm³)	W média (%)
	CP1	1,564	16,08
	CP2	1,592	17,35
	CP3	1,636	19,84
	CP4	1,626	21,35
	CP5	1,611	23,25
Curva de Saturação (S=1)		Massa específica seca (g/cm³)	W média (%)
	CP1	1,928	16,08
	CP2	1,882	17,35
	CP3	1,797	19,84
	CP4	1,75	21,35
	CP5	1,694	23,25

A.1.3 Ensaio de Permeabilidade à Carga Variável

a (cm²)	H (cm)	A (cm²)	T (ºC)	h_i (cm)	h_f (cm)	Δt (s)	K (cm/s)	R_T	K_{20} (cm/s)
0,242	1,883	20,32	23,2	30	26,5	1571	1,77E-06	0,928	1,64E-06
			23,2	26	20	3442	1,71E-06	0,928	1,59E-06
			23,2	19,5	10	8467	1,77E-06	0,928	1,64E-06
			23,2	10	7	4161	1,92E-06	0,928	1,78E-06
			23,2	27	24	1576	1,68E-06	0,928	1,56E-06
			24	24	21	1822	1,64E-06	0,908	1,49E-06
			24	20,8	16,5	2914	1,78E-06	0,908	1,62E-06
			24	16	12	3532	1,83E-06	0,908	1,66E-06
			24	30	27,5	1100	1,77E-06	0,908	1,61E-06
			24	27	23	2095	1,72E-06	0,908	1,56E-06
						Média	**1,76E-06**		**1,61E-06**

A.2 SOLO LATERÍTICO

A.2.1 Ensaios de Caracterização Física do Solo

A.2.1.1 Ensaio de Determinação da Massa Específica dos Sólidos

Umidade média do solo (%)	9,67	
Determinação	**1**	**3**
Massa do Picnômetro + Amostra + Água (g)	730,97	688,46
Temperatura (°C)	25,7	26
Massa do Picnômetro + Água (g)	694,47	651,84
Densidade da água à temperatura (g/cm³)	0,9969	0,9968
Massa do solo úmido (g)	60,09	60,06
Massa do solo seco (g)	54,79	54,76
Massa específica dos sólidos (g/cm³)	2,987	3,009
Diferença (g/cm³)	0,007	
Média – Massa específica dos sólidos (g/cm³)	**3,006**	

A.2.1.2 Ensaio de Análise Granulométrica

PENEIRAMENTO GROSSO		
PENEIRA		PASSANTE (%)
Nº	ABERTURA (mm)	
2"	50	100,00%
1 ¹/2 "	38	100,00%
1"	25	100,00%
3/4"	19	100,00%
3/8"	9,5	99,09%
nº 4	4,8	96,59%
nº10	2	93,53%
PENEIRAMENTO FINO		
ENSAIO COM DEFLOCULANTE	**ENSAIO SEM DEFLOCULANTE**	

PENEIRA		PASSANTE (%)	PENEIRA		PASSANTE (%)
Nº	ABERTURA (mm)		Nº	ABERTURA (mm)	
16	1,2	90,87	16	1,2	87,85
30	0,6	80,73	30	0,6	78,22
40	0,42	78,43	40	0,42	73,42
60	0,25	70,28	60	0,25	61,83
100	0,15	60,03	100	0,15	47,34
200	0,075	47,14	200	0,075	38,03
SEDIMENTAÇÃO					
ENSAIO COM DEFLOCULANTE			**ENSAIO SEM DEFLOCULANTE**		
DIÂMETRO DOS GRÃOS (mm)		PASSANTE (%)	DIÂMETRO DOS GRÃOS (mm)		PASSANTE (%)
0,0750		47,14	0,075		38,03
0,0610		36,38	0,075		29,94
0,0438		32,09	0,06324		25,19
0,0312		29,95	0,04519		21,91
0,0217		26,73	0,03272		14,24
0,0154		24,80			
0,0113		23,52			
0,0081		22,33			
0,0057		20,30			
0,0040		19,58			
0,0029		17,55			
0,0020		15,41			

A.2.1.3 Ensaio de Determinação do Limite de Liquidez

Teor de Umidade (%)	28,64	29,45	29,76	29,92	30,12
Número de golpes	33	27	20	18	16

A.2.1.4 Ensaio de Determinação do Limite de Plasticidade

Teor de Umidade (%)	22,05	23,18	21,95	22,41	23,08
Umidade Média (%)	22,53				
LP (%)	23				

A.2.2 Ensaios de Compactação

A.2.2.1 Ensaio de Compactação Proctor

Curva de Compactação		Massa específica seca (g/cm³)	W média (%)
	CP1	1,58	15,61
	CP2	1,759	17,46
	CP3	1,842	19,7
	CP4	1,801	21,87
	CP5	1,728	23,5
Curva de Saturação (S=1)		Massa específica seca (g/cm³)	W média (%)
	CP1	2,046	15,61
	CP2	1,971	17,46
	CP3	1,888	19,7
	CP4	1,814	21,87
	CP5	1,762	23,5

A.2.3 Ensaio de Permeabilidade à Carga Variável

a (cm²)	H (cm)	A (cm²)	T (ºC)	h_i (cm)	h_f (cm)	Δt (s)	K (cm/s)	R_T	K_{20} (cm/s)
0,242	12,713	78,37	20,8	87,5	84,4	19620	7,22E-08	0,982	7,09E-08
			20,8	84,4	70,3	36720	1,95E-07	0,982	1,92E-07
			20,8	85,6	83,3	14340	7,45E-08	0,982	7,32E-08
			20,8	83,6	67,8	77400	1,07E-07	0,982	1,05E-07
			18,4	79	60	87480	1,23E-07	1,043	1,29E-07
						Média	**1,25E-07**		**1,14E-07**