

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA**

**LEVANTAMENTO DOS FATORES CONDICIONANTES E DEFLAGRADORES  
PARA O DESENVOLVIMENTO DOS PROCESSOS EROSIVOS NA BORDA DO  
RESERVATÓRIO DA UHE DE BATALHA (GO/MG)**

**MONIQUE PAIXÃO DE SOUZA**

**ORIENTADOR: NEWTON MOREIRA DE SOUZA**  
**COORIENTADORA: PATRÍCIA DE ARAÚJO ROMÃO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA**  
**PUBLICAÇÃO: G.DM-367/2022**

**BRASÍLIA / DF: JUNHO 2022**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA**

**LEVANTAMENTO DOS FATORES CONDICIONANTES E DEFLAGRADORES  
PARA O DESENVOLVIMENTO DOS PROCESSOS EROSIVOS NA BORDA DO  
RESERVATÓRIO DA UHE DE BATALHA (GO/MG)**

**MONIQUE PAIXÃO DE SOUZA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL DA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

**APROVADA POR:**

---

**PROF. NEWTON MOREIRA DE SOUZA, DSc (UnB)  
(ORIENTADOR)**

---

**PATRÍCIA DE ARAÚJO ROMÃO, DSc (UFG)  
(COORIENTADORA)**

---

**RAFAEL CERQUEIRA SILVA, DSc (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**ELIZON DIAS NUNES, DSc (UFG)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**BRASÍLIA/DF, 06 DE JUNHO DE 2022**

# FICHA CATALOGRÁFICA

PAIXÃO DE SOUZA, MONIQUE

**Levantamento dos fatores condicionantes e deflagradores para o desenvolvimento dos processos erosivos na borda do reservatório da UHE de Batalha (GO/MG) [Brasília, Distrito Federal] 2022.**

xix, 182p. 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2022)  
Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Processos erosivos	2. Barragem
3. Cartografia Geotécnica	4. MCT
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PAIXÃO DE SOUZA, MONIQUE (2022). Levantamento dos fatores condicionantes e deflagradores para o desenvolvimento dos processos erosivos na borda do reservatório da UHE de Batalha (GO/MG). Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-367/22, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 182p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Monique Paixão de Souza

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Levantamento dos fatores condicionantes e deflagradores para o desenvolvimento dos processos erosivos na borda do reservatório da UHE de Batalha (GO/MG).

GRAU: Mestre ANO: 2022

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Monique Paixão de Souza  
Avenida Dom José Botelho, 404,  
Centro, Santo Estevão/BA. 44190-000 – Brasil  
E-mail: moniquepaixao.s@hotmail.com

## DEDICATÓRIA

*A Denilson, meu companheiro de vida, apoiador de sonhos e melhor revisor de texto do mundo.*

*Ao meu paiinho Otacílio por ser meu maior exemplo de honestidade. A minha mainha Irani pela inspiração e garra de ser mulher arretada, amorosa e humilde.*

*À minha mãe-Tiêta (in memoriam) por acreditar em mim e se orgulhar, mesmo quando eu era tão somente uma criança. Passe o tempo que for, seu amor e exemplo permanecerá me fortalecendo, sempre!*

## AGRADECIMENTOS

Essa é, sem dúvidas, a melhor parte. E a mais difícil também. O medo é esquecer de citar alguém. Mas estou certa que a gratidão sempre estará comigo, para todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste sonho.

Antes de qualquer coisa, gratidão a Deus por me sustentar e me permitir chegar ao fim desta jornada, mesmo enfrentando a pandemia global da COVID-19. Sem Ele nada seria possível e, mesmo que fosse, não faria sentido. Obrigada Senhor por tanto e por sempre.

Gratidão e honras aos meus orientadores, prof. Newton Souza e prof.<sup>a</sup> Patrícia Romão, sem os quais eu jamais teria chegado até aqui, muito obrigada pela confiança. Ao professor Newton, com respeito aos demais, o melhor professor que eu poderia escolher, obrigada pela paciência, carinho, atenção; gratidão por todo conhecimento compartilhado, sempre com tanto zelo e cuidado, sou sua admiradora fiel. A professora Patrícia, que é puro acolhimento e sabedoria em todos os momentos, dona do sorriso mais lindo e da paciência mais admirada; Pró, a senhora trouxe leveza a essa caminhada e muitas vezes durante a angústia de finalizar este trabalho, sua ajuda foi o ponto de equilíbrio para não desistir. Oro a Deus pela vida e saúde de vocês.

À minha grande e amada família por, mesmo longe, se fazerem presentes em todos os momentos, sobretudo meus pais, Otacílio e Irani; meus irmãos, Léia, Sami, Milla, Kaian e Aline; meus sobrinhos, Pietro e Bernardo; minhas tias e tios, Ana, Neide, Vanda, Mara, Si, Iran, Roque, Ananias. E tantos outros... Obrigada pelas orações e por me ensinar o quanto se ganha quando se trabalha unido.

Aos meus amigos, sobretudo a Kátia, Lidi e Neto pelo companheirismo e escuta de sempre, inclusive das queixas rrsrsrs.

Ao grupo de orientandos do prof. Newton, obrigada pela ajuda e discussões que ajudaram a embasar esse trabalho, em especial a Fabiani, Laura, Lucas, Bruno e prof. Eleudo.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB, pelo conhecimento repassado. Muito carinhosamente, aos professores Manoel, Rafael e André Brasil.

Agradeço ao apoio técnico e financeiro de Furnas, no âmbito do projeto de pesquisa e desenvolvimento tecnológico do qual faz parte esta pesquisa, intitulado Modelagem em Diversas Escalas da Geração de Sedimentos em Erosões e o Aporte em Reservatórios de UHEs”

- PD-0394-1705/2017, regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, com coordenação técnica e financiamento da Eletrobras FURNAS, realizado pela Universidade Federal de Goiás e pela Universidade de Brasília. Aos membros do grupo de pesquisa de Furnas, especialmente aos pesquisadores Glacielle, Izaias, Elizon e professor Maurício.

Às instituições que viabilizaram esta pesquisa. Em especial a UnB por me aceitar e desenvolver. À Furnas e Capes pelo financiamento. À UFG, especialmente ao Centro Integrado de Pesquisa em Planejamento Geográfico (CIPGeo) do Instituto de Estudos Socioambientais (IESA) da Universidade Federal de Goiás (UFG), pela disponibilização da infraestrutura dos laboratórios.

Aos queridos e sempre prestativos funcionários da UnB, especialmente a Emily da secretaria, Rogério e Amanda, técnicos de laboratório de Geotecnia e do Infralab, e as meninas da portaria do SG12, Isa e Laís. Muito obrigada pela educação e cordialidade diária.

Aos companheiros de luta do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB, pelo companheirismo diário, que mesmo em tempos de pandemia e distanciamento social se fizeram tão presentes quanto possível. Gratidão especial a meu trio das aulas remotas: Amanda e Jaqueline. E aos meus amigos de laboratório e RU, que me fazem crer que amizade nunca é tempo e sim conexão de energias; recebam minha gratidão por tantas ajudas e momentos de descontração, muito carinhosamente a Débora, Edwin, Gabriel, Igor, Leandro, Luis Alonso, Mário Rivera, Matheus Machado e Sonny. E todos que aqui não citei, mas que sou grata por tudo.

Por último, pra fechar com muito amor, agradeço à pessoa que apostou no meu sonho e me incentivou, meu marido Denilson. Seu exemplo e motivação foram essenciais nessa jornada. Obrigada por ter mudado de cidade, de emprego, de planos, para que eu pudesse viver e realizar meu sonho. Concretizo hoje algo que posso chamar de nosso, pois se pudesse compartilhar esse título, certamente seria seu e meu.

*“Tão somente sejas forte e muito corajoso! (...) Não tenhas medo, nem fiques assustado, porque o Senhor, teu Deus, estará contigo por onde quer que andares.”*

*Josué 1:7-9*

## RESUMO

O avanço e desenvolvimento econômico de um país está diretamente ligado ao crescimento e fortalecimento de seu setor energético, principalmente nos aspectos que envolvem a energia elétrica. O setor elétrico brasileiro é composto por um sistema interligado de geração, transmissão, distribuição e comercialização. O subsetor de geração consiste num ponto estratégico que fornece a base para que todo o sistema funcione adequadamente. No Brasil é predominante a geração hidrelétrica, cuja a produção é realizada por Usinas Hidrelétricas (UHE). A construção de uma UHE envolve grandes obras de engenharia onde é executado, dentre outras estruturas, o barramento d'água que tem por função represar a água que atuará na produção de energia. Assim, os reservatórios cumprem uma função essencial, de modo que a garantia de sua funcionalidade adequada, implicará na eficiência de todo sistema de geração da UHE. Um grande desafio na gestão dos reservatórios está relacionado a manutenção de seu volume útil de água, pois a ocorrência de processos erosivos nas bordas e nas bacias de contribuição do reservatório tendem a gerar sedimentos que podem ser conduzidos ao reservatório, assoreando-o e assim, diminuindo sua capacidade de armazenamento e, conseqüentemente, reduzindo sua vida útil.

Neste contexto, o presente trabalho estudou os processos erosivos presentes na Bacia de Contribuição Direta do reservatório da Usina Hidrelétrica de Batalha localizado na bacia do rio São Marcos, divisa dos estados de Goiás e Minas Gerais, sob gestão da empresa Eletrobrás Furnas.

A metodologia adotada para o desenvolvimento deste trabalho compreendeu três etapas: análise geoespacial, trabalho de campo e estudo da erodibilidade. A etapa I consistiu na coleta das informações preexistentes, na delimitação da bacia a ser estudada, na caracterização da área de estudo e no pré-cadastro das feições erosivas. A etapa II ocorreu a validação das atividades executadas na etapa I, por intermédio do trabalho de campo, onde foi realizado o reconhecimento da área das bordas do reservatório da UHE, registro fotográfico georreferenciado das feições erosivas e coleta de amostras. Na etapa final (III), foram executados os estudos da erodibilidade, por meio de ensaios laboratoriais e elaboração de mapas da área de estudo, bem como foi feita uma análise e conclusão dos resultados.

Os resultados do trabalho permitiram a caracterização da área de estudo, cadastramento dos processos erosivos e identificação de possíveis agentes deflagradores e condicionantes ao surgimento e evolução dos processos erosivos. As análises laboratoriais permitiram caracterizar os solos existentes na região mediante metodologia MCT e da ABNT, correlacionando-os com os processos erosivos. O mapeamento cartográfico identificou área suscetíveis às erosões, indicando os locais onde é necessário um monitoramento e controle maior para garantir o prolongamento da vida útil do reservatório da Usina Hidrelétrica de Batalha.

## ABSTRACT

The economic advancement and development of a country is directly linked to the growth and strengthening of its energy sector, especially in the aspects that involve electrical energy. The Brazilian electricity sector is composed of an interconnected system of generation, transmission, distribution, and commercialization. The generation subsector consists of a strategic point that provides the basis for the whole system to function adequately. In Brazil it is predominantly hydroelectric generation, whose production is carried out by Hydroelectric Plants (HPP). The construction of a HPP involves major engineering works where, among other structures, a dam is built to hold the water that will act in the production of energy. Thus, the reservoirs fulfill an essential function, in such a way that the guarantee of their adequate functionality will imply in the efficiency of the entire HPP generation system. A major challenge in the management of reservoirs is related to the maintenance of their useful water volume, because the occurrence of erosive processes on the edges and in the contribution basins of the reservoir tend to generate sediments that can be conducted to the reservoir, silting it and thus reducing its storage capacity and, consequently, reducing its useful life.

In this context, the present work studied the erosive processes present in the Direct Contribution Basin of the Batalha Hydroelectric Power Plant reservoir located in the São Marcos river basin, on the border between the states of Goiás and Minas Gerais, managed by Eletrobrás Furnas.

The methodology adopted for the development of this work comprised three stages: geospatial analysis, field work and erodibility study. Stage I consisted in the collection of preexisting information, in the delimitation of the basin to be studied, in the characterization of the study area and in the pre-registration of the erosive features. Stage II was the validation of the activities carried out in stage I, through field work, where the recognition of the area around the edges of the reservoir was carried out, as well as the georeferenced photographic register of the erosive features and sample collection. In the final stage (III), the erodibility studies were carried out, by means of laboratory tests and the elaboration of maps of the study area, as well as an analysis and conclusion of the results.

The results of the work allowed the characterization of the study area, the registration of the erosive processes and the identification of possible triggering and conditioning agents for the emergence and evolution of the erosive processes. The laboratory analyses made it possible to characterize the soils existing in the region using the MCT and ABNT methodologies, correlating them to the erosive processes. The cartographic mapping identified areas susceptible to erosion, indicating the places where greater monitoring and control is necessary to guarantee the extension of the useful life of the reservoir of the Batalha Hydroelectric Plant.

## ÍNDICE

<b>1.</b>	<b>INTRUDUÇÃO</b>	
1.1.	JUSTIFICATIVA DA PESQUISA.....	1
1.2.	OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO.....	3
1.2.1.	OBJETIVO GERAL .....	3
1.2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
1.3.	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	4
<b>2.</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>6</b>
2.1.	SOLOS.....	6
2.1.1.	FORMAÇÃO DOS SOLOS.....	6
2.1.2.	PERFIS DOS SOLOS .....	10
2.1.3.	CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS.....	12
2.2.	EROSÃO.....	16
2.2.1.	PROCESSOS EROSIVOS.....	18
2.2.2.	EROSÃO LAMINAR, SULCOS, RAVINAS E VOÇOROCAS.....	19
2.3.	PROCESSOS EROSIVOS EM BORDAS DE RESERVATÓRIOS .....	21
2.3.1.	CONTROLE, MONITORAMENTO E PREVENÇÃO DE EROSÕES EM BORDAS DE RESERVATÓRIOS.....	23
2.4.	FATORES PREPONDERANTES DOS PROCESSOS EROSIVOS EM BORDAS DE RESERVATÓRIOS.....	25
2.4.1.	FATORES DEFLAGRADORES.....	25
2.4.2.	FATORES CONDICIONANTES.....	27
2.5.	SUSCETIBILIDADE À EROSÃO.....	29
2.6.	ENSAIOS LABORATORIAIS PARA O ESTUDO DE EROSÕES .....	33
2.6.1.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA.....	33
2.6.2.	AVALIAÇÃO DIRETA E INDIRETA DA ERODIBILIDADE DE SOLOS ..	34
2.6.2.1.	ENSAIO DE AVALIÇÃO DIRETA DA ERODIBILIDADE: INDERBITZEN .....	35
2.6.2.2.	ENSAIO DE AVALIÇÃO INDIRETA: CRITÉRIO MCT.....	36
2.6.3.	CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS COM USO DA METODOLOGIA MCT EXPEDITA .....	39
2.6.4.	CARACTERIZAÇÃO DO SOLO MEDIANTE GRANULOMETRIA A LASER E ESPECTRÔMETRO DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X POR ENERGIA DISPERSIVA (XRF/EDX).....	44
2.6.4.1.	GRANULOMETRIA A LASER.....	45

2.6.4.2.	ESPECTRÔMETRO DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X POR ENERGIA DISPERSIVA (XRF/EDX) .....	45
2.7.	GEOPROCESSAMENTO E SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG) .....	46
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>50</b>
3.1.	ETAPA I: ANÁLISE GEOESPACIAL.....	51
3.1.1.	PLANEJAMENTO DO TRABALHO DE CAMPO .....	53
3.2.	ETAPA II: TRABALHO DE CAMPO.....	55
3.3.	ETAPA III: ESTUDO DA ERODIBILIDADE.....	60
3.3.1.	ENSAIOS LABORATORIAIS.....	63
3.3.1.1.	UMIDADE NATURAL E HIGROSCÓPICA.....	63
3.3.1.2.	CLASSIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO EXPEDITA MCT .....	63
3.3.1.3.	GRANULOMETRIA A LASER .....	70
3.3.1.4.	ESPECTRÔMETRO DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X POR ENERGIA DISPERSIVA (XRF/EDX) .....	71
3.3.1.5.	MASSA ESPECÍFICA APARENTE COM EMPREGO DE BALANÇA HIDROSTÁTICA .....	72
3.3.1.6.	PERDA DE MASSA POR IMERSÃO.....	73
3.3.1.7.	INFILTRABILIDADE .....	75
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>77</b>
4.1.	RESULTADOS OBTIDOS NA ETAPA I.....	77
4.1.1.	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO: RESERVATÓRIO DE BATALHA; BACIA DO RIO SÃO MARCOS; BACIA DE CONTRIBUIÇÃO DIRETA; ÁREA DE INFLUÊNCIA DIRETA .....	77
4.1.2.	PLANEJAMENTO DO TRABALHO DE CAMPO .....	84
4.2.	RESULTADOS OBTIDOS NA ETAPA II.....	86
4.2.1.	CADASTRAMENTO E VALIDAÇÃO DAS FEIÇÕES EROSIVAS .....	86
4.2.2.	PERFIS DE SOLO IDENTIFICADOS.....	88
4.2.3.	COLETA DE AMOSTRAS .....	91
4.3.	RESULTADOS OBTIDOS NA ETAPA III.....	91
4.3.1.	RESULTADOS DOS ENSAIOS LABORATORIAIS.....	91
4.3.1.1.	ENSAIO DE UMIDADE NATURAL E HIGROSCÓPICA.....	92
4.3.1.2.	CLASSIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO EXPEDITA MCT .....	93
4.3.1.3.	GRANULOMETRIA A LASER .....	97
4.3.1.4.	ESPECTRÔMETRO DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X POR ENERGIA DISPERSIVA (XRF/EDX) .....	103

4.3.1.5.	PERDA DE MASSA POR IMERSÃO.....	104
4.3.1.6.	INFILTRABILIDADE .....	106
4.3.2.	ERODIBILIDADE PELO MÉTODO MCT .....	109
4.3.3.	MAPAS ELABORADOS .....	111
4.3.3.1.	MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DE FEIÇÕES EROSIVAS .....	112
4.3.3.2.	MAPA GEOLÓGICO.....	115
4.3.3.3.	MAPA DE GEOMORFOLOGIA – UNIDADES E RELEVO .....	117
4.3.3.4.	MAPA DE SOLOS .....	119
4.3.3.5.	MAPA LITOLÓGICO.....	121
4.3.3.6.	MAPA HIPSOMÉTRICO .....	123
4.3.3.7.	MAPA DE COMPRIMENTO DE FLUXO .....	125
4.3.3.8.	MAPA DE DECLIVIDADES .....	127
4.3.3.9.	MAPA DE HAND .....	129
4.3.3.10.	MAPA DE USO E COBERTURA DO SOLO.....	131
4.3.3.11.	MAPA DE DISSECAÇÃO.....	133
4.3.3.12.	MAPA DE CURVATURAS: FORMAS DA VERTENTE.....	135
4.3.3.13.	MAPA DE MODIFICAÇÕES ANTRÓPICAS.....	137
4.3.3.14.	MAPA DE ERODIBILIDADE.....	139
4.3.3.15.	MAPA DE SUSCETIBILIDADE ÀS EROSÕES LAMINARES .....	141
4.3.3.16.	MAPA DE SUSCETIBILIDADE ÀS EROSÕES LINEARES .....	143
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>146</b>
5.1.	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	151
ANEXO A: RELATÓRIO DOS ENSAIOS GRANULOMÉTRICOS UTILIZANDO O EQUIPAMENTO GRANULÔMETRO A LASER.....		160
ANEXO B: RELATÓRIO DOS ENSAIOS DE ESPECTRÔMETRO DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X POR ENERGIA DISPERSIVA (XRF/EDX) .....		174
ANEXO C: RELATÓRIO FOTOGRÁFICO .....		176

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Esquema do processo de formação dos solos. Baseado em Caputo (1988), Cardoso (2002) e Leão (2018).....	8
Figura 2.2: Modelo de perfil de solo hipotético e perfis reais fotografado na região da Bacia de Contribuição Direta do reservatório de Batalha. ....	12
Figura 2.3: Oferta interna de energia elétrica por fonte geradora. Fonte: EPE (2021) .....	21
Figura 2.4: Registro de erosões na borda imediata do reservatório da UHE Batalha. ....	23
Figura 2.5: Etapas sequenciais para elaboração de mapa de suscetibilidade a partir do método heurístico. Fonte: Hader (2021), adaptado. ....	31
Figura 2.6: Ensaio de Inderbitzen desenvolvido por: a) Fácio (1991); b) Higashi (2006) .....	36
Figura 2.7: Amostras posicionadas para execução do ensaio de perda de massa por imersão	37
Figura 2.8: Esquema do equipamento utilizado para realizar o ensaio de infiltrabilidade. Fonte: Adaptado de Bastos (1999) .....	38
Figura 2.9: Curva típica $L \times t^{1/2}$ e elementos matemáticos para estimativa do coeficiente de sorção (s) para o ensaio de infiltrabilidade da metodologia MCT. Fonte: Adaptado de Bastos (1999) .....	39
Figura 2.10: Carta de classificação de solos da metodologia MCT convencional, adaptado. Fonte: Nogami e Villibor (1995).....	40
Figura 2.11: Propriedades e utilização dos grupos de Solos da MCT, adaptado. Fonte: Nogami e Villibor (1995).....	41
Figura 2.12: Modelos ‘a’ e ‘b’ dos aparelhos de reidratação d’água nas pastilhas. Fonte: Fortes e Nogami (1991).....	42
Figura 2.13: Carta de Classificação do Método das Pastilhas. Fonte: Fortes e Nogami (1991) .....	43
Figura 2.14: Representação esquemática do EDX-720 Shimadzu. Fonte: CAIQ (2022) .....	46
Figura 2.15: Fluxograma do uso da cartografia geotécnica por intermédio dos SIG para suporte a decisões. Fonte: Souza e Romão (2017).....	49
Figura 3.1: Fluxograma da estrutura metodológica desta pesquisa .....	50

Figura 3.2: Imagem de erosão pré cadastrada pelo P&D ANEEL/FURNAS/UFV/UNB. Fonte: Furnas (2021a).....	53
Figura 3.3: Planilha de cadastro de erosões e coleta de amostras .....	54
Figura 3.4: Equipe responsável pelo trabalho de campo.....	55
Figura 3.5: Ficha de cadastramento do Ponto 8 preenchida no campo .....	57
Figura 3.6: Coleta de amostras com a) trado holandês e b) amostrador de amostra indeformáveis tipo copo ou caneco.....	58
Figura 3.7: Amostras deformadas e indeformadas coletadas.....	60
Figura 3.8: Equipamentos utilizados para o ensaio de umidade natural .....	63
Figura 3.9: Preparação da amostra para ensaio de caracterização expedita: a) destorroamento, b) peneiramento, c) espatulação. ....	64
Figura 3.10: Secagem das pastilhas moldadas nos anéis de PVC em suporte vertical .....	65
Figura 3.11: Ensaio de plasticidade para amostra P22A10.....	66
Figura 3.12: Equipamento utilizado para reidratação das pastilhas .....	67
Figura 3.13: Pastilhas após penetração com penetrômetro padrão .....	67
Figura 3.14: Planilhas de cálculo para caracterização MCT expedita para amostra P22A10..	69
Figura 3.15: Equipamento Granulômetro a Laser - Marca Microtrac MRB, modelo Flowsync .....	70
Figura 3.16: Amostra utilizada para realizar o ensaio de granulometria a laser .....	71
Figura 3.17: Equipamento Espectrômetro de Fluorescência de Raios X por Energia Dispersiva (XRF/EDX) .....	71
Figura 3.18: Procedimento de preparo de amostras para realização do ensaio de XRF/EDX.	72
Figura 3.19: Ensaio de massa específica aparente: a) amostras indeformadas; b) e c) preparação das amostras; d) e e) pesagem das amostras em balança hidrostática.....	73
Figura 3.20: Ensaio de perda de massa por imersão. a) Saque de 10mm do corpo de prova; b) Submersão das amostras em água; c) massa despreendida após secagem em estufa. ....	74

Figura 3.21: Comparativo dos ensaios de perda de massa por imersão realizado com amostras extraídas do mesmo ponto e profundidade, mas ensaiadas nas condições de: a) umidade natural; b) umidade higroscópica .....	74
Figura 3.22: Equipamento utilizado para realizar o ensaio de infiltrabilidade .....	75
Figura 4.1: Mapa de localização da área de estudo.....	78
Figura 4.2: Coberturas vegetais presentes na AID de Batalha.....	79
Figura 4.3: Precipitação média na AID de Batalha. Fonte dos dados: ANA, 2012 .....	80
Figura 4.4: Rocha intemperizada do tipo Filito carbonoso. Fenômeno do empastilhamento..	81
Figura 4.5: Diferentes formas de relevo identificadas na BCD de Batalha .....	82
Figura 4.6: Solos do tipo – a) Latossolo vermelho-amarelo; b) Argissolo; c) Plintossolo Pétrico .....	86
Figura 4.7: Perfil de solo do tipo profundo (PP).....	89
Figura 4.8: Perfil de solo do tipo intermediário (PI).....	89
Figura 4.9: a) Perfil de solo do tipo raso (PR); b) Detalhe da interface entre os horizontes....	90
Figura 4.10: Representação das amostras deformadas coletadas no Ponto 22 (P22), com profundidade de até 2,00 metros .....	90
Figura 4.11: Local de amostragem do Ponto 8 (P8).....	91
Figura 4.12: Apresentação gráfica da variação da umidade por camada .....	93
Figura 4.13: Detalhes das amostras deformadas P22A9 e P22A10 .....	96
Figura 4.14: Registro fotográfico do local do Ponto 22.....	96
Figura 4.15: Resultados dos ensaios de granulometria Sem Ultrassom (SU) e Com Ultrassom (CU) para as amostras do Ponto 22.....	97
Figura 4.16: Resultados gráficos do ensaio de granulometria para o Ponto 7 nas condições SU e CU.....	100
Figura 4.17: Resultados gráficos do ensaio de granulometria para o Ponto 8 nas condições SU e CU .....	100
Figura 4.18: Resultados gráficos do ensaio de granulometria para o Ponto 13 nas condições SU e CU.....	101

Figura 4.19: Resultados gráficos do ensaio de granulometria para o Ponto 22 nas condições SU e CU.....	102
Figura 4.20: Resultados gráficos do ensaio de granulometria para o Ponto 23 nas condições SU e CU.....	102
Figura 4.21: Resultados gráficos do ensaio de granulometria para o Ponto 24 nas condições SU e CU.....	103
Figura 4.22: Metais presentes nas amostras ensaiadas – Ensaio EDX.....	103
Figura 4.23: Ensaio de infiltrabilidade do Ponto 7 para as umidades natural e higroscópica	106
Figura 4.24: Ensaio de infiltrabilidade do Ponto 22 para as umidades natural e higroscópica .....	107
Figura 4.25: Ensaio de infiltrabilidade do Ponto 24 para as umidades natural e higroscópica .....	107
Figura 4.26: a) Comportamento da curva durante o ensaio de infiltrabilidade. b) Fórmula de cálculo do coeficiente de sorção. Fonte: Adaptado de Bastos (1999).....	108
Figura 4.27: Apresentação gráfica da erodibilidade – Critério MCT – para as amostras ensaiadas .....	110
Figura 4.28: Apresentação gráfica da erodibilidade – Critério MCT modificado pela autora – para as amostras ensaiadas (detalhe). Região ‘tendencialmente erodível’.....	111
Figura 4.29: Processos erosivos identificadas durante o trabalho de campo .....	113
Figura 4.30: Mapa de distribuição das feições erosivas para a BCD da UHE Batalha.....	114
Figura 4.31: Mapa Geológico da BCD da UHE Batalha .....	116
Figura 4.32: Mapa Geomorfológico – Unidades de relevo da BCD da UHE Batalha.....	118
Figura 4.33: Mapa de solos da BCD da UHE Batalha .....	120
Figura 4.34: Mapa Litológico da BCD da UHE Batalha .....	122
Figura 4.35: Mapa Hipsométrico da BCD da UHE Batalha .....	124
Figura 4.36: Mapa do Comprimento do Fluxo da BCD da UHE Batalha .....	126
Figura 4.37: Mapa de declividade da BCD da UHE Batalha.....	128
Figura 4.38: Mapa de HAND da BCD da UHE Batalha.....	130

Figura 4.39: Gráfico do uso e cobertura do solo da BCD da UHE Batalha.....	131
Figura 4.40: Mapa de Uso e Cobertura do Solo da BCD da UHE Batalha.....	132
Figura 4.41: Mapa de dissecação do relevo da BCD da UHE Batalha .....	134
Figura 4.42: Mapa de Curvaturas do relevo da BCD da UHE Batalha.....	136
Figura 4.43: Mapa antropogênico da BCD da UHE Batalha .....	138
Figura 4.44: Mapa de erodibilidade da BCD da UHE Batalha .....	140
Figura 4.45: Mapa de suscetibilidade às erosões laminares da BCD da UHE Batalha.....	142
Figura 4.46: Mapa de suscetibilidade às erosões lineares da BCD da UHE Batalha.....	145

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Classes de solo; modificado de Embrapa (2018) .....	13
Tabela 2.2: Sistema de classificação Highway Research Board (HRB). Fonte: Pastore e Fontes (1998). .....	15
Tabela 2.3: Critérios para a classificação dos solos pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). Fonte: Pastore e Fontes (1998). .....	15
Tabela 2.4: Definições do termo suscetibilidade adotada por diversos autores.....	30
Tabela 2.5: Classes de erodibilidade por unidade pedológica. Fonte: Salomão et al. (2012)..	32
Tabela 2.6: Classes de erodibilidade em função da declividade dos solos. Fonte: Salomão et al. (2012) .....	32
Tabela 2.7: Classes de suscetibilidade à erosão laminar, compatibilizadas às classes de capacidade de uso da terra. Fonte: Salomão et al. (2012).....	32
Tabela 2.8: Comparativo das Classificações MCT convencional e expedita. Fonte: Fortes e Nogami (1991) .....	44
Tabela 3.1: Localização geográfica e sucinta descrição preliminar de cada ponto cadastrado	59
Tabela 3.2: Mapas elaborados e suas respectivas escala dos dados.....	61
Tabela 3.3: Metadados utilizados para elaboração dos mapas.....	62
Tabela 3.4: Correlação das características da amostra com o grau de plasticidade .....	66
Tabela 3.5: Valores aferidos durante os ensaios de infiltrabilidade.....	76
Tabela 4.1: Erosões pré-cadastradas pelo P&D SEDIMENTOS. Fonte: Furnas, 2021a.....	85
Tabela 4.2: Erosões cadastradas durante o trabalho de campo .....	87
Tabela 4.3: Resumo dos perfis observados .....	90
Tabela 4.4: Apresentação numérica da variação da umidade por camada.....	92
Tabela 4.5: Índices físicos obtidos para as amostras indeformadas.....	94
Tabela 4.6: Resultado da caracterização e classificação para as amostras deformadas.....	95
Tabela 4.7: Frações de argila, silte e areia das amostras ensaiadas para as condições SU e CU, com base na ABNT NBR 6502/2022 .....	98

Tabela 4.8: Resultados da erodibilidade específica ( $\rho_i$ ) das amostras ensaiadas nas condições de umidade natural e higroscópica. ....	104
Tabela 4.9: Cálculo da erodibilidade mediante critério MCT.....	110
Tabela 4.10: Solos identificáveis na BCD da UHE Batalha .....	119
Tabela 4.11: Curvaturas horizontal e vertical da vertente da BCD da UHE Batalha .....	135
Tabela 4.12: Regras para o geoprocessamento do mapa de suscetibilidade linear da BCD da UHE Batalha .....	143
Tabela 4.13: Classes de suscetibilidade a erosões lineares identificadas na BCD da UHE Batalha .....	144
.....	
.....	

## **1. INTRODUÇÃO**

Neste capítulo, introdutório, são apresentados a justificativa da presente pesquisa bem como seus objetivos, geral e específicos. Além disso, descreve-se a estrutura da dissertação.

### **1.1. JUSTIFICATIVA DA PESQUISA**

A intensa busca pelo crescimento e fortalecimento econômico perpassa pelo aumento das demandas da sociedade nos diversos setores da economia. O setor secundário - que corresponde às atividades voltadas para a indústria, produção de bens de consumo, construção civil e geração de energia - é muito impactado pelo aumento das demandas sociais. No Brasil há uma grande demanda para o setor energético, pois o consumo energético pauta cada vez mais a vida em sociedade. Não há como se pensar no convívio social sem que as tecnologias e os equipamentos eletroeletrônicos estejam presentes. Portanto, o desenvolvimento econômico e social do país liga-se diretamente à evolução do setor energético, principalmente o elétrico.

O setor elétrico é dividido em subsetores de: geração, transmissão, distribuição e comercialização. O subsetor de geração envolve, de forma simplificada, a produção de energia. Suas fontes geradoras são diversas, como por exemplo: eólica, térmica, solar, nuclear e hidrelétrica. Devido a quantidade de reservas de água doce, considerada uma das maiores do mundo, no Brasil é bastante significativa a geração hidrelétrica (EPE, 2021), cuja a produção é realizada por Usinas Hidrelétricas (UHEs), com realização de grandes obras de engenharia para construção de barramentos, que têm por função represar a água que atuará na produção de energia.

A licitação para construção e concessão da UHE Batalha foi vencida pela empresa FURNAS, em meados de 2005, e a obra inaugurada em 2014. Esta UHE está localizada na bacia do rio São Marcos, um dos principais afluentes da margem direita do rio Paranaíba, entre os municípios de Cristalina (GO) e Paracatu (MG), com um reservatório de 138 km<sup>2</sup>. Por ser um reservatório relativamente recente, e devido à importância dessa usina, tornou-se relevante estudar os fatores que envolvem a eficiência do seu potencial de geração energética, avaliando os impactos que os processos erosivos em desenvolvimento ou já desenvolvidos poderão causar no entorno das bordas de seu reservatório (Matamoros Sevilla, 2016).

A gestão de UHEs é complexa e envolve diversos fatores. Dentre eles, os mais desafiadores estão no gerenciamento dos aspectos sociais e ambientais – socioambientais – que envolvem as UHEs e seus respectivos reservatórios (lagos artificiais).

Os impactos socioambientais causados pela implantação de reservatórios artificiais são diversos, envolvendo o reservatório desde seu planejamento, passando pelas fases de construção da barragem, enchimento, até a fase de operação. Portanto, qualquer que seja a fase do barramento, haverá impactos ambientais. Tais impactos podem envolver: intervenção nos cursos d'água, no relevo, na fauna e na flora, dentre outros recursos naturais, modificação do meio ambiente, interferência na vida da sociedade e dos seres vivos e recursos minerais.

O planejamento do controle dos impactos socioambientais deve ser prioridade nos estudos de viabilidade técnica, econômica e socioambiental do empreendimento. Grandes desafios ambientais presentes desde a fase construtiva, e que podem impactar muito o barramento durante a fase de operação são os processos erosivos que podem ser intensificados ou deflagrados. Na fase executiva, por exemplo, as áreas de empréstimos devem ser executadas priorizando técnicas que evitem deflagrar erosões futuras. Já na fase de operação, a proteção ambiental visa, principalmente, evitar erosões de borda e nas bacias de contribuição, pois as erosões nelas geradas conduzirão sedimentos ao reservatório, reduzindo sua vida útil (Camapum de Carvalho *et al.*, 2017)

Os reservatórios, sejam grandes ou pequenos, geralmente coexistem com erosões de diversas magnitudes e com a deposição dos sedimentos, os quais podem ter origem em locais mais distantes à montante das margens desses mananciais ou em locais mais próximos, e ser depositados: (a) ao longo dos cursos d'água de suas bacias de contribuição e/ou (b) no próprio reservatório. A depender da magnitude dessas erosões e do local de deposição dos sedimentos, podem ocorrer prejuízos significativos à geração energética da UHE, diminuindo a vida útil desta. Por isso, é importante o controle dos processos erosivos nas bordas dos reservatórios. Para se projetar uma forma de controle que permita minimizar ou mesmo conter os processos erosivos, é necessário se fazer um levantamento para mapear e diagnosticar as ocorrências na área de estudo.

Sonoda *et al.* (2017) indicam possíveis diagnósticos aos processos erosivos. Para estes autores, o processo erosivo e sua evolução estão ligados ao uso e ocupação do solo, sendo, portanto, uma questão também de cunho social quanto à origem. Assim, o acúmulo de sedimentos que ocorre nos reservatórios pode ter ligação com as ações do próprio homem, no

uso e ocupação indiscriminados do solo, nas mudanças climáticas de origem antrópica, e ainda com relação direta com a construção do próprio reservatório. Logo, é importante diagnosticar os processos erosivos, a fim de que sejam traçadas estratégias para medidas a serem adotadas, as quais podem ser executadas de acordo com as particularidades dos reservatórios e dos respectivos entornos.

Assim, este trabalho justifica-se na necessidade de preservar a capacidade de geração das usinas hidrelétricas, tendo em vista, no mínimo, a manutenção de sua vida útil e minimizar e/ou controlar os impactos ambientais causados pela erosão e posterior deposição de sedimentos nos reservatórios. Para tanto, é essencial a aplicação de uma metodologia científica com viés experimental e informatizado. Essa aplicação pode ser realizada por meio de Sistemas de Informação Geográfica e Geoprocessamento, utilizando bancos de dados georreferenciados. Além disso, a compartimentação morfopedológica poderá contribuir para essa análise, de modo que seja possível traçar uma inter-relação, que subsidie o entendimento dos condicionantes dos processos erosivos hídricos, por meio do conhecimento dos materiais inconsolidados, os quais ocorrem associados ao relevo, cujas relações antrópicas que ocorrem sobre essa superfície podem acelerar ou mesmo deflagrar tais processos, nas bordas do reservatório da Usina Hidrelétrica Batalha (GO/MG).

Desse modo, esta dissertação se vincula a um projeto de pesquisa e desenvolvimento tecnológico, intitulado “Modelagem em Diversas Escalas da Geração de Sedimentos em Erosões e o Aporte em Reservatórios de UHEs” - PD-0394-1705/2017, regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, com coordenação técnica e financiamento da Eletrobras FURNAS, realizado pela Universidade Federal de Goiás e pela Universidade de Brasília.

## **1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO**

O presente trabalho consta com objetivos geral e específicos que serão norteadores para definição metodológica das atividades a serem desenvolvidas.

### **1.2.1. OBJETIVO GERAL**

Identificar e analisar, na Área de Influência Direta (AID) do reservatório de Batalha, os principais fatores condicionantes e deflagradores dos processos erosivos hídricos, de modo

a determinar a suscetibilidade à erosão em uma Bacia de Contribuição Direta (BCD) do reservatório da UHE Batalha (GO/MG).

### **1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar as feições erosivas existentes;
- Contribuir para a alimentação do banco de dados georreferenciados das feições erosivas;
- Avaliar a relação entre a ocupação do solo e a ocorrência de processos erosivos hídricos, visando constatar o nível de alteração antrópica a partir das diferentes intervenções;
- Formular e avaliar hipóteses que expliquem a gênese e evolução dos processos erosivos;
- Avaliar as informações levantadas para realizar um diagnóstico que permita definir diferentes graus de suscetibilidade que ocorrem nas bordas do reservatório da UHE Batalha.

### **1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos e 3 anexos.

No primeiro capítulo, é contextualizado o problema que motivou a realização desta pesquisa e apresentam-se os objetivos geral e específico do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica, descrevendo os fundamentos teóricos estudados e considerados relevantes para a dissertação, iniciando-se pelos conceitos basilares de formação dos solos, abrangendo processos erosivos, seus fatores condicionantes e deflagradores e o impacto que os sedimentos desprendidos das bordas dos reservatórios podem ocasionar em reservatórios de Usinas Hidrelétricas. Este capítulo também abrange a descrição do meio físico da bacia do rio São Marcos, onde se localizam as bordas do reservatório da UHE Batalha, nas quais foi realizado o estudo. Compõem, também, este capítulo, fundamentos teóricos a respeito de temas relacionados a Cartografia Geotécnica, os Sistemas de Informação Geográfica, o Geoprocessamento e os ensaios laboratoriais da metodologia MCT, para análise da erodibilidade dos solos.

No Capítulo 3 é apresentada a metodologia adotada na presente pesquisa. São detalhadas as etapas metodológicas compartmentadas em 3 etapas: análise geoespacial, trabalho de campo e estudo da erodibilidade. Cada etapa conta com subdivisões, tais como propostos nos objetivos específicos a serem alcançados.

No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos, iniciando-se com os provenientes da caracterização geotécnica pelo método MCT (Miniatura, Compactada, Tropical). Posteriormente, são apresentados os resultados dos ensaios de erodibilidade, seguidos pela apresentação dos mapas elaborados por meio do uso de Sistemas de Informação Geográfica.

O Capítulo 5 sintetiza as conclusões da presente pesquisa, juntamente com algumas sugestões para pesquisas futuras. Na parte final desta dissertação, são apresentadas as referências bibliográficas e os anexos, nos quais estão apresentados dados complementares da pesquisa e registros fotográficos, dos ensaios e do trabalho de campo.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

Este capítulo descreve os fatores que interferem no equilíbrio natural do processo de formação dos solos de modo a influenciar a ocorrência de erosões que impactarão na vida útil de reservatórios de Usinas Hidrelétricas. Assim, o objetivo principal deste capítulo é abordar os conceitos essenciais e norteadores ao desenvolvimento desta pesquisa.

### **2.1. SOLOS**

Do ponto de vista geotécnico, diversos autores têm suas definições de solo coincidentes. Para eles, os solos são constituídos pela combinação de partículas sólidas de grãos minerais, e espaços vazios que podem ser ocupados por líquido – geralmente água – ou gás – ar (Caputo, 1988; Das, 1999; Pinto, 2006; Embrapa, 2018). O solo é um material natural, heterogêneo e poroso, abundante na natureza e que recobre grandes extensões de nosso planeta devido à alteração da rocha, principalmente pelo intemperismo físico, químico ou biológico.

A modificação em um dos fatores de formação, como por exemplo, a retirada da vegetação natural, pode causar mudanças nos processos que originam os solos ou mesmo intensificar os processos erosivos que ocorreriam naturalmente. Essas intervenções podem assim acelerar processos que já ocorreriam, como acontece no caso de processos erosivos hídricos comuns em solos que já tem propriedades que os tornam suscetíveis, incluindo sua textura, em presença de, por exemplo, relevos inclinados. Uma vez que a cobertura vegetal original seja retirada, os processos que ali já ocorrem, podem ser intensificados. Logo, as ações antrópicas podem acentuar ou minimizar a suscetibilidade do terreno aos processos erosivos hídricos.

#### **2.1.1. FORMAÇÃO DOS SOLOS**

Os solos podem ser formados por processos físicos e químicos de alteração das rochas, ou oriundos da decomposição ou do acúmulo de matéria orgânica (Caputo, 1988; Das, 2007). A formação do solo é, portanto, resultado da ação conjunta de agentes ativos, como o clima e a biosfera, e passivos, como o relevo, o tempo e a rocha que constituía inicialmente a crosta terrestre (Pinto, 2006; Leão, 2018). O solo pode ser resultante da rocha *in situ* ou ainda ter sido transportado de um local para o outro.

O intemperismo é o principal processo que desagrega e decompõe as rochas transformando-as em solos (Das, 2007). O intemperismo pode ser considerado como uma resposta à mudança de ambiente que ocorre na interface atmosfera-litosfera (Caputo, 1988). Nas regiões tropicais, tal qual o Brasil, os efeitos intempéricos atuam fortemente nas rochas e na contínua maturidade dos solos, resultando no desenvolvimento de extensos e profundos perfis de solo (Leão, 2018). Este processo gera a formação de solos no mesmo local da rocha que lhe originou (in situ), e são chamados de solos residuais. Estes solos podem ser subdivididos em categorias, dentre eles, os mais importantes, segundo Caputo (1988) são os lateríticos, os expansivos e os porosos.

Cardoso (2002) define a laterização dos solos como um o processo pedogenético consequente do desenvolvimento de um pH superficial ligeiramente ácido (~ 4,5 e 7,0), permitindo intensa lixiviação do silício na forma de  $\text{Si(OH)}_4$  e das bases na forma de cátions dissolvidos. Favorecendo a precipitação do alumínio e ferro férrico na forma de  $\text{Fe(OH)}_3$  e  $\text{Al(OH)}_3$ , enquanto ocorre o enriquecimento relativo de Al e Fe nestes horizontes do solo sob a forma de óxidos.

Para Cardoso (2002) os solos lateríticos, apesar de formados a partir de um único processo, podem englobar vários tipos de produtos, pois a intensidade do processo pode variar de local para local, assim como o tipo de material de origem, tempo de atuação do processo, relevo, atividade biológica etc. Ou seja, para este autor os solos lateríticos podem ser, por exemplo, porosos.

A Figura 2.1 apresenta um esquema descrevendo o processo de formação dos solos com base nas definições e conceitos de Caputo (1988), Cardoso (2002) e Leão (2018).

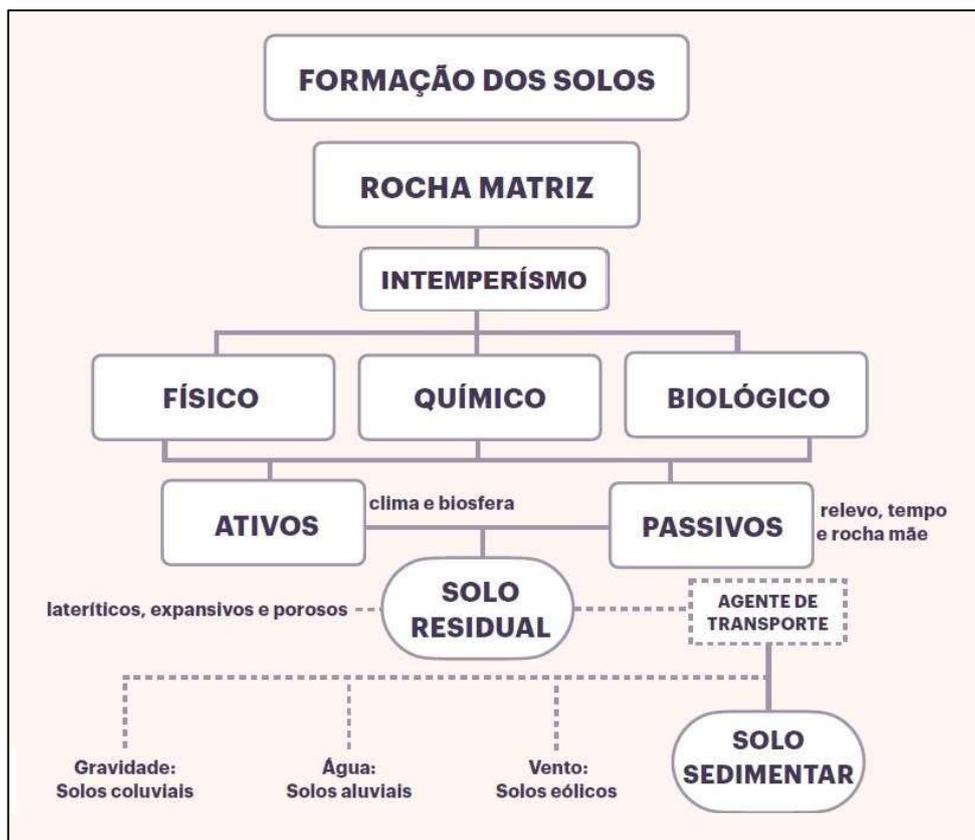


Figura 2.1: Esquema do processo de formação dos solos. Baseado em Caputo (1988), Cardoso (2002) e Leão (2018)

Nem sempre o solo encontrado em determinada região é resultado da decomposição da rocha in situ, pois as partículas desagregadas das rochas e ou de solos pré-existentes podem ser transportadas por um agente para um local distinto de sua formação. Deste modo, os solos transportados podem ser chamados de sedimentares ou transportados e classificam-se em função dos seus agentes de transporte: gravidade - solos coluviais; água - solos aluviais; vento - solos eólicos. Mas podendo, também, ter agentes de transportes combinados, gerando, por exemplo, solos do tipo colúvio-aluvionares.

Solos coluviais são formados por fragmentos de rocha e solo, transportados pela ação da gravidade e depositados ao longo dos segmentos côncavos de rampas de colúvio. Neste processo de deposição pode ocorrer que os fragmentos mais grosseiros sejam deslocados para o pé das encostas, podendo as partículas finas (argila) serem removidas. Tais partículas finas ao serem removidas promovem, aos solos chamados de depósitos de tálus, de grande permeabilidade e instabilidade.

Solos aluviais são aqueles transportados por grandes volumes de água e compostos por partículas e graduação variada a depender da diversidade do regime e épocas de deposição, por isso, frequentemente são utilizados como jazidas de materiais de construção (Pinto, 2006). No

entanto, os depósitos propriamente ditos, possuem características de solos pouco compacto e de profundidade variável. Além disso, em razão da velocidade das águas no momento da deposição, pode ocorrer variação na constituição destes solos, de modo que ocorrem com frequência argilas ou siltes orgânicos, que podem representar materiais geotecnicamente pouco resistentes (Pinto, 2006; Leão, 2018).

Solos eólicos têm o vento como seu principal agente de transporte e deposição. Os solos apresentam grãos arredondados e bem selecionados, o que conseqüentemente representa grande suscetibilidade à erosão em condições saturadas com água, ou seja, quando a água ocupa os espaços vazios da rocha (Leão, 2018).

No processo de formação dos solos, a influência das erosões também deve ser considerada, pois, conforme informa Pastore e Fontes (1998), as erosões favorecem a modificação do relevo, que, por sua vez, interfere na dinâmica da água, intensificando e favorecendo os processos pedogenéticos.

Segundo Arcaya (2007) o processo inverso da formação dos solos é o processo erosivo, pois, por intermédio dele que as camadas ou horizontes do solo tem seus constituintes removidos, sobretudo pela ação da água de chuvas. Portanto, para esta autora, na superfície da terra há um quadro extremamente dinâmico no qual diversos processos atuam de forma contraditória, formando e erodindo os solos.

Os processos de formação de solos e erosão podem ser considerados, em condições normais, como um quadro de equilíbrio na natureza. Assim, embora a erosão possa colaborar com o processo de formação dos solos, também pode favorecer o seu transporte, oportunizando a ocorrência de diferentes tipos de solos. Entretanto, pode ocorrer o rompimento do equilíbrio quando a erosão é intensificada. Isso ocorre, por exemplo, quando os processos erosivos aceleram, sendo mais velozes que os processos de formação dos solos, não permitindo que estes se regenerem.

Quando a erosão é desencadeada por alterações das condições geológicas ou climáticas - erosões naturais - em condições normais, seus efeitos serão lentos e podem ocorrer ao longo de milhares de anos. No entanto, quando intensificada pelo homem (erosão antrópica), seus efeitos podem ocorrer em poucos anos, podendo ocasionar perda total do solo, impedindo a realização de importantes atividades humanas, como o uso agrícola do solo, e constituindo assim um altíssimo índice de degradação da superfície da terra (Arcaya, 2007).

### 2.1.2. PERFIS DOS SOLOS

Pastore e Fontes (1998) esclarecem que o estudo da sequência de camadas resultantes da decomposição das rochas é de suma importância para diversas atividades do homem, principalmente nas construções. Para os autores, diversos trabalhos foram desenvolvidos com o intuito de propor terminologias para designar as diferentes camadas de um perfil de alteração, gerando, com isto, uma ampla variedade de termos, os quais ainda não foram padronizados.

Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, desenvolvido pela EMBRAPA (2018), os solos, quando examinados a partir da superfície, consistem de seções aproximadamente paralelas, organizadas em camadas e/ou horizontes. Os horizontes refletem os processos de formação do solo a partir do intemperismo do substrato rochoso ou de sedimentos de origens diversas.

Conforme ocorrem os processos de intemperismo, a camada de detritos torna-se mais espessa e se diferencia em subcamadas morfologicamente distintas (designadas como horizontes), formando os perfis de solo. Os horizontes pedogenéticos são assim designados quando refletem a ação da pedogênese; quando não refletem esta ação, convém denominá-los de camadas (Pastore e Fontes, 1998).

Os horizontes e as camadas são descritos por Salomão e Antunes (1998), com vieses pedológicos, pelas letras maiúsculas: O, H, A, E, B, C, F e R. Para estes autores, os horizontes apresentam características que os distinguem, conforme a camada se aprofunda em direção à rocha sã, deste modo:

- Horizonte O: consiste na camada orgânica superficial, em que não há impedimento à drenagem;
- Horizonte H: é uma camada orgânica resultante do acúmulo de resíduos e substâncias húmicas, com água estagnada por períodos prolongados;
- Horizonte A: é a região em que o solo perde material para as camadas mais profundas e possui matéria orgânica mineralizada;
- Horizonte E: é um horizonte mineral, localizado abaixo do horizonte A, diferenciando-se deste pela coloração mais clara devido a remoção de argilominerais;
- Horizonte B: é subsuperficial e apresenta-se com transformações acentuadas do material de origem e/ou ganho de constituintes minerais e/ou inorgânicos migrados de outros horizontes;

- Horizonte C: configura-se como pouco afetado pelos processos pedogenéticos, sendo designado como substrato pedogenético;

- Horizonte F: consiste de material mineral consolidado, isto é, pela rocha matriz pouco decomposta;

- Horizonte R: corresponde ao substrato rochoso caracterizados pela rocha matriz não decomposta.

Pastore e Fontes (1998) denominam e caracterizam os horizontes com base em diversas proposições existentes, caracterizando sete horizontes num perfil de alteração completo; são eles:

- Horizonte de solo orgânico (I): apresentam-se em praticamente todos os perfis na parte superficial e em pequena espessura. Corresponde ao horizonte A pedológico;

- Horizonte laterítico (II): formado por solos residuais ou que sofreram processos de evolução pedológica, como a laterização. Não apresenta estrutura típica da rocha de origem. Apresenta cores predominantes em tons avermelhados e amarelados. Corresponde ao horizonte B pedológico;

- Horizonte do solo saprolítico (III): composto por solo residual, apresentando estrutura reliquiar da rocha de origem. Pode apresentar até 10% de blocos de rocha. Apresenta cores predominantes com tonalidades branca, creme, roxo e amarelo-claro;

- Horizonte saprolítico ou saprolito (IV): perfil de transição entre o maciço de solo e o maciço rochoso. Apresenta blocos de rocha em diferentes estágios de alteração e dimensões variáveis. Apresenta entre até 10-90% de blocos de rocha;

- Horizonte de rocha muito alterada (V): perfil caracterizado por rocha alterada;

- Horizonte de rocha alterada (VI): perfil com rocha iniciando o processo de alteração;

- Horizonte de rocha sã (VII): perfil caracterizado por rocha predominantemente sã.

A Figura 2.2 apresenta um modelo de perfil de solo hipotético e diversos perfis reais fotografados na região da Bacia de Contribuição Direta do reservatório de Batalha.

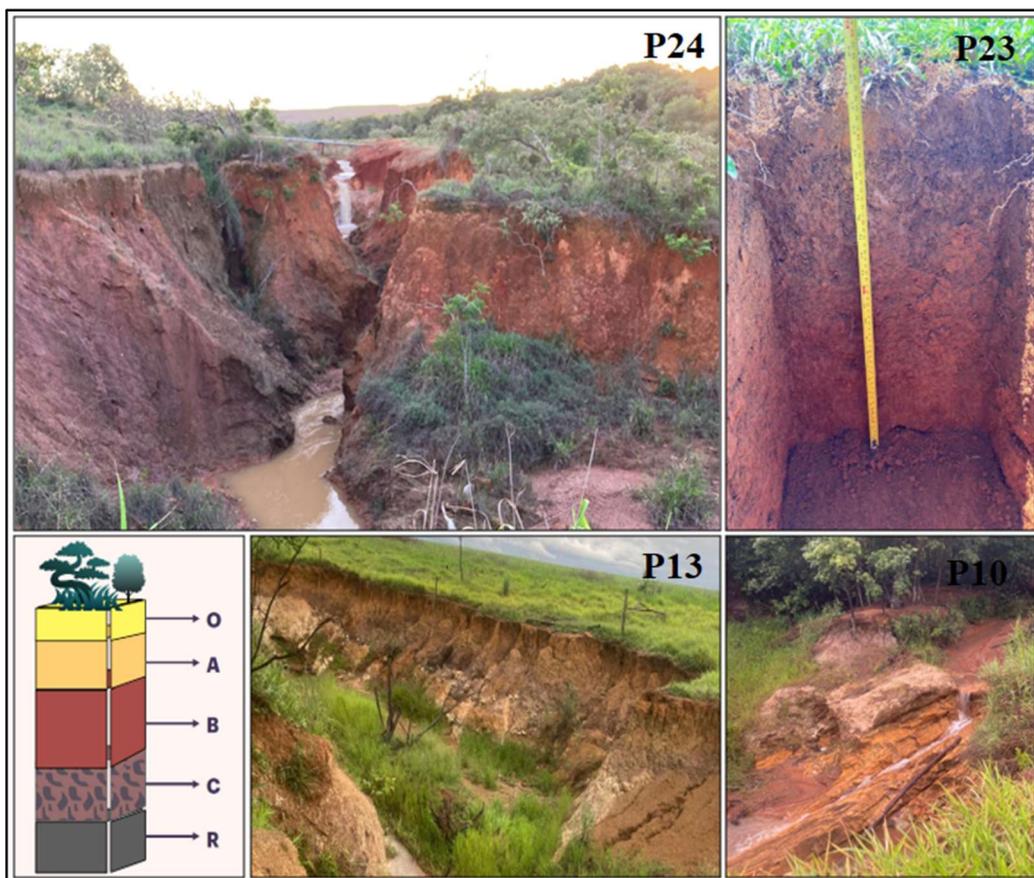


Figura 2.2: Modelo de perfil de solo hipotético e perfis reais fotografado na região da Bacia de Contribuição Direta do reservatório de Batalha.

### 2.1.3. CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

Para o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), proposto pela EMBRAPA (2018), a definição dos horizontes diagnósticos de solos deve considerar, indispensavelmente, para a caracterização e a classificação do solo: todas as características físico morfológicas, como por exemplo, as cores úmida e seca dos horizontes superficiais (H ou O, A e AB) e as cores úmidas dos subsuperficiais, conforme a caderneta de cores Munsell (1994), a textura, a estrutura, a cerosidade, a consistência, a transição e características como nódulos, concreções, *slickensides*, superfícies de compressão e outras (Embrapa, 2018).

O SiBCS adota níveis categóricos para classificação dos solos, que consistem num conjunto de classes definidas segundo atributos diagnósticos em um mesmo nível de generalização ou abstração, e incluem todos os solos que satisfizerem a essa definição. Deste modo, são 6 níveis categóricos adotados pelo SiBCS: 1º nível categórico (ordens), 2º nível categórico (subordens), 3º nível categórico (grandes grupos), 4º nível categórico (subgrupos), 5º nível categórico (famílias) e 6º nível categórico (séries).

No primeiro nível categórico (ordem), são formados 13 nomes das classes a partir da associação de um elemento formativo com a terminação “-ssolos”, são eles: argissolo, cambissolo, chernossolo, espodossolo, gleissolo, latossolo, luvisso, neossolo, nitossolo, organossolo, planossolo, plintossolo e vertissolo. A Tabela 2.1 apresenta os nomes de algumas classes em ordem alfabética, seus respectivos elementos formativos, significados, cor e textura.

Tabela 2.1: Classes de solo; modificado de Embrapa (2018)

CLASSES	ELEMENTOS FORMATIVOS	TERMOS DE CONOTAÇÃO E DE MEMORIZAÇÃO	COR E TEXTURA
ARGISSOLO	ARGI	Do latim, <i>argilla</i> , “argila”: Solos com processo de acumulação de argila.	Cores avermelhadas ou amareladas e mais raramente brunadas ou acinzentadas. Textura varia de arenosa a argilosa e de média a muito argilosa.
CAMBISSOLO	CAMBI	Do latim, <i>cambiare</i> , “trocar”, “mudar”: Solos em trans/formação. Horizonte B incipiente.	Cores bruna ou bruno-amarelada até vermelho-escura, de alta a baixa saturação. Textura francoarenosa ou mais argilosa.
GLEISSOLO	GLEI	Do russo, <i>gley</i> , “massa do solo pastosa”: Excesso de água. Horizonte glei	Cores acinzentadas, azuladas ou esverdeadas, expressão das cores neutras dos minerais de argila. Textura arenosa (areia ou areia franca) somente nos horizontes superficiais, desde que seguidos de horizonte glei de textura francoarenosa ou mais fina
LATOSSOLO	LATO	Do latim, <i>lat</i> , “material muito alterado”: Solos muito intemperizados. Horizonte B latossólico	Cores variam desde amarelas ou mesmo bruno-acinzentadas até vermelho-escuro-acinzentadas, nos matizes 2,5YR a 10YR. Textura mais leve (de composição arenoquartzosa)
NEOSSOLO	NEO	Do grego, <i>neo</i> , “novo”: Solos com pouco desenvolvimento pedogenético	--
NITOSSOLO	NITO	Do latim, <i>nitidus</i> , “brilhante”: Superfícies com estruturas brilhantes. Horizonte B nítico.	Cores variando de vermelha a brunada. Textura argilosa ou muito argilosa gradiente textural igual ou menor que 1,5.
ORGANOSSOLO	ORGANO	Do latim, <i>organicus</i> , “pertinente dos compostos de carbono”: Solos com grande constituição orgânica. Horizonte H ou O.	Cores preta, cinzenta muito escura ou brunada, devidas ao material orgânico.

Pastore e Fontes (1998), apresentam diversos métodos de classificação dos solos, tais como: texturais ou granulométricos; genéticos (geológica e pedológica); convencionais (SUCS, HRB); geotécnicos não-convencionais (MCT); geotécnicos expeditos (SUCS e MCT).

Na classificação textural ou granulométrica há agrupamento do solo de acordo com o tamanho de suas partículas, obtidos no ensaio de granulometria. A NBR 6502/95 divide os solos nas seguintes frações:

- Argila: partícula com diâmetro inferior a 0,005 mm;
- Silte: partícula com diâmetro entre 0,005 mm e 0,05 mm;
- Areia fina: partícula com diâmetro entre 0,05 mm e 0,42 mm;
- Areia média: partícula com diâmetro entre 0,42 mm e 2,0 mm;
- Areia grossa: partícula com diâmetro entre 2,0 mm e 4,8 mm;
- Pedregulho: partícula com diâmetro entre 4,8 mm e 76 mm;

As classificações genéticas mais usuais na geologia de engenharia, segundo Pastore e Fontes (1998) são as geológicas e as pedológicas. A classificação geológica baseia-se na análise tátil-visual, interpretando a gênese do solo e as observações de campo com relação a morfologia e a estratigrafia. A classificação pedológica, por sua vez, estuda basicamente a parte mais superficial dos perfis de solo, avaliando a atuação de fatores pedogenéticos de transformação da rocha matriz (processos intempéricos). Em ambas as classificações não é possível prever diretamente as propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos.

As classificações convencionais são aquelas que consideram as propriedades geotécnicas do solo. Portanto, baseiam-se nos ensaios de granulometria e limites de Atterberg (Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade). As classificações convencionais mais utilizadas são as SUCS – Sistema Unificado de Classificação de Solos – com base na classificação de Casagrande, e a HRB – *Highway Research Board* – também conhecida como AASHTO – é mais usualmente aplicada para construção de estradas. A Tabela 2.2 apresenta os procedimentos para classificação de solos pelo HRB, de acordo com a norma AASHTO (1973). A Tabela 2.3 apresenta os critérios para a classificação dos solos nos grupos SUCS, que se baseia no Coeficiente de curvatura (Cc) e no Coeficiente de uniformidade (Cu).

Tabela 2.2: Sistema de classificação Highway Research Board (HRB). Fonte: Pastore e Fontes (1998).

CLASSIFICAÇÃO GERAL	SOLOS GRANULARES 35% OU MENOS PASSANDO NA PENEIRA 200#							SOLOS SILTOSOS E ARGILOSOS MAIS DE 35% PASSANDO NA PENEIRA 200#				
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7	
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5	A-7-6
Análise granulométrica												
% passando na 2,00 mm	50 mx											
% passando na 0,42 mm	30 mx	50 mx	51 mi									
% passando na 0,075 mm	15 mx	25 mx	10 mx	35 mx	35 mx	35 mx	35 mx	36 mi	36 mi	36 mi	36 mi	
Características da fração passada na peneira 0,42 mm												
Limite de liquidez				40 mx	41 mi	40 mx	41 mi	40 mx	41 mi	40 mx	41 mi	
Índice de plasticidade	6 mx		NP	10 mx	11 mx	11 mi	11 mi	10 mx	10 mx	11 mi	11 mi	
Tipo de material	Frag. pedra pedregulho e areia		Areia fina	Pedregulho e areias siltosas e argilosas				Solos siltosos		Solos argiloso		
Comportamento como camada do pavimento	Excelente a bom							Regular a mau				
Solos altamente orgânicos podem ser classificados como A8												
Índice de plasticidade do subgrupo A-7-5 é igual ou menor do que (LL-30)												
NP = não plástico. mx = máximo. mi = mínimo.												

Tabela 2.3: Critérios para a classificação dos solos pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). Fonte: Pastore e Fontes (1998).

CRITÉRIOS PARA DETERMINAÇÃO DOS SUBGRUPOS E NOMES DOS GRUPOS				CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS		
ENSAIOS DE LABORATÓRIO				SÍMBOLO GRUPO	NOME DOS GRUPOS	
Solos Grossos	Pedregulhos. Mais que 50% da fração grossa retida na peneira 4,8 mm	Pedregulhos limpos; % passada na peneira 0,074mm < 5%	$Cu > 4 / 1 < Cc <$	GW	Pedregulho bem graduado	
			$Cu < 4 \text{ e/ou } 1 > Cc > 3$	GP	Pedregulho mal graduado	
% retida na peneira 0,074mm maior que 50% Diâmetro menor que 75mm	Areias. Mais que 50% da fração passa na peneira 4,8 mm	Pedregulhos com finos; % passada na peneira 0,074mm > 12%	Finos classificados como	ML MH CL CH	GM GC	Pedregulho siltoso Pedregulho argiloso
		Areias limpas: % passada na peneira 0,074mm > 5%	$Cu > 6, 1 < Cc < 3$	SW	Areia bem graduada	
		Areias limpas % passada na peneira 0,074mm > 12%	Finos classificados como	ML MH CL CH	SM SC	Areia siltosa Areia argilosa
Solos Finos	Siltos e argilas	Inorgânicos	$IP > 7$ , pontos sobre ou acima da linha A.	CL	Argila pouco plástica	
			$IP < 4$ , pontos abaixo da linha A.	ML	Silte	
	LL < 50%	Orgânicos	LL seco < 0,75 LL natural	OL	Argila Orgânica Silte Orgânico	
% passada na peneira 0,074mm maior que 50%	Siltos e argilas	Inorgânicos	Pontos sobre ou acima da linha A.	CH	Argila muito plástica	
			Pontos abaixo da linha A.	MH	Silte elástico	
	LL > 50%	Orgânicos	LL seco < 0,75 LL natural	OH	Argila orgânica Silte orgânico	
Solos altamente orgânicos		Principalmente matéria orgânica, cor escura e cheiro		PT	Turfa	
Obs.: Cu = D60/D10		Cc = (D30)2/(D10xD60)				

Embora as classificações convencionais prevejam, até certo grau, o comportamento do solo, elas apresentam limitações e incompatibilidades quando aplicadas ao solo de clima tropical (regiões intertropicais), pois foram desenvolvidas para solos de clima de regiões de médias e altas latitudes (clima temperado). Com isso, para os solos tropicais é indicado utilizar classificações que considerem suas particularidades e distinções, como, por exemplo, as classificações não-convencionais.

As classificações geotécnicas não-convencionais são, basicamente, todas aquelas que não utilizam como índices classificatórios a granulometria e os limites de Atterberg. Percebe-se, portanto, que existem diversas classificações não-convencionais. No Brasil, a metodologia MCT – Miniatura, Compactado, Tropical – proposta por Nogami e Villibor (1981), inicialmente para fins rodoviários, apresenta boa aceitação no meio científico, pois considera as propriedades inerentes aos solos tropicais. Na metodologia MCT os solos são divididos em duas classes, laterítico e saprolítico, compreendendo sete grupos: NA (areia não laterítica), NA' (arenoso não laterítico), NS' (siltoso não laterítico), NG (argila não laterítica), LA (areia laterítica) LA' (arenoso laterítico) LG' (argiloso laterítico). Por intermédio da metodologia é possível classificar e caracterizar os solos de modo a prever suas propriedades mecânicas e hidráulicas.

As classificações geotécnicas expeditas são classificações geotécnicas não-convencionais realizadas de modo simplificado, com intuito de diminuir o volume de ensaios de uma campanha. Portanto, trata-se de adaptar e otimizar os métodos classificatórios não-convencionais. Os métodos expeditos mais usuais são oriundos da otimização das metodologias SUCS e MCT.

## **2.2. EROSÃO**

A erosão é um processo que envolve desprendimento, transporte que ocasionam a sedimentação de partículas de solo ou rocha e podem causar o assoreamento dos cursos d'água e dos reservatórios (Camapum de Carvalho *et al.*, 2016; Sonoda *et al.*, 2017).

Apesar de existirem diversos agentes erosivos como, por exemplo, os apresentados por Camapum de Carvalho *et al.* (2006) e Camapum de Carvalho *et al.* (2014): a água, (erosão hídrica), as geleiras (erosão glacial), a neve (erosão nival), o vento (erosão eólica), a terra/detritos (erosão soligênica), organismos (erosão organogênica); no Brasil, a água é o mais importante agente de erosão dos solos, configurando, assim, a erosão hídrica. No entanto, a

ação ou omissão humana tende a aumentar ainda mais a evolução e os impactos das erosões hídricas (Arcaya, 2007; Camapum de Carvalho *et al.*, 2016; Matamoros Sevilla, 2016).

A erosão ocasionada por ação humana é conhecida por erosão antrópica, e tende a ser maior quanto mais acelerado é o desmatamento da área (Guerra, 2007). Camapum de Carvalho *et al.* (2016), reforça que os processos erosivos ocorrem de modo mais rápido em consequência de ações antrópicas.

As classificações dos processos erosivos divergem de autor para autor, a depender dos fatores condicionantes da erosão em estudo, das características físicas da região, e dos fins para as quais são feitas. Matamoros Sevilla (2016) descreve distintas classificações dos processos erosivos de diversos autores:

- Zachar (1982) descreve uma classificação baseada nos agentes que causam a erosão (movimento de massa de terra) e sua evolução ao longo do desenvolvimento. Ele classifica as erosões em oito grandes grupos classificados segundo os seguintes critérios: 1) Agentes erosivos; 2) Forma de erosão; 3) Intensidade de remoção; 4) Desenvolvimento do fenômeno erosivo; 5) Solo erodido em terras de diferente aptidão; 6) Restos de erosão; 7) Sedimentos; 8) Terra erodida.
- Anderson *et al.* (1986) com o objetivo de classificar as erosões em terras de cultivos nos Estados Unidos, realizando essas classificações, só em áreas apresentando erosões de tipo hídrico e eólico, basearam-se na Equação Universal de Perda de Solos (USLE), obtendo uma classificação das erosões de modo mais quantitativa e de acordo a sua suscetibilidade a erosão.
- Arnalds *et al.* (2001) classificaram as erosões ocorrentes na Islândia por: erosões de forma, erosões por escala, erosões em solos vegetados e erosões em terreno sem cobertura vegetal.
- Camapum de Carvalho *et al.* (2006) classificam as erosões em quatro grupos, que são: erosão hídrica, erosão eólica, erosão glacial e erosão organogênica.

Portanto, percebe-se que não há uma única forma de se classificar as erosões e, portanto, o conhecimento de como se configura o processo erosivo é fundamental para adequar a classificação à situação concreta.

### 2.2.1. PROCESSOS EROSIVOS

É de suma importância prever o início do processo erosivo hídrico e seus mecanismos, a fim de que se possa evitá-lo. Guerra *et al.* (2007) atribuem ao momento em que as gotas da água da chuva batem no solo como sendo o primeiro momento, o momento *splash* – Erosão por salpicamento. Para este autor, o momento *splash* pode causar a ruptura dos agregados, selando o topo do solo e formando crostas. Depois pode ocorrer a infiltração de água e a formação de poças (ponds), de modo a gradativamente saturar o solo. Caso o volume da precipitação exceda o valor da infiltração d'água no solo, ocorrerá o escoamento da água na superfície, primeiramente em lençol, depois na forma de fluxos lineares, que evoluem para microrravinas, podendo algumas formarem cabeceiras, e algumas dessas cabeceiras podem bifurcar, formando novas ravinas. As ravinas podem evoluir e se conectar com processos erosivos de maiores proporções ocasionando as voçorocas.

Lima *et al.* (2017) descreve o processo erosivo hídrico em estágios, de modo que classifica o processo erosivo iniciando-se em forma de erosão laminar e, em face da concentração do fluxo, evolui para os sulcos. Ao se aprofundarem e concentrarem ainda mais o fluxo, os sulcos atingem o estágio de ravina e finalmente de voçoroca. A evolução de ravinas para voçorocas ocorre se as erosões alcançarem o nível freático.

Lima *et al.* (2017) apontam que quando se estuda os fatores relativos ao início e ao desenvolvimento dos processos erosivos hídricos, dois aspectos, de suma importância, devem ser considerados: a erosividade da chuva e a erodibilidade do solo. A energia cinética da chuva determina a capacidade da água em causar erosões no solo, a isso atribui-se o nome de erosividade (Guerra *et al.*, 2007). Já a erodibilidade é definida em relação à resistência do solo ao processo erosivo (quanto maior a erodibilidade, menor resistência o solo oferece ao processo), incluindo, além de suas características intrínsecas, fatores secundários, como os ciclos de umedecimento e secagem e a composição da água que interage com o solo (Lima *et al.*, 2017).

A avaliação da erodibilidade permite compreender o surgimento, a velocidade e a extensão dos processos erosivos, portanto, é possível analisar a suscetibilidade à erosão a partir de sua erodibilidade em relação a outros parâmetros, como por exemplo, a morfologia da superfície (Romão e Souza, 2017).

Os processos erosivos podem ser tão significativos conforme maior for a erodibilidade. Considerando-se que a erodibilidade se relaciona a com a coesão, a porosidade e a

permeabilidade do solo, Romão e Souza (2017) esclarecem que enquanto a baixa coesão aumenta a erodibilidade do material, a porosidade e a permeabilidade altas facilitam a infiltração da água da chuva, diminuindo o escoamento superficial e, conseqüentemente, a erodibilidade.

Assim, a ocorrência e desenvolvimento dos processos erosivos podem se relacionar, além de outros parâmetros, à erodibilidade do solo, de modo a desenvolver diferentes tipos de feições, associadas ao processo erosivo hídrico, laminar e linear, este último, dando origem aos sulcos, ravinas e voçorocas.

### **2.2.2. EROSÃO LAMINAR, SULCOS, RAVINAS E VOÇOROCAS**

A erosão decorrente do escoamento superficial da água é chamada de erosão superficial ou laminar e ocorre devido a ação da força trativa da água sobre o solo. O solo, portanto, resistirá mais ou menos em função de sua coesão e força de atrito entre as suas partículas. A erosão laminar ocorre, conforme explicam Camapum de Carvalho *et al.* (2016), de modo progressivo e uniforme sobre a superfície do terreno. Para os autores, as erosões laminares são comuns em áreas rurais submetidas à agricultura e podem ocasionar o empobrecimento do solo em termos de nutrientes, podendo originar solos expostos que têm pouca ou nenhuma capacidade de regeneração, gerando processos de degradação dos solos, como os denominados de arenização.

Embora seja menos visível que os outros tipos de erosões, as erosões laminares podem gerar grandes volumes de material erodido, provocando inúmeros danos ambientais, dentre os quais, Camapum de Carvalho *et al.* (2016) ressaltam o assoreamento dos cursos d'água.

Conforme o fluxo superficial da água se concentra sobre a superfície do terreno, aumenta-se a energia erosiva da água, que tende a gerar caminhos preferenciais, de modo que as erosões laminares podem evoluir configurando-se como erosões lineares, podendo evoluir até a condição de voçorocas, conforme explicado anteriormente, apesar de sua origem poder também estar relacionada a processos de erosão interna.

Além disso, a partir dos levantamentos realizados, não foi observado o destaque ao marco que caracterize o final da erosão laminar e o início da erosão em sulcos, pois a erosão laminar e a erosão em sulcos podem coexistir. Por outro lado, Lima *et al.* (2017) estabelecem em seu trabalho, para simplificar a classificação e para considerar os fenômenos

instabilizadores como distintos, o seguinte entendimento: sulcos, são as erosões lineares até 10 cm de profundidade e, como divisor entre ravina e voçoroca, o nível d'água freático máximo, independentemente de sua intermitência ou não.

Na erosão em sulcos, o desprendimento de partículas se dá principalmente pela energia do fluxo superficial concentrado, não se ressaltando o efeito do impacto das gotas de chuva, como na erosão laminar, em que o salpicamento é relevante. Já as ravinas são formadas a partir das incisões dos sulcos no solo, constituindo-se em canais contínuos, de largura e de profundidade variáveis a depender das características geológicas, do comportamento do maciço e da energia erosiva da água. Quando essas ravinas não são tratadas a tempo, elas atingem o nível freático e se transformam em voçorocas, que é o último estágio do processo erosivo e provavelmente o que provoca maior impacto.

Como comentado, o processo de voçorocamento, além da origem associada à concentração do fluxo de água, em geral, depende do gradiente hidráulico, promovido pelas águas subterrâneas, para sua ocorrência, por meio do fenômeno denominado *piping* (Guerra *et al.*, 2007). Santos Jr. *et al.* (2017) descrevem o *piping* como um tipo de erosão interna e também como um agente deflagrador de erosões que provoca a esqueletização ou eluviação dos solos, por intermédio do carreamento dos compostos químicos solubilizados ou de partículas finas de solo. Para os autores, o fenômeno do *piping* propicia o surgimento de voçorocas.

Em suma, as erosões são processos que podem ocorrer naturalmente no solo, fruto de novas condições de equilíbrio solo-atmosfera e solo-água, sem causar grandes impactos ao meio ambiente (Camapum de Carvalho, 2016). Entretanto, conforme o homem interfere no equilíbrio ambiental, pode gerar desajustes e influenciar na dinâmica natural dos processos erosivos. Por exemplo: as condições naturais do curso d'água normalmente são modificadas com a construção de uma barragem e a formação do seu reservatório; em consequência, os barramentos favorecem tanto erosões de suas bordas, quanto geram uma redução das velocidades da corrente hídrica provocando a deposição gradual dos sedimentos erodidos, que são carreados pelo curso d'água, ocasionando o assoreamento.

Deste modo, a deposição dos sedimentos ocorridos pelas mudanças das velocidades da corrente do rio, aliada à topografia do terreno, ondulada ou plana, que favorece as erosões hídricas, diminuem gradativamente a capacidade de armazenamento do reservatório e podem vir a inviabilizar sua operação, além de ocasionar problemas ambientais de diversas naturezas (Carvalho *et al.*, 2000).

### 2.3. PROCESSOS EROSIVOS EM BORDAS DE RESERVATÓRIOS

Segundo dados do Balanço Energético Nacional de 2021, o Brasil dispõe de uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, com destaque para a fonte hídrica, que responde por 65,2% da oferta interna, conforme é apresentado na Figura 2.3 (EPE, 2021). Assim, é notória a importância estratégica de se preservar a capacidade de geração dos reservatórios das UHEs.

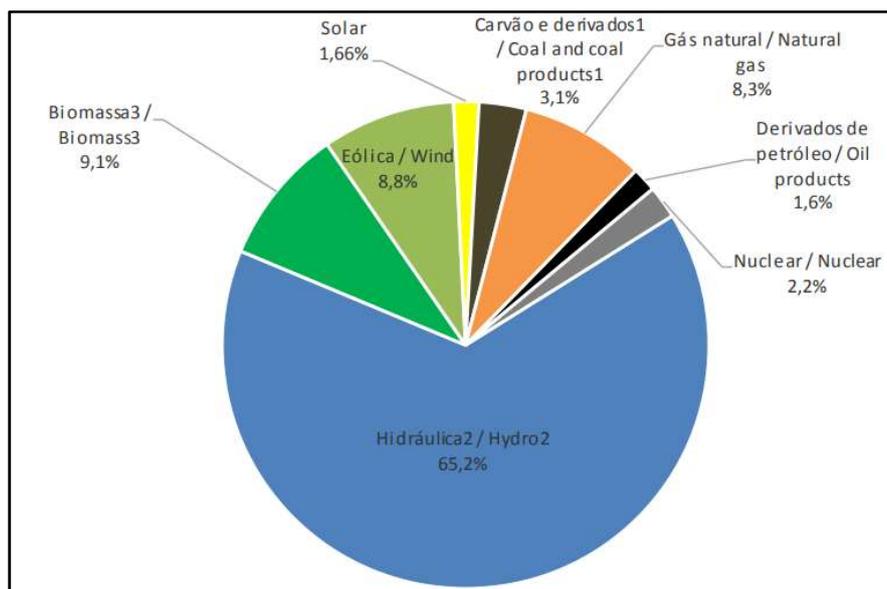


Figura 2.3: Oferta interna de energia elétrica por fonte geradora. Fonte: EPE (2021)

Sales *et al.* (2017) explicam que alguns processos erosivos são consequências da criação do reservatório, do seu enchimento e operação. Entretanto, alertam os autores, que há outras formas de erosões que surgem sem a interferência direta do próprio reservatório, e são, portanto, resultados da forma de ocupação de suas áreas lindeiras.

As erosões relacionadas à construção dos reservatórios ocorrem em três situações distintas: em áreas de empréstimo, nas bordas dos reservatórios e em áreas socioeconomicamente impactadas por sua existência, seja em meio rural, seja em meio urbano (Camapum de Carvalho *et al.*, 2016).

Para Carvalho *et al.* (2000), quando um corpo hídrico é modificado por atividade humana, como na construção de uma usina hidrelétrica, existe um aumento na deposição de sedimentos que é diretamente proporcional ao aumento da área das seções transversais do reservatório artificial e inversamente proporcional às velocidades da corrente. Ou seja, para os autores, quanto maior a dimensão do reservatório artificial, menor será a velocidade da corrente

do rio e, conseqüentemente, maior será a deposição de sedimentos. Matamoros Sevilla (2016) acrescenta ainda que essa dinâmica favorece o processo de assoreamento, causando diversos tipos de deposição de sedimentos que ocasionarão diferentes problemas nos reservatórios, envolvendo aspectos socioambientais e econômicos, inclusive a diminuição da capacidade de geração de energia.

Durante as variações do nível d'água do reservatório, tanto na fase de enchimento quanto na fase de funcionamento, ocorrem frentes de saturação e dessaturação que favorecem a ocorrência de erosões nas bordas do reservatório. Assim, na fase de enchimento, a frente de saturação gera a perda de sucção do solo e tende a gerar pressão positiva no ar nele presente, favorecendo a ruptura dos taludes. Na dessaturação, por sua vez, podem ocorrer inicialmente forças de percolação instabilizadoras do maciço de borda (Camapum de Carvalho *et al.*, 2016). Neste processo haverá grandes desprendimentos de solo e, conseqüentemente, grande será a deposição de sedimentos.

Matamoros Sevilla (2016) descreve em seu trabalho um estudo realizado em 1987 pelo Banco Mundial que identifica a média anual de perda do volume dos reservatórios devido à deposição de sedimentos em 1%, variando de um país para o outro; sendo no Brasil identificado uma perda anual de capacidade de armazenamento de reservatórios de 0,5%.

As erosões podem provocar o avanço ou o recuo das margens/bordas dos reservatórios. As erosões das bordas imediatas do reservatório tendem a gerar seu avanço, enquanto as erosões em áreas circunvizinhas comumente geram o recuo das margens. Em ambos os casos, reduz-se a capacidade de armazenamento do reservatório (Camapum de Carvalho *et al.*, 2016). A Figura 2.4 apresenta erosões de margem, na borda imediata do reservatório da UHE Batalha.

A manutenção da capacidade de geração dos reservatórios é algo primordial para garantir sua eficiência ao longo do tempo. Mas isso nem sempre é uma tarefa fácil, pois a gestão do reservatório e do seu entorno é complexa (Lima *et al.*, 2017), apresentando grande relevância, a mitigação do assoreamento por intermédio, principalmente, do controle e/ou prevenção dos processos erosivos (Guerra *et al.*, 2007).



Figura 2.4: Registro de erosões na borda imediata do reservatório da UHE Batalha.

### **2.3.1. CONTROLE, MONITORAMENTO E PREVENÇÃO DE EROSÕES EM BORDAS DE RESERVATÓRIOS**

Conforme é descrito por Sales *et al.* (2000), uma vez que é instalado um processo erosivo, uma maneira de controlar é por intermédio do diagnóstico das causas que o geraram, e, a partir disso, planejar e executar as ações de controle ou de recuperação do referido processo erosivo. Os autores explicam que é fundamental realizar inicialmente o cadastramento das erosões e, então, executar ações de controle, tais como: estabilização de taludes; proteção das margens; introdução de elementos de contenção de ondas.

O controle da erosão nas bordas de reservatórios envolve aspectos técnicos e socioeconômicos, que devem ser aprovados em conjunto. Referente às questões técnicas, destacam-se, como fundamentais, a utilização adequada de práticas agrícolas de conservação de solo, a adoção de medidas preventivas contra a erosão associadas a estradas, o fornecimento de subsídios visando ao planejamento da ocupação agrícola e a capacidade de uso-ocupação das terras (Guerra *et al.*, 2007). No geral, para minimizar ou controlar os processos erosivos, é essencial utilizar práticas conservacionistas, cuja concepção fundamental seja a de garantir a máxima infiltração e mínimo escoamento superficial das águas pluviais.

O monitoramento dos processos erosivos deve ser realizado desde o planejamento (inventário, viabilidade e projeto básico) até a fase de operação do reservatório. Carvalho

(1994), citado por Carvalho *et al.* (2000) ressalta que qualquer que seja a fase do empreendimento, as primeiras providências são: levantamento das condições de erosão da bacia (uso do solo, desmatamentos etc.); levantamento de postos sedimentométricos existentes ou desativados; estudos existentes sobre o tema para a bacia; coleta de dados hidrológicos e sedimentológicos necessários (série de vazões, descarga sólida, granulometria do sedimento em suspensão e do leito e outros). Pode-se também realizar levantamento batimétrico para comparar com a topografia original e assim calcular o volume sedimentado.

No tocante a ações preventivas, Sales *et al.* (2000) descrevem três frentes de ações para se desenvolver intervenções antes da implantação do reservatório, quais sejam:

- a) Região da construção do barramento: planejar as ações de modo a controlar o fluxo superficial das águas pluviais e águas servidas. Ações importantes: Desmatar o mínimo possível e de forma programada, expondo o solo desprotegido somente pelo tempo estritamente necessário; execução de vias de acesso (caminhos de serviços e vias definitivas) com traçados compatíveis com a topografia, realizando ações para controlar o fluxo de água por estas vias; e, recuperação das áreas degradadas.
- b) Perímetro do lago: com o auxílio de estudo da suscetibilidade a processos erosivos e da instabilização de taludes, na escala compatível com o projeto, deve-se adotar as seguintes medidas: plantio de vegetação, suavização de taludes, obras de proteção de bordas, etc.
- c) Áreas de contribuição da bacia: deve-se analisar o local de instalação do barramento, avaliando fatores que influenciarão a bacia, tais como: presença de estradas; atividades agropecuárias, principalmente a criação de animais; e, uso e ocupação das áreas lindeiras, verificando a possibilidade de controle de aprovação de novos loteamentos e condomínios dentro da bacia do reservatório.

Embora Camapum de Carvalho *et al.* (2016) apontem que a educação ambiental seja a medida preventiva mais eficiente, é fato que a prevenção dos processos erosivos envolve, também, a identificação dos mecanismos de ação dos fatores condicionantes e deflagradores das erosões. Dentre tais fatores, os que mais influenciam o assoreamento de um reservatório são aqueles que se localizam nas bordas dos reservatórios, que podem envolver aspectos climáticos, geológicos, geomorfológicos, pedológicos, de cobertura vegetal e antrópicos.

## **2.4. FATORES PREPONDERANTES DOS PROCESSOS EROSIVOS EM BORDAS DE RESERVATÓRIOS**

A intensidade e a frequência dos processos erosivos relacionam-se diretamente a fatores que podem variar de uma região para outra. Portanto, a identificação dos fatores preponderantes que deflagram ou que intensificam o processo erosivo permite o desenvolvimento de ações preventivas, cujos resultados são positivos na minoração do assoreamento dos reservatórios.

Para efeito conceitual, consideram-se fatores deflagradores aqueles que atuam no solo provocando o gatilho essencial que conseqüentemente iniciará o processo erosivo. Por conseguinte, o fator condicionante atua como complementar ao fator deflagrador oportunizando meios que favoreçam o início e a evolução dos processos erosivos.

### **2.4.1. FATORES DEFLAGRADORES**

Camapum de Carvalho *et al.* (2014) conceituam que todo processo erosivo hídrico, seja continental ou marinho, resulta de um desequilíbrio de energia entre a energia erosiva (erosividade) e aquela resistente à erosão (relacionada à erodibilidade) e, portanto, a erosão tão somente será deflagrada caso a energia erosiva for superior à energia resistente. Caso contrário, o processo erosivo não ocorrerá. Colaborando para esta discussão, segundo Coutinho *et al.* (2013), a erosão hídrica pluvial se deve externamente à erosividade da chuva, ressaltando ainda a atuação da direção e força do vento e do grau ou nível de insolação.

Romão e Souza (2017) descrevem a deflagração das erosões hídricas laminares e lineares. Para os autores, na deflagração da erosão laminar, inicialmente ocorre a desagregação e transporte de partículas do solo pela atuação da gota de água da chuva sobre o terreno e da correspondente lâmina do escoamento superficial difuso. Já na deflagração da erosão linear, descrevem estes autores, que além da atuação da gota de água da chuva, nesse processo em específico atua também o escoamento concentrado do fluxo superficial, gerando sulcos e ravinas.

Para Salomão *et al.* (2012), a erosão em voçoroca se desenvolve por influência não somente das águas superficiais, mas também dos fluxos de água subsuperficial, nos quais se inclui o aquífero freático, com desenvolvimento de fenômeno de *piping*. Santos Jr (2017)

também aponta o *piping* como deflagrador de processos erosivos, ocasionado devido aos fluxos de água no interior dos maciços.

Alguns autores estabelecem que o vento e as navegações de embarcações no reservatório podem provocar ondas, que tendem a ocasionar solapamentos de suas margens, sendo, portanto, um possível agente deflagrador de erosões em suas bordas imediatas. Para estes autores, a depender da magnitude e da posição relativa do nível d'água do reservatório na superfície do talude, a deflagração poderá ser mais ou menos danosa (Camapum de Carvalho *et al.*, 2014; Lima *et al.*, 2017; Matamoros Sevilla, 2017; Vilhena *et al.*, 2019).

Sales *et al.* (2017) e Jesus *et al.* (2017) relatam que as dinâmicas de operação do reservatório podem configurar-se como agentes deflagradores de erosões das bordas imediatas do reservatório. Assim, para os autores, durante a operação dos reservatórios ocorrem variações do nível d'água que, por sua vez, desencadeiam ciclos de umedecimento e secagem nas margens, aliados ou não com solos instáveis e/ou bordas íngremes, podendo gerar intensas desagregações das bordas imediatas, provocando a geração de grandes volumes de sedimentos.

Jesus *et al.* (2017) descrevem ainda a criação de animais como possível agente deflagrador de erosões. Os autores explicam que o deslocamento dos animais para dessedentação gera trilhas em direção ao lago. Os pisoteamentos dos animais, além de provocarem desagregação, podem passar a ser caminhos preferenciais de fluxo superficial, e também, podem ocasionar a compactação da superfície favorecendo a impermeabilização devido à diminuição da porosidade das camadas superficiais expostas e, deste modo, reduzir a capacidade de infiltração. Sales *et al.* (2017) reforçam os entendimentos de Jesus *et al.* (2017), acrescentando, ainda, que a criação de gado nas margens dos reservatórios, dentre todas as atividades agropecuárias, é a mais danosa, e pode originar ravinas.

Portanto, dentre os principais fatores deflagradores de erosões nas bordas dos reservatórios, a literatura cita: o clima, principalmente pela atuação da água das chuvas; as águas subterrâneas, por ocorrência dos fenômenos de *piping*; as navegações no reservatório, associando-se a estas, também, o vento (direção e força); a oscilação do nível d'água, ligada às dinâmicas de operação dos reservatórios; além da criação de animais.

Em outras palavras, a atuação da água pode se dar de distintas maneiras: na intensidade das gotas das chuvas, por sua energia cinética (erosividade), desde o efeito *splash*, provocando desagregação; na lâmina do escoamento superficial difuso, no escoamento concentrado do fluxo superficial e no fluxo subsuperficial (com desenvolvimento de fenômeno de *piping*).

Além disso, em atuação conjunta, as águas do reservatório, o vento e/ou a navegação de embarcações, podem ocasionar solapamentos das margens dos reservatórios. Já as variações do nível d'água do reservatório, por meio das dinâmicas de operação podem, por sua vez, desencadear ciclos que ocasionam erosão nas bordas imediatas.

A criação de animais, principalmente de gado, nas bordas dos reservatórios, atua na geração direta de sedimentos (por intermédio do pisoteio), na criação de caminhos preferenciais de fluxo superficial, e na compactação da superfície favorecendo a impermeabilização e reduzindo a extensão das superfícies de infiltração.

#### **2.4.2. FATORES CONDICIONANTES**

Quanto aos fatores condicionantes, os processos erosivos são influenciados, principalmente, pela resistência do solo ao impacto da gota d'água, pelas feições do relevo e pela cobertura vegetal. Para Coutinho *et al.* (2013) a ocorrência da erosão hídrica associa-se, além de outros fatores já citados, às propriedades do solo de erodibilidade, denominadas por eles de internas. Ademais, estes autores alertam ainda que existem fatores intervenientes no processo erosivo, tais como ocupação e uso do solo, declividade, comprimento de rampa, orientação das vertentes e forma do relevo.

Para Guerra *et al.* (2007) a ocorrência das erosões vai depender da forma como se dá o escoamento superficial e pode apresentar-se de duas formas: erosão laminar e erosão linear (sulcos, ravinas e voçorocas) cujas causas são, respectivamente, escoamento da água na superfície do terreno e concentração das linhas de fluxo das águas do escoamento superficial. Os autores indicam ainda que podem ocorrer erosões severas por influência das águas subsuperficiais, quando de sua percolação, provocam erosão interna. Entretanto, esclarecem que as forças hidrodinâmicas não são as únicas responsáveis por condicionar a ação de remoção das partículas de solo, pois há também uma série de outros fatores que, agindo em conjunto com a água, condicionam os processos erosivos, dentre eles: das relações de contato com outras partículas vizinhas, relacionadas a suas formas, tamanhos e distribuição.

Sales *et al.* (2017), apontam que alguns fatores como o relevo, a topografia, o tipo de solo e a presença e o tipo da cobertura vegetal podem intensificar ou retardar o efeito da ação erosiva.

Romão e Souza (2017) avaliam condicionantes geológicas para o processo erosivo hídrico laminares. Para os autores, é importante discutir os materiais inconsolidados existentes na superfície das regiões intertropicais brasileiras, pois as condições tectônicas relativamente estáveis, bem como as condições climáticas, possibilitam a atuação intensa do intemperismo sobre o substrato rochoso, de modo que as camadas de solos são consideravelmente espessas.

Além disso, os solos residuais jovens podem apresentar planos de fraqueza e lineamentos herdados de sua rocha de origem, bem como a espessura reduzida de suas camadas, que podem atuar como fatores condicionantes aos processos erosivos. Os planos de fraqueza e lineamentos, como no caso dos planos de xistosidade, de fratura, de falhas ou de juntas, foliações, fraturamentos e falhamentos, favorecem a ruptura dos maciços; já os materiais de pequenas espessuras, considerados rasos, condicionam um maior escoamento superficial em relação à infiltração da água da chuva, possibilitando assim áreas mais suscetíveis ao processo erosivo hídrico laminar, podendo ou não evoluir para processos erosivos lineares (Romão e Souza, 2017).

Ressalta-se aqui o conceito de materiais inconsolidados, que pode ser associado aos tipos de solos, quanto ao comportamento geotécnico. Por outro lado, a descrição da litologia, por intermédio do detalhamento da composição mineralógica, da textura e da estrutura das rochas, pode ser relacionada aos materiais inconsolidados, quando se tratam de solos residuais jovens. No tocante a isso, Romão e Souza (2017) afirmam que o entendimento dos principais condicionantes às erosões laminares e lineares relaciona-se diretamente às propriedades geológicas e hidrogeológicas e, no caso dos solos, associam-se especialmente à erodibilidade.

Guerra *et al.* (2007) tratam os fatores condicionantes das erosões laminares e lineares de modo distinto, pois, para eles cada tipo de processo erosivo é constituído de mecanismos diversos, não podendo, portanto, analisar os fatores condicionantes dos processos erosivos laminares e lineares com as mesmas abordagens. Por conseguinte, para os autores, as perdas de solo por erosão laminar são comandadas por diversos fatores relacionados às condições naturais dos terrenos, destacando-se: a cobertura vegetal, a topografia e os tipos de solos. Já para as perdas de solo por erosão linear, os autores indicam que os condicionantes se relacionam com a hidrologia, a topossequência e a morfopedologia.

Quanto às condicionantes antrópicas, é possível afirmar que ocorrem devido à instalação de diversas atividades. Sua mensuração nem sempre é fácil, mas seus resultados são perceptíveis, quando analisados em escalas comparativas ao longo do tempo. Zêzere (2005)

lista as seguintes atividades antrópicas como contribuintes para o agravamento de instabilizações de maciços: retirada da cobertura vegetal, escavação à meia vertente ou na base da vertente; sobrecargas no topo da vertente (por exemplo, aterros); irrigação no talude; manutenção deficiente dos sistemas de drenagem; atividade de mineração e/ou agrícola inadequadas; e vibrações artificiais, como por exemplo, tráfego rodoviário e ferroviário, maquinaria pesada etc.

Desse contexto, resume-se que os fatores condicionantes dos processos erosivos são diversos e que envolvem diversos parâmetros, principalmente aqueles associados aos materiais inconsolidados, ao relevo e à cobertura vegetal. Por isso, os processos erosivos podem ser intensificados ou controlados ou mesmo minimizados por meio da modificação de algum fator isolado, mas também pela alteração concomitante de diversas condições. Como exemplo é possível citar modificações que podem ser realizadas por meio da interferência nos processos pedogenéticos; no uso e cobertura vegetal; na topografia, nas condições hidrológicas superficiais e subsuperficiais; nas geotécnicas etc. Além disso, é possível relacionar os fatores condicionantes com o tipo de erosão, distinguindo o resultado com base nos fatores que lhe deram causa.

## **2.5. SUSCETIBILIDADE À EROSÃO**

A partir da literatura analisada, não foi possível a observação de um conceito único sobre suscetibilidade. Assim, destaca-se Zêzere (2005), que define suscetibilidade como a probabilidade espacial, não temporal, de ocorrência de um determinado fenômeno numa dada área, tendo em conta os fatores condicionantes existentes no terreno, independentemente do seu período de recorrência. Já para Fell *et al.* (2008), a suscetibilidade avalia qualitativamente ou quantitativamente as condições potenciais que o ambiente oferece, a partir de seus atributos, para a propensão e a distribuição espacial em que os fenômenos naturais podem ocorrer. A Tabela 2.3 apresenta definições do termo suscetibilidade adotada por diversos autores.

Tabela 2.4: Definições do termo suscetibilidade adotada por diversos autores

Autor (ano)	Definição do termo suscetibilidade
Zuquette (1993)	Possibilidade de que um escorregamento ocorra em uma área, com base nas condições do terreno local. A suscetibilidade não considera, de forma explícita, a probabilidade de ocorrência que também dependa da recorrência de fatores de disparo, tais como as precipitações ou sismos.
Soeters e Van Westen (1995)	Propensão de uma determinada área de ser afetada por um (certo tipo) de deslizamento de terra, baseado, unicamente, em condições do terreno, não apresentando a probabilidade de ocorrência dos fenômenos.
USGS (2004) <i>United States Geological Survey</i>	Condições determinadas por fatores ou processos físicos, sociais, econômicos e ambientais que definem a suscetibilidade de um indivíduo, de uma comunidade, de ativos ou de sistemas aos perigos.
Hader (2021)	Uma avaliação quantitativa ou qualitativa da classificação, volume (ou área) e distribuição espacial dos escorregamentos. A suscetibilidade também pode incluir uma descrição da velocidade e intensidade do deslizamento de terra existente ou potencial. Embora seja esperado que os escorregamentos ocorram com mais frequência nas áreas mais suscetíveis, na análise de suscetibilidade, o período de retorno não é explicitamente considerado.

Considerando-se as diversas variáveis presentes nas análises dos fatores deflagradores e condicionantes dos processos erosivos, pode ser muito útil a combinação destas variáveis aplicando a Sistemas de Informação Geográfica (SIG), a fim de elaborar mapas de suscetibilidade à erosão.

Hader (2021), propõe metodologia para mapeamento de suscetibilidade baseada em métodos quantitativos e métodos qualitativos. Para o autor, é importante obter, em diferentes níveis, a propensão de uma área sediar processos erosivos. Os métodos quantitativos, que se subdividem em métodos estatísticos e modelos determinísticos, baseiam-se na estatística e em modelos matemáticos, respectivamente. Os modelos qualitativos, por sua vez, utilizam os atributos do meio físico, análises de campo e a aerofotogrametria para a interpretação e julgamento de forma subjetiva por um especialista, que define quais são as condicionantes mais significativas dos processos. Entretanto, a subjetividade é um fator limitante do método supracitado.

Dentre os métodos qualitativos, o método heurístico pode ser utilizado para obter o mapa de suscetibilidade. Nesta metodologia, os fatores condicionantes são selecionados pelo pesquisador, que irá atribuir diferentes pesos às classes dos parâmetros para indicar sua importância, baseado em sua experiência e em observações de campo. Posteriormente, o modelo de suscetibilidade pode ser elaborado com apoio de um *software* SIG (Hader, 2021). Uma maneira de maximizar a acurácia desta metodologia é aliar a técnicas AHP (*Analytical Hierarchy Process*) (Carvalho e Riedel, 2004), aos trabalhos e a validações de campo e de laboratório. A Figura 2.5 apresenta as etapas para a elaboração de mapas por métodos heurísticos.



Figura 2.5: Etapas sequenciais para elaboração de mapa de suscetibilidade a partir do método heurístico. Fonte: Hader (2021), adaptado.

Alguns autores sugerem critério para definição das classes de suscetibilidade à erosão combinando atributos e atribuindo pesos para cada fator condicionante considerado. Salomão *et al.* (2012), apresentaram em seu trabalho uma metodologia para o cálculo da suscetibilidade à erosão laminar na área de estudo, com base em atributos dos solos e do relevo. Assim, os autores categorizaram os solos existentes (Tabela 2.5) em função de suas erodibilidades e a declividade (Tabela 2.6) e, por meio do cruzamento matricial, combinaram tais atributos, gerando os mapas de suscetibilidade, determinando, desta forma, cinco classes de suscetibilidade à erosão laminar, compatibilizadas às classes de capacidade de uso da terra, conforme explicitado na Tabela 2.7.

Tabela 2.5: Classes de erodibilidade por unidade pedológica. Fonte: Salomão et al. (2012)

Classes de Erodibilidade	Unidades Pedológicas
1 - Muito Alta	Cambissolo, Neossolo Litólico, Neossolo Quartzarênico.
2 - Alta	Argissolo.
3 - Média	Nitossolo.
4 - Baixa	Latossolo Vermelho.
5 - Não Erodível	Gleissolo, Neossolo Quartzarênico Hidromórfico, Organossolo, Neossolo Flúvico em relevo Plano.

Tabela 2.6: Classes de erodibilidade em função da declividade dos solos. Fonte: Salomão et al. (2012)

Erodibilidade	Declividade (%)			
	I (> 20)	II (12 a 20)	III (6 a 12)	IV (< 6)
1 - Muito Alta	I	I	II	II
2 - Alta	I	II	II	III
3 - Média	II	III	III	IV
4 - Baixa	III	IV	IV	V
5 - Não Erodível	Não existe	Não existe	Não existe	V

Tabela 2.7: Classes de suscetibilidade à erosão laminar, compatibilizadas às classes de capacidade de uso da terra. Fonte: Salomão et al. (2012)

Classes de Suscetibilidade à Erosão Laminar		Classes de Capacidade de Uso das Terras	Características dos terrenos e Potencialidades e Limitações ao Uso do Solo
I	Extremamente suscetível	VII e VIII	Terras impróprias ao cultivo, indicadas para a preservação ou para reflorestamento.
II	Muito suscetível	VI	Terras com problemas complexos de conservação, parcialmente favoráveis à pastagem, sendo mais indicadas a reflorestamento.
III	Moderadamente suscetível	IV	Terras com problemas complexos de conservação, indicadas a pastagem, culturas perenes e semi-perenes, e a reflorestamento.
IV	Pouco suscetível	III	Terras com problemas complexos de conservação, mais indicadas à pastagem, culturas perenes e semi-perenes, reflorestamento, e eventualmente a culturas anuais, porém exigindo práticas intensivas mecanizadas de controle da erosão.
V	Pouco a não suscetível	I, II e V	Terras com problemas simples de conservação, podendo ser utilizadas com qualquer tipo de cultura, exigindo práticas não mecanizadas de controle da erosão.

Bastos *et al.* (2017) indicam que a susceptibilidade à erosão linear deve investigar cada um dos principais horizontes dos perfis envolvidos, aliando a interpretação dos dados com resultados experimentais.

Do que foi descrito neste tópico, é possível afirmar que a suscetibilidade à erosão hídrica pode ser analisada a partir do comportamento dos materiais quanto à resistência ao processo erosivo, ou seja, diretamente à sua erodibilidade, considerando as propriedades geotécnicas do solo; em sobreposição aos atributos do relevo. Portanto, a realização de ensaios laboratoriais pode contribuir para a geração de dados e informações que permitam a avaliação de propriedades quanto ao comportamento geotécnico dos materiais inconsolidados, quanto aos processos erosivos, podendo ou não ser realizados de modo a simular também algumas características do terreno, como por exemplo, sua inclinação, gerando resultados associados à erodibilidade, em determinadas condições do relevo, sendo possível também, em casos específicos, o entendimento da suscetibilidade à erosão.

## **2.6. ENSAIOS LABORATORIAIS PARA O ESTUDO DE EROSÕES**

Nesta seção será apresentada uma revisão sobre os principais ensaios laboratoriais que a literatura indica para o estudo das erosões. Inicialmente são discutidos os ensaios de caracterização geotécnica, seguido dos ensaios de erodibilidade direta e indireta e, por fim, são discutidos os ensaios de classificação dos solos mediante a metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) expedita.

Bastos (1999) e Bastos *et al.* (2017) propõem a aplicação de metodologias de ensaios geotécnicos para se obter a erodibilidade dos solos. Para os autores é importante, em primeiro nível, realizar ensaios de caracterização geotécnica dos solos e, em segundo nível, realizar ensaios pela Metodologia MCT. Em terceiro nível, os autores acrescentam a realização de ensaios complementares como, por exemplo, de resistência ao cisalhamento.

### **2.6.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA**

A caracterização geotécnica é composta de informações básicas que devem estar presentes em qualquer análise geotécnica que se pretenda realizar nos solos. O objetivo principal é o de estudar atributos de textura e estrutura do solo. Esses atributos são estudados mediante ensaios de granulometria do solo, plasticidade (ensaios de limites de Atterberg) e massa específica aparente seca e natural, bem como a massa específica real dos grãos.

As amostras coletadas para realizar os ensaios podem ser deformadas ou indeformadas, devendo ser extraídas em locais estratégicos, preferencialmente onde é prevista a ação erosiva

pelo fluxo d'água concentrada ou pelo embate das ondas, de modo a ser representativa do ponto amostrado.

Como primeira aproximação para a avaliação da erodibilidade, Bastos (1999) propõe a aplicação de critérios pelo teor de finos. Para o autor, a porcentagem de solo passante na peneira #200 (% passante na peneira #200), e a plasticidade, representada pelo índice de plasticidade (IP), constituem o critério que indica que são considerados potencialmente erodíveis aqueles solos com:

- % passante na peneira #200 < 55% e/ou
- IP < 10%

A determinação dos índices físicos do solo é de suma importância, pois podem influenciar no processo erosivo. Uma densidade relativa alta, por exemplo, pode contribuir a uma maior resistência às erosões laminares. A massa específica aparente, por sua vez, por relacionar-se com o grau de compactação do solo, representará uma relação de quanto maior a densidade aparente, maior será a dificuldade de infiltração da água no solo, de modo que aumentará o escoamento superficial, favorecendo a deflagração de processos erosivos laminares e lineares. Considerando que a densidade aparente dos solos variam entre 0,8 e 2,0 g/cm<sup>3</sup>: valores menores que 1,3 g/cm<sup>3</sup> são considerados como valores baixos e valores maiores que 1,6 g/cm<sup>3</sup> são considerados como altos (Matamoros Sevilla, 2016).

A metodologia de caracterização expedita proposta por Fortes e Nogami (1991), identifica e descreve os solos a partir da metodologia MCT. Assim, Fortes e Nogami (1991) estabeleceram o método das pastilhas para identificação expedita de solos tropicais. Neste método, a amostra é caracterizada, de modo a obter-se os seguintes dados: umidade de moldagem dos anéis, plasticidade, contração diametral, penetração, tempo de ascensão d'água,  $c'$  (coeficiente de contração), identificação do grupo MCT e peculiaridades da amostra.

## **2.6.2. AVALIAÇÃO DIRETA E INDIRETA DA ERODIBILIDADE DE SOLOS**

A erodibilidade é uma propriedade do solo que pode ser definida como sendo a propensão de ocorrência de desagregação de suas partículas. Tal propriedade está relacionada, dentre outros fatores, com a facilidade de destaque e transporte, que, por sua vez estão associados às forças de atração existentes no solo e à sua granulometria.

Os estudos da erodibilidade geotécnica em laboratório são comumente realizados com o emprego de duas metodologias distintas: a avaliação direta da erodibilidade por ensaios de Inderbitzen e a avaliação indireta da erodibilidade por propriedades dos solos que melhor se relacionaram ao comportamento frente à erosão (Camapum de Carvalho, 2006; Matamoros Sevilla, 2016; Bastos *et al.*, 2017).

Os ensaios de avaliação direta são aqueles cujos resultados finais apresentam uma taxa de perda de solo ou fator de erodibilidade, ou seja, para a avaliação direta da erodibilidade é proposta a medição de parâmetros hidráulicos de erodibilidade, em particular da taxa de erodibilidade K, através de ensaios em canais. O ensaio mais comumente empregado para realizar a avaliação direta de erodibilidade, no Brasil, é o ensaio Inderbitzen.

Os ensaios de avaliação indireta são aqueles que avaliam a erodibilidade do solo mediante suas características por métodos qualitativos. Um exemplo deste método são os ensaios de avaliação indireta de erodibilidade mediante o critério MCT, que é composto pelos ensaios de infiltrabilidade e perda de massa por imersão.

#### **2.6.2.1. ENSAIO DE AVALIAÇÃO DIRETA DA ERODIBILIDADE: INDERBITZEN**

O ensaio Inderbitzen avalia a erodibilidade dos solos de forma direta; consiste, no geral, em se estabelecer um fluxo laminar com vazão constante, sobre a superfície de uma amostra indeformada que é colocado sobre uma rampa com inclinação que pode ser ajustada às condições de campo (Figura 2.6). É o ensaio mais empregado no Brasil devido a sua simplicidade e eficiência comprovada com diversos estudos (Inderbitzen, 1961; Fácio, 1991; Jesus, 2013; Bastos *et al.*, 2017).

Embora o ensaio seja bem aceito, não há uma norma oficial para o ensaio, de modo que os arranjos experimentais existentes no país diferem consideravelmente (Figura 2.10), advindos em grande parte de trabalhos de pós-graduação de diferentes programas brasileiros (Fácio, 1991; Higashi, 2006; Bastos *et al.*, 2017).

O pioneiro na concepção do ensaio Inderbitzen, segundo Higashi (2006), Jesus (2013) e Bastos *et al.* (2017), teria sido Inderbitzen (1961), que apresentou a concepção original de um canal hidráulico e um método de ensaio empregados na avaliação da erodibilidade. Com a divulgação no meio geotécnico, o ensaio tomou o nome de ensaio de seu idealizador, Inderbitzen, mas foi também chamado de erosômetro ou ainda ensaio de erosão.

No Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, em 1991, foi desenvolvido durante a pesquisa de mestrado de Fácio (1991), um equipamento de Inderbitzen modificado para o Laboratório de Geotecnia da UnB (Figura 2.6a). Os ensaios dessa pesquisa foram realizados de modo a permitir a utilização da mesma amostra para mais de uma condição de fluxo e/ou rampa. Posteriormente, em 1997, ajustes foram adotadas por Santos (1997) de modo que a largura da rampa foi adaptada com laterais de acrílico para que tivesse uma largura de 100 mm, sendo mantido o comprimento de 69 cm até o compartimento onde é rosqueado o cilindro contendo o corpo-de-prova, mantendo o comprimento de rampa de 46,5 cm.

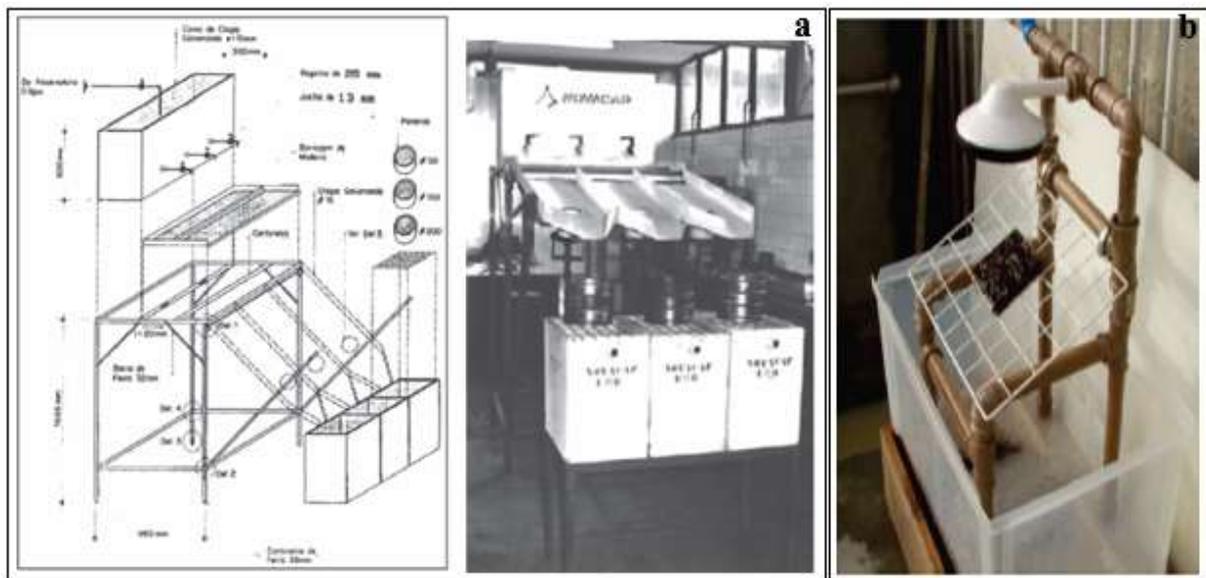


Figura 2.6: Ensaio de Inderbitzen desenvolvido por: a) Fácio (1991); b) Higashi (2006)

### 2.6.2.2. ENSAIO DE AVALIAÇÃO INDIRETA: CRITÉRIO MCT

A avaliação indireta da erodibilidade mediante o critério MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) foi proposto inicialmente por Nogami e Villibor (1979), mas foi adaptado por diversos estudiosos visando facilitar os métodos de ensaio (Bastos, 1999; Matamoras Sevilla, 2016; Bastos, 2017). Os autores estabeleceram o critério com base em dois parâmetros do solo: o coeficiente de sorção ( $s$ ) e a perda de massa por imersão ( $\pi_i$ ). Estes parâmetros representam duas propriedades de solos tropicais frente a erosão:

- $s$ : representa a infiltrabilidade (regido pela ascensão da água por capilaridade), avaliadas mediante o ensaio de sucção capilar ou ensaio de infiltrabilidade; e

- $\pi_i$ : representa a erodibilidade específica (regido pelo percentual de desagregação de amostras indeformadas quando submersas em água), avaliadas mediante o ensaio de perda de massa por imersão.

A partir dos resultados dos ensaios de infiltrabilidade (coeficiente de sorção –  $s$ ) e perda de massa por imersão (erodibilidade específica -  $\pi_i$ ), é estabelecida a relação  $\pi_i/s$ , na qual, Nogami e Villibor (1979) identificaram os solos erodíveis quando esta relação for superior a 52.

O ensaio de perda de massa por imersão modificado, ou ensaio de erodibilidade específica, proposto inicialmente por Nogami e Villibor (1979), e cujo método de ensaio é previsto na norma DNER 256/94, avalia o potencial de desagregação do solo frente à sua imersão em água. No ensaio, a amostra, confinada lateralmente pelo tubo de amostragem, é deslocada suave e continuamente para fora do amostrador, de modo que seu topo fique sacado por 10 cm; a amostra é, então, imersa em água por um período de pelo menos 20 horas. O percentual de perda de solo seco em massa em relação ao peso seco total da amostra representa a erodibilidade específica ( $\pi_i$ ). A Figura 2.7 apresenta as amostras posicionadas antes da imersão.



Figura 2.7: Amostras posicionadas para execução do ensaio de perda de massa por imersão

O ensaio de infiltrabilidade é executado com base na norma DNER-ME 194/88. Destina-se a quantificar a ascensão capilar da água em função do tempo, em amostras indeformadas. As amostras coletadas possuem diâmetro e altura de 5,0 cm. O equipamento utilizado no ensaio é constituído de um plano em madeira onde são dispostos horizontalmente tubos capilares de vidro (diâmetro de 7 mm); cada tubo conecta-se numa extremidade com um reservatório d'água, e, na outra com um dispositivo de suporte da amostra de solo, ainda confinada no molde do amostrador, composto de pedra porosa de granulação aberta; a base da amostra e o tubo capilar devem apresentar níveis coincidentes; paralelo ao tubo capilar é disposta uma régua graduada. A Figura 2.8 apresenta o esquema do equipamento utilizado para o ensaio de infiltrabilidade.

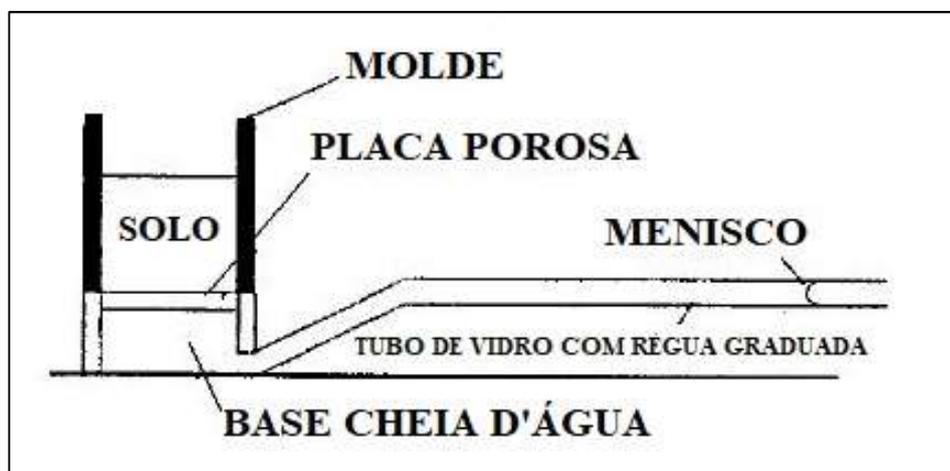


Figura 2.8: Esquema do equipamento utilizado para realizar o ensaio de infiltrabilidade.  
Fonte: Adaptado de Bastos (1999)

Durante o ensaio ocorre fluxo ascendente da água na amostra devido a atuação de forças por tensão capilar relacionadas à sucção do solo (Bastos, 1999). Os resultados das leituras da distância percorrida no tubo capilar são plotados em função do tempo cronometrado (em  $\text{min}^{1/2}$ ). Os pares ordenados obtidos formarão uma curva que apresentará um comportamento inicialmente com um trecho íngreme retilíneo, seguido de outro de tendência horizontal (Figura 2.13), evidenciando que a água atingiu a estabilidade da atuação das forças de tensão capilar e sucção do solo (Matamoros Sevilla, 2016). O valor de “s” (denominado assim ao coeficiente de sorção obtido) e dado pelo gradiente no trecho retilíneo inicial da curva e é expressado em ( $\text{cm}/\text{min}^{1/2}$ ). O coeficiente de sorção é dado pela Equação (2.1)

$$s = \frac{(L_b - L_a)S}{10 (t_b - t_a) A} \quad (2.1)$$

Onde:

$s$  = coeficiente de sorção em  $\text{cm}/\text{min}^{1/2}$ ;

$(t_a, L_a)$  = coordenadas do ponto a, da parte retilínea da curva obtida;

$(t_b, L_b)$  = coordenadas do ponto b da parte retilínea da curva;

$S$  = seção do tubo horizontal ( $\text{cm}^2$ )

$A$  = seção do corpo de prova, em ( $\text{cm}^2$ )

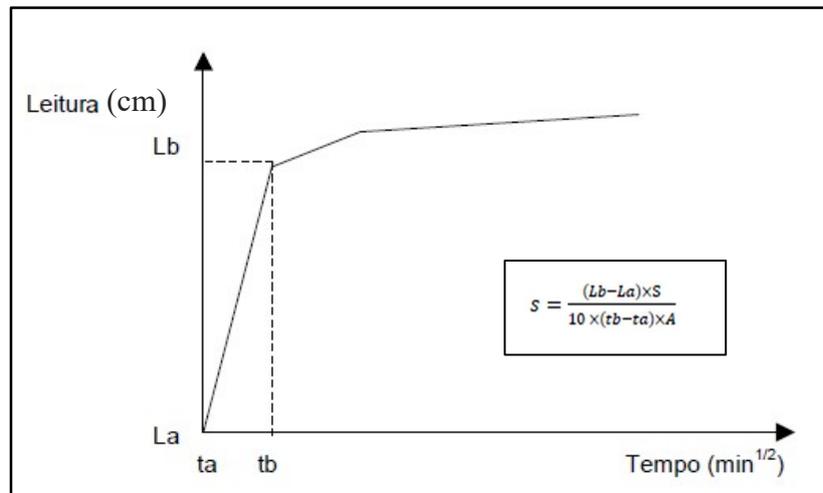


Figura 2.9: Curva típica  $L \times t^{1/2}$  e elementos matemáticos para estimativa do coeficiente de sorção ( $s$ ) para o ensaio de infiltrabilidade da metodologia MCT. Fonte: Adaptado de Bastos (1999)

### 2.6.3. CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS COM USO DA METODOLOGIA MCT EXPEDITA

Na metodologia MCT tradicional, desenvolvida por Nogami e Villibor (1980, 1981, 1985), a classificação dos solos tropicais é baseada em propriedades mecânicas e hidráulicas, obtidas de corpos de prova compactados de dimensões reduzidas. Essa classificação não utiliza a granulometria, o limite de liquidez e o índice de plasticidade, como acontece no caso das classificações geotécnicas tradicionais. Deste modo, para os autores, os solos tropicais são divididos em duas grandes classes, os de comportamento laterítico e os de comportamento não laterítico ou saprolíticos (Nogami e Villibor, 1980; Nogami e Villibor, 1981; Nogami e Villibor, 1985; Fortes e Nogami, 1991).

Os solos lateríticos e saprolíticos, segundo a classificação MCT, podem se subdividir de modo a se encaixarem nas seguintes classificações:

- Solos de comportamento laterítico, designado pela letra L, sendo subdivididos em 3 grupos:
  - LA - Areia laterítica quartzosa;
  - LA' - Solo arenoso laterítico; e
  - LG' - Solo argiloso laterítico.
- Solos de comportamento não laterítico (saprolítico), designados pela letra N, sendo subdivididos em 4 grupos:
  - NA – areias, siltes e misturas de areias e siltes com predominância de grão de quartzo e/ou mica, não laterítico;
  - NA' – misturas de areias quartzosas com finos de comportamento não laterítico (solo arenoso);
  - NS' – solo siltoso não laterítico; e
  - NG' – solo argiloso não laterítico.

Para se classificar os solos lateríticos e saprolíticos, pela Metodologia MCT convencional, utiliza-se o gráfico da Figura 2.10, onde a linha tracejada separa os solos de comportamento laterítico dos de comportamento não laterítico. O comportamento mecânico e hidráulico do solo pode ser estimado utilizando-se o quadro apresentado na Figura 2.11.

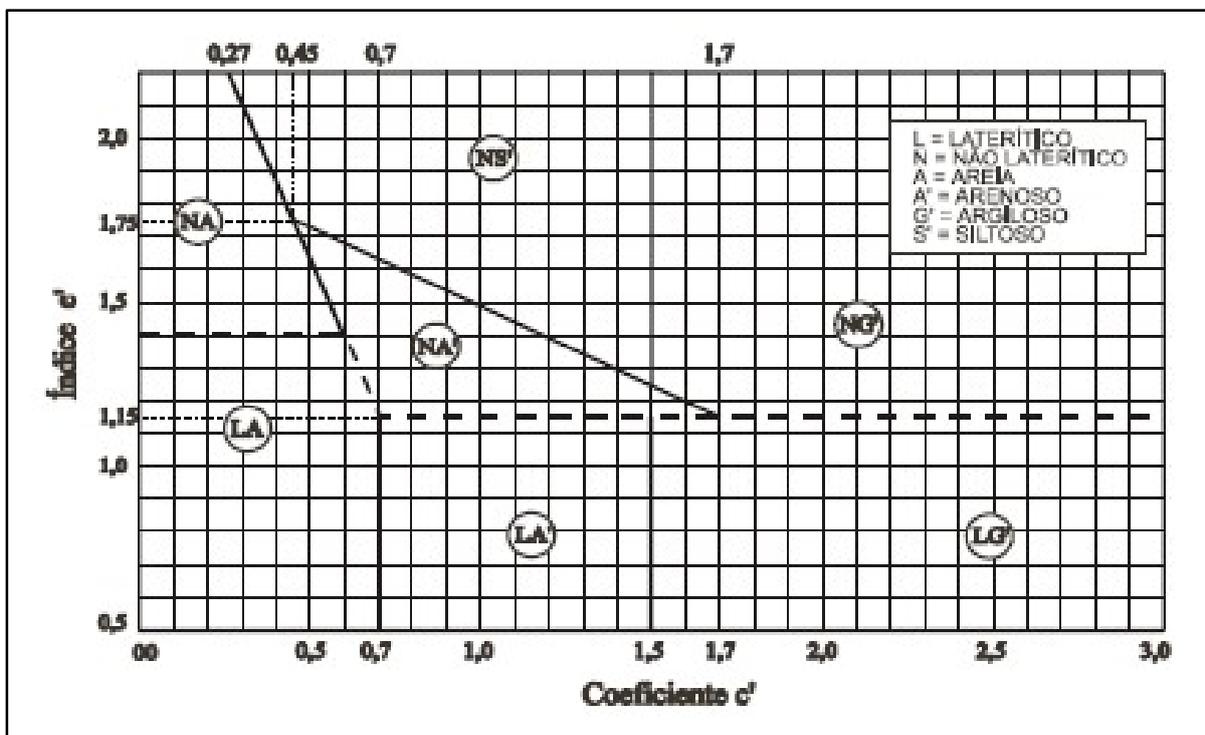


Figura 2.10: Carta de classificação de solos da metodologia MCT convencional, adaptado. Fonte: Nogami e Villibor (1995)

GRANULOMETRIAS TÍPICAS		argilas siltes (q,s)	areias siltosas	siltes (k,m) siltes arenosos	argilas argilas arenosas argilas siltosas siltes argilosos	areias siltosas	areias argilosas	argilas argilas arenosas argilas siltosas siltes argilosos
Designações do T1-71 do DER-SP (equivalentes da Mississippi River Commission, USA)								
k=caolínico      m=micáceo s=sericítico      q=quartzoso		COMPORTAMENTO				L = Laterítico		
GRUPO MCT		N = Não Laterítico				L = Laterítico		
GRUPO MCT		NA	NA'	NS'	NG'	LA	LA'	LG'
Propriedades	MINI-CBR (%)	M, E B, M	E B	M, E E	E E	E B	E, EE B	E B
	sem imersão perda por imersão							
	EXPANSÃO	B	B	E	M, E	B	B	B
	CONTRAÇÃO	B	B, M	M	M, E	B	B, M	M, E
	COEF. DE PERMEABILIDADE (k)	M, E	B	B, M	B, M	B, M	B	B
	COEFICIENTE DE SORÇÃO (s)	E	B, M	E	M, E	B	B	B
Corpos de prova compactados na massa específica aparente seca máxima da energia normal		EE = Muito Elevado (a) E = Elevado (a)			M = Médio (a) B = Baixo (a)		Vide Tabela III.3 para equivalente numérico	
Utilização	Base de pavimento	n	4°	n	n	2°	1°	3°
	Reforço do subleito compactado	4°	5°	n	n	2°	1°	3°
	Subleito compactado	4°	5°	7°	6°	2°	1°	3°
	Aterro (corpo) compactado	4°	5°	6°	7°	2°	1°	3°
	Proteção à erosão	n	3°	n	n	n	2°	1°
	Revestimento primário	5°	3°	n	n	4°	1°	2°
n = não recomendado								
Grupos tradicionais obtidos de amostras que se classificam nos grupos MCT discriminados nos topos das colunas	USCS	SP SM	MS SC ML	SM, CL ML, MH	MH CH	SP SC	SC	MH ML CH
	AASHO	A - 2	A - 2 A - 4 A - 7	A - 4 A - 5 A - 7 - 5	A - 6 A - 7 - 5 A - 7 - 5	A - 2	A - 2 A - 4	A - 6 A - 7 - 5

Figura 2.11: Propriedades e utilização dos grupos de Solos da MCT, adaptado. Fonte: Nogami e Villibor (1995)

Fortes e Nogami (1991), propuseram uma metodologia expedita para classificar e caracterizar os solos com base na metodologia MCT. Para os autores, o método tem sido utilizado com sucesso na fase de estudo de viabilidade e de projeto executivo, como uma maneira de reduzir os custos. Assim sendo, o método baseia-se em determinações efetuadas em pastilhas que são moldadas em anéis de inox ou PVC rígido, secadas, verificando-se a contração diametral das pastilhas (Ct), e submetidas a reabsorção de água, quando se observa o surgimento de trincas, expansão, e resistência a penetração de um mini penetrômetro padrão (Fortes, 1997).

O procedimento do ensaio de classificação expedita se dá do seguinte modo:

- A preparação da amostra:
  - Secagem do solo ao ar por, pelo menos, 24 horas;
  - Destorroamento e peneiramento até se obter amostras passante na peneira 0,42 mm;
  - Saturação da amostra e descanso por, no mínimo, 8 horas;
  - Espatulação e ajustagem da consistência até obtenção da penetração de 1 mm.

- Moldagem, secagem e determinação da contração das amostras:
  - Dispor a pasta nos anéis de PVC rígido, moldando-os em triplicadas;
  - Acondicionar os anéis moldados em suporte que permita mantê-los em posição vertical, até a cura (12 horas seco ao ar ou 6 horas seco em estufa a 60°C);
  - Aferir e registrar a contração diametral (Ct) com auxílio de paquímetro, em, pelo menos, três pontos de cada anel.
- Reidratação das pastilhas:
  - Dispor os anéis no equipamento de reidratação, que podem ser do tipo ‘a’ ou ‘b’, (Figura 2.12), acompanhar e registrar o tempo de saturação dos anéis. Deixar em repouso por, no mínimo, 2 horas.
- Penetração com penetrômetro padrão mini:
  - Determinar e registrar a penetração encostando a ponta do penetrômetro na superfície da área central da pastilha ou de blocos separados por trincas, soltando-o de maneira que a penetração se dê na vertical. Efetuar pelo menos 3 determinações em cada pastilha.

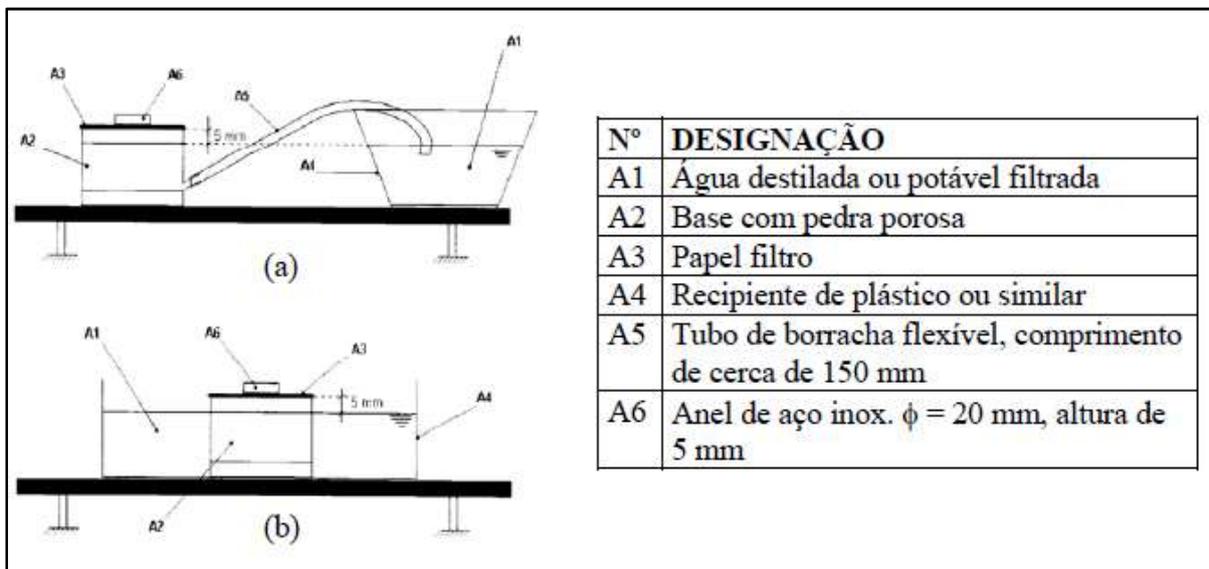


Figura 2.12: Modelos ‘a’ e ‘b’ dos aparelhos de reidratação d’água nas pastilhas. Fonte: Fortes e Nogami (1991)

Para análise dos resultados da classificação expedita, é realizada a média aritmética dos valores de contração diametral e penetração obtidos, em milímetros. Uma vez obtidos os

valores da contração diametral e da penetração, localá-los na carta apresentada na Figura 2.13, ou calculando o valor de  $c'$ , utilizando as fórmulas das Equações 2.2:

$$\text{Contração (Ct) de 0,1 a 0,5 mm} - c' = ((\log_{10}Ct) + 1) / 0,904 \quad (2.2)$$

$$\text{Contração (Ct) > 0,6 mm} - c' = ((\log_{10}Ct) + 0,7) / 0,5$$

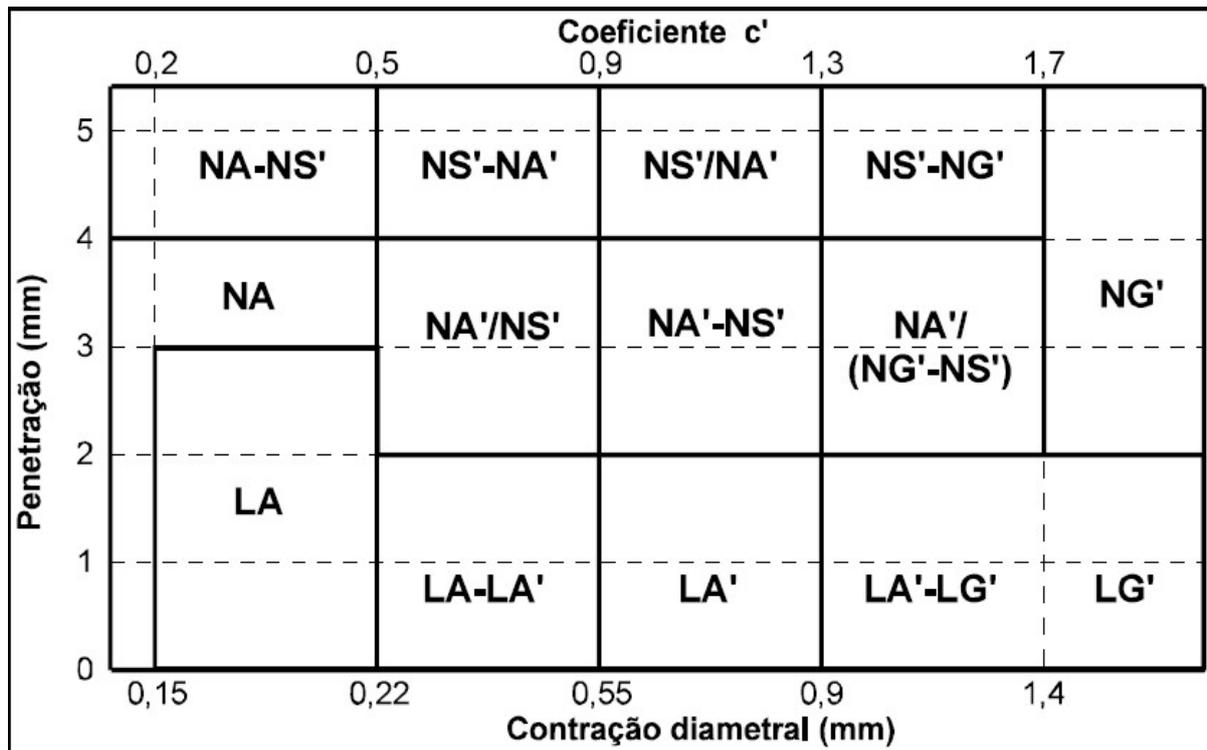


Figura 2.13: Carta de Classificação do Método das Pastilhas. Fonte: Fortes e Nogami (1991)

Fortes e Nogami (1991), alertam sobre a importância de se utilizar amostras representativas, uma vez que quantidade de solo necessária para realizar este ensaio é pequena. Os autores apresentam dados comparativos da metodologia MCT expedita com a metodologia MCT tradicional para classificação de solos, conforme é possível verificar na Tabela 2.8. Conclui-se, portanto, que a classificação MCT expedita apresenta resultados tão confiáveis quanto a metodologia MCT convencional.

Tabela 2.8: Comparativo das Classificações MCT convencional e expedita. Fonte: Fortes e Nogami (1991)

Solos	Classificação convencional MCT	Classificação Pastilhas	Solos	Classificação convencional MCT	Classificação Pastilhas
Am 01	LA'/LG'	LA'	Am 18	LA'	LA'/LG'
Am 02	LA'/LG'	LA'/LG'	Am 19	LG'	LG'
Am 03	LA'	LA'	Am 20	LA'	LG'
Am 04	LG'	LA'	Am 21	LG'	LG'
Am 05	LG'	LA'/LG'	Am 22	LA'/NA'	NA
Am 06	LA'	LA'	Am 23	LA'	NA/LA
Am 07	LG'	LA'/LG'	Am 24	NA	NA
Am 08	LG'	LA'/LG'	Am 25	LG'	LG'
Am 09	LA'	LA/LA'	Am 26	LG'	LG'
Am 10	LA'	LA/LA'	Am 27	NA	NA
Am 11	LA'	LA'	Am 28	LA'	LG'
Am 12	LG'	LG'	Am 29	NA	NA
Am 13	LA'/LG'	LA'/LG'	Am 30	NS'/NA'	NA/NS'
Am 14	LA'/LG'	LA'/LG'	Am 31	NA'	NA/NS'
Am 15	NS'	NA/NS'LA'/LG	Am 32	NS'/NA'	NA/NS'
Am 16	NA'/NGLA'/LG'	NG'	Am 33	NS'	NS'/NA'
Am 17	NA'	NA/NS'LA'/LG	Am 34	NA'/NS'	NA/NS'

#### 2.6.4. CARACTERIZAÇÃO DO SOLO MEDIANTE GRANULOMETRIA A LASER E ESPECTRÔMETRO DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X POR ENERGIA DISPERSIVA (XRF/EDX)

Nos solos de clima tropical as partículas de solo, geralmente, encontram-se na forma de agregados, não estando, portanto, dispersas. Tais agregados estão associados às fortes ligações eletrostáticas e fracas forças de *Van der Waals*. As ligações entre os minerais propiciam as pontes de argila, que podem também ocorrer entre substâncias orgânicas evoluídas da degradação de material orgânico decomposto (lignina e substâncias húmicas), ou devido aos géis amorfos de óxidos e hidróxidos de Fe e Al, os quais se depositam na superfície dos minerais (Paixão e Camapum de Carvalho, 1994; Farias *et al.*, 2010).

A geometria da agregação da macro ou microestrutura, a forma geométrica, e o tipo de composição mineral do solo podem influenciar nos parâmetros físicos como: resistência, permeabilidade e densidade do material. Dessa forma, o conhecimento da granulometria, que considera distribuição do tamanho de partículas, bem como o conhecimento dos minerais constituintes do solo, é de grande relevância para caracterizar e melhor compreender o solo quando submetidos a agentes erosivos (Paixão e Camapum de Carvalho, 1994; Farias *et al.*, 2010).

#### **2.6.4.1. GRANULOMETRIA A LASER**

A técnica instrumental da determinação do tamanho das partículas por meio do granulômetro a laser tem sido muito utilizada em detrimento aos métodos manuais convencionais, como por exemplo a sedimentação normatizada pela ABNT, devido, principalmente a acurácia dos resultados obtidos, geração de dados com maior rapidez e praticidade e ótima reprodutibilidade das curvas granulométricas.

Essa técnica utiliza o espalhamento ou difração da luz que incide na suspensão coloidal sendo correlacionável com o tamanho de partícula. Assim, para determinação do tamanho da partícula, o granulômetro a laser utiliza a teoria Mie, cujos efeitos são diferenciados de acordo com as particularidades das partículas, de modo a determinar de forma mais precisa a fração argila, quando comparada a outros resultados das metodologias tradicionais (Farias *et al.* 2010).

A teoria pelo espalhamento Mie considera previamente os índices de refração do material em análise e do meio dispersivo. Tal teoria pode ser aplicada a diferentes formatos e tamanhos de partículas por considerar o diâmetro esférico equivalente por volume-peso. Para utilização do efeito Mie no granulômetro a laser, deve-se aplicar nas amostras o ultrassom (CU – Com Ultrassom) para que seja promovido uma desagregação física das partículas agregadas (Farias *et al.* 2010).

Portanto, a técnica de realizar análises granulométricas dos materiais utilizando o equipamento granulômetro a laser, permite realizar investigações em tempo curto em relação aos meios manuais (metodologias convencionais), com muito boa reprodutibilidade. A utilização do ultrassom nas amostras promove a desagregação das partículas agregadas, gerando o mesmo efeito que o uso do defloculante (NaOH) das metodologias tradicionais.

#### **2.6.4.2. ESPECTRÔMETRO DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X POR ENERGIA DISPERSIVA (XRF/EDX)**

A espectrometria de fluorescência de raios-X por energia dispersiva – XRF/EDX é um ensaio laboratorial que se destaca como uma alternativa importante e de crescente aplicação na identificação mineralógica de solos, rochas e outros materiais como cerâmicas e líquidos.

Segundo dados do CAIQ (2022), o equipamento realiza um processo dinâmico, composto de análises rápidas e simples, que permitem a determinação simultânea ou sequencial da concentração de todos os elementos enquadrados entre o sódio (Na) e o urânio (U), sem a

necessidade de destruição da amostra, sem nenhum pré-tratamento químico e podendo atingir limites de detecção da ordem de 1 a 20 ppm (Figura 2.14).

Os resultados obtidos por este ensaio, podem ser utilizados para avaliação das modificações existentes nos teores de elementos químicos presentes no solo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo, podendo ser útil para avaliação dos processos erosivos em solos.

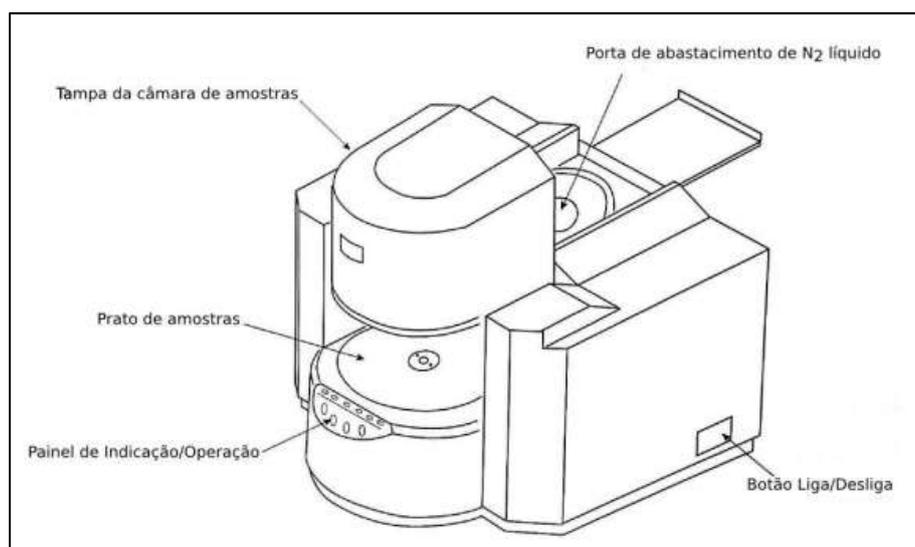


Figura 2.14: Representação esquemática do EDX-720 Shimadzu. Fonte: CAIQ (2022)

## 2.7. GEOPROCESSAMENTO E SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG)

Conceitualmente, o geoprocessamento é o conjunto de procedimentos, computacionais, que permitem a produção, manipulação e interpretação de mapas. A vantagem principal das ferramentas de geoprocessamento computacional é a facilidade em armazenar, trabalhar, recuperar e analisar mapas em ambientes que utilize Sistemas de Informação Geográficas.

Segundo Arcaya (2007), é bastante complicado encontrar um conceito único que defina Sistemas de Informações Geográficas (SIG), devido à utilização desses por várias áreas científicas ou domínios da atividade humana. Para a autora, a ideia mais comum de SIG está frequentemente associada à produção e análise de cartografia com uso da tecnologia computacional.

Maguire *et al.* (1991) apresentam algumas definições para SIG, são elas:

- Conjunto de funções automatizadas que dota os profissionais com avançadas capacidades para armazenar, capturar, manipular e visualizar dados geograficamente localizados.
- Sistema de ferramentas poderoso que permite recolher, guardar, encontrar, pesquisar, transformar e visualizar dados espaciais do mundo real.
- Sistema de base de dados onde a maior parte dos dados são indexados espacialmente e onde um conjunto de procedimentos são operados com o objetivo de responder a pesquisas sobre entidades espaciais da base de dados.

Câmara (2005), define os Sistemas de Informações Geográficas – SIG – como os sistemas que realizam o tratamento computacional de dados geográficos. Para o autor, a principal diferença de um SIG para um sistema de informação convencional é sua capacidade de armazenar tanto os atributos descritivos como as geometrias dos diferentes tipos de dados geográficos.

O geoprocessamento utiliza as ferramentas de SIG para realizar análises complexas, ao integrar dados de diversas fontes e ao criar bancos de dados georreferenciados. Estas possibilitam, ainda, automatizar a produção de documentos cartográficos. Dentre as tecnologias que compõem o geoprocessamento destacam-se: o sensoriamento remoto, a digitalização de dados, a automação de tarefas cartográficas, a utilização de sistemas de posicionamento global – GPS, dentre outros. (Matamoros Sevilla, 2016; Arcaya, 2007).

Os SIG estão relacionados à produção e análise de cartografia com uso da tecnologia computacional. São, portanto, ferramentas tecnológicas distintas e complementares que agem de forma conjunta e que parametrizam modelos de planejamento e visualizam os dados de forma gráfica (ou cartográfica), facilitando a compreensão (Jesus, 2013).

Atualmente é muito difícil conceber qualquer análise de fenômenos espaciais sem o auxílio de um Sistema de Informações Geográficas (SIG). Os SIG podem ser utilizados para solucionar problemas complexos de planejamento e gerenciamento, que envolvam a manipulação de dados espacialmente localizados. Deste modo, as tecnologias de dados espaciais digitais podem facilitar os trabalhos de compartimentação da carta geotécnica (Souza e Romão, 2017). A Figura 2.15 apresenta um fluxograma simplificado de como a cartografia geotécnica por intermédio dos SIG pode dar suporte a decisões.

O inventário, ou base de dados, é composto de dados iniciais, que são provenientes de produtos de sensoriamento remoto, da base cartográfica digital e de cartas complementares,

para alimentar o banco de dados para, assim, elaborar produtos da cartografia geotécnica (Souza e Romão, 2017).

Para Souza e Romão (2017) a cartografia geotécnica se mostra como ferramenta apropriada para entender os processos de degradação promovida pelas atividades antrópicas e para propor ações preventivas e restauradoras das boas condições ambientais. Podem, ainda, refletir a história, como também a dinâmica do desenvolvimento das condições geotécnicas, permitindo prognosticar a influência do ambiente na obra, assim como prever em qual aspecto essa interferirá no ambiente.

A utilização de técnicas aplicando SIG nos estudos de erosões em bordas de reservatórios de UHEs vem ganhando importância significativa, pois apresenta um custo econômico relativamente baixo e possibilita a visualização histórica do processo de uso e ocupação do solo, a análise da vulnerabilidade ambiental, a quantificação das perdas de solo e a determinação das áreas mais suscetíveis a processos erosivos (Almeida *et al.*, 2017).

As ferramentas de SIG podem ser utilizadas para avaliar os efeitos da topografia na suscetibilidade à erosão dos solos. A partir de modelos digitais de elevação, é possível obter informações sobre os desníveis entre os terrenos e mapas de declividade, hipsométrico e curvatura de vertentes, viabilizando a análise de comprimento de vertentes, de forma de bacias hidrográficas e de cálculo da perda de solo (Matamoros Sevilla, 2016).

Para Almeida *et al.* (2017) as técnicas de SIG nos estudos de erosões podem ser utilizadas como subsídio para a implantação de medidas mitigadoras e corretivas de processos erosivos no entorno de reservatórios. Outrossim, o desenvolvimento e aprimoramento de SIG, permite a geração de cenários prospectivos de uso e ocupação do solo e observação das tendências dos processos de erosão e assoreamento, auxiliando nas ações de planejamento e de manejo adequados do solo no entorno dos reservatórios.



Figura 2.15: Fluxograma do uso da cartografia geotécnica por intermédio dos SIG para suporte a decisões.  
Fonte: Souza e Romão (2017)

### 3. METODOLOGIA

A metodologia adotada para o desenvolvimento deste trabalho foi compartimentalizada em três etapas: análise geoespacial, trabalho de campo e estudo da erodibilidade. Cada etapa conta com subdivisões, tais como propostas nos objetivos específicos a serem alcançados.

Portanto, neste capítulo apresentam-se os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento da presente pesquisa, divididos em três etapas principais, quais sejam:

- Etapa I: Análise geoespacial, cujos objetivos específicos são a coleta das informações preexistentes, a delimitação da bacia a ser estudada, a caracterização da área de estudo e o pré-cadastro das feições erosivas.
- Etapa II: Trabalho de campo, com objetivo de fazer um reconhecimento da área das bordas do reservatório da UHE, validando as atividades executadas na etapa I; registrar as feições erosivas; e coletar amostras.
- Etapa III: Execução dos estudos da erodibilidade, realizando ensaios laboratoriais e elaboração dos mapas; análise e discussão dos resultados; conclusão.

A Figura 3.1 apresenta o fluxograma da estrutura da metodologia desta pesquisa.

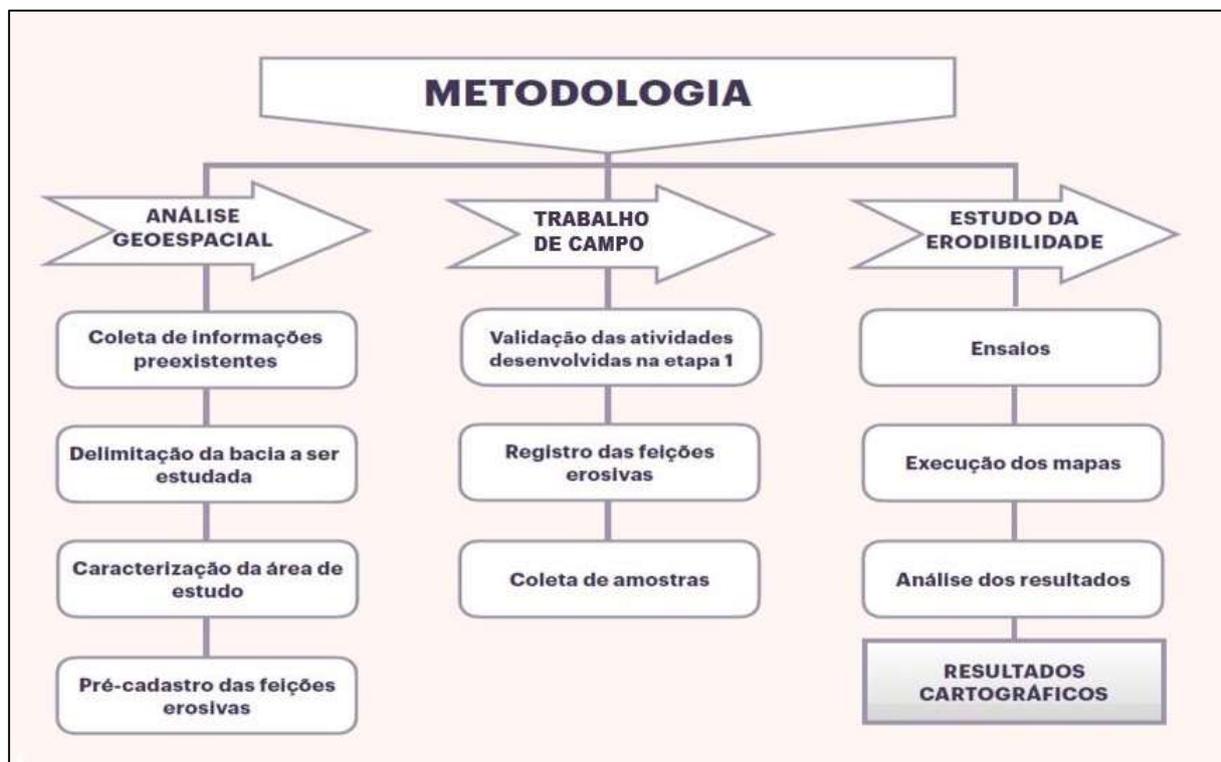


Figura 3.1: Fluxograma da estrutura metodológica desta pesquisa

Para o desenvolvimento da presente pesquisa foi utilizada a base cartográfica do banco de dados e produtos de sensoriamento remoto disponibilizado pelo grupo de pesquisa integrante do Projeto P&D – ANEEL/FURNAS/UFV/UNB (P&D SEDIMENTOS): “Modelagem em Diversas Escalas da Geração de Sedimentos em Erosões e o Aporte em Reservatórios de UHEs”, da Universidade Federal de Goiás em parceria com a Universidade de Brasília. As fontes dos dados e escalas são melhores descritas no item 3.3. da metodologia.

Os *softwares* de geoprocessamento utilizados foram o ArcMap – Manipulação e análise de dados e produtos finais de cartografia – versão 10.3.1, o Programa *Google Earth Pro* – Manipulação de imagens de satélite, mapas e relevo. O projeto foi organizado sob o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000), projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), para o Hemisfério Sul, fuso 23.

A elaboração dos mapas ocorreu, majoritariamente, no Centro Integrado de Pesquisa em Planejamento Geográfico (CIPGeo) do Instituto de Estudos Socioambientais (IESA) da Universidade Federal de Goiás (UFG).

Os ensaios laboratoriais foram realizados nos seguintes laboratórios da Universidade de Brasília – UnB: Laboratório de Geotecnia do departamento de engenharia civil, Central Analítica do Instituto de Química (CAIQ) e Laboratório de Infraestrutura Rodoviária (INFRALAB).

### **3.1. ETAPA I: ANÁLISE GEOESPACIAL**

Inicialmente foi feito um estudo preliminar, identificando os conceitos norteadores para o desenvolvimento desta pesquisa. Ato contínuo, foi realizada uma análise geoespacial da área de estudo, com coleta de informações preexistentes, para melhor compreender o tema a ser abordado.

A análise geoespacial iniciou-se pelo levantamento e análise das informações advindas do grupo de Projeto P&D SEDIMENTOS, utilizando como ferramenta computacional o programa *Google Earth Pro*. Objetivou-se com essas atividades: identificar, preliminarmente, a área de estudo, caracterizando-a de modo a iniciar o planejamento do trabalho de campo.

Com base nas informações disponíveis nos Relatórios Técnicos do P&D SEDIMENTOS, aliado ao uso do Programa *Google Earth Pro*, foi identificada a Área de

Influência Direta (AID) do reservatório de Batalha, de modo que foi possível reconhecer a área, identificando aspectos importantes do meio físico do reservatório.

O reconhecimento do meio físico permitiu a caracterização da área de estudo, conforme foi descrito no Capítulo 4, mais especificamente no item 4.1.1. Deste modo, foi possível descrever:

- A bacia do rio São Marcos: relatando sua abrangência, suas dimensões, seus afluentes e sua importância a nível de economia nacional e local para a população;
- A Usina Hidrelétrica de Batalha: relatando, de modo simplificado, seu processo de construção e operação, suas dimensões, capacidade de geração e sua cobertura vegetal ao longo dos anos;
- A Área de Influência Direta (AID): especificando suas dimensões, precipitações e temperaturas anuais, altitudes, substratos geológicos, geologia da bacia, relevo e os tipos de solo predominantes.

Durante a coleta de informações preexistentes foram identificados, também, os critérios utilizados para definir a Bacia de Contribuição Direta (BCD) a partir da AID. A localização e as dimensões da BCD foram estudadas, sendo definido que o processo de mapeamento, bem como o levantamento de campo, especialmente em nível de detalhe, desta pesquisa, se limitaria a BCD.

A AID foi delimitada a partir das bacias de contribuição do reservatório, excluindo-se as que estão à montante de outros reservatórios. Já a definição dos limites das Bacia de Contribuição Direta levou em conta inicialmente uma faixa de 5 km a partir do reservatório e, em um segundo momento, foram delimitadas as bacias que contribuem diretamente para o reservatório, excetuando as bacias à montante de outros represamentos.

A investigação inicial das ocorrências das feições erosivas, foi realizado pelo P&D SEDIMENTOS tendo como base o referido limite da BCD da AID do reservatório da UHE Batalha, mapeando, principalmente, as erosões dos tipos lineares e as laminares. Para tanto, foram inspecionadas visualmente as imagens históricas do *Google Earth PRO*, com ênfase nas mais atuais disponíveis, e, de forma concomitante, as imagens do Programa *China Brazil Earth Resources Satellite* (CBERS) 4-A, de junho de 2021, em fusão com a banda pancromática para atingir 2 metros de resolução espacial, mantendo-se a escala de visualização de 1:10.000. Além disso, foram compiladas informações de localização (município e coordenadas planas). As erosões foram identificadas em numerais sequenciais e seguidas pela letra B, indicando a UHE

de Batalha em análise. Salienta-se que o sequenciamento apresenta números faltantes, tendo em vista que todo o processo passou por revisões constantes, de modo a descartar possíveis erosões julgadas na última revisão, como inexistentes ou não relevantes (Furnas, 2021a). A análise das feições erosivas pré cadastradas pelo P&D SEDIMENTOS na BCD forneceu o suporte necessário para realizar o planejamento do trajeto do trabalho de campo. A Figura 3.2 apresenta um exemplo de erosão pré cadastrada pelo P&D SEDIMENTOS utilizando o Programa *Google Earth Pro*.



Figura 3.2: Imagem de erosão pré cadastrada pelo P&D ANEEL/FURNAS/UFG/UNB. Fonte: Furnas (2021a)

### 3.1.1. PLANEJAMENTO DO TRABALHO DE CAMPO

O planejamento do trabalho de campo partiu da análise do relatório RT\_07\_2021 (Furnas, 2021a) de modo a traçar uma rota de campo visando agilizar o processo de análise *in loco* das erosões pré cadastradas, objetivando validá-las.

Na fase de planejamento foi elaborada, também, a planilha de cadastro das feições erosivas, conforme Figura 3.3. A planilha foi utilizada no trabalho de campo para cadastrar as erosões (localização geográfica, tipo, agente deflagrador e condicionante), classificando-as quanto a origem (geologia, litologia e tipo de solo), relevo (forma, entorno e região), drenagem; além de pré classificar o solo quanto a cor e a textura e registrar o grau de antropização do local.

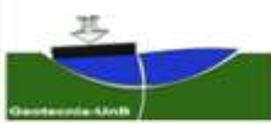
		<b>UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA</b> <b>PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA</b>		
		<b>FICHA DE CADASTRO DE EROSÕES</b>		
Nº DO PONTO:		Nº DA FOTO:		DATA:
Nº DA AMOSTRA:		HORIZINTE:	COBERTURA:	
LAT.:		LONG.:	TEMPERATURA:	TEMPO: ( )Sol; ( )Chuva; ( )Nublado
<b>ORIGEM</b>	GEOLOGIA:			
	LITOLOGIA: ( )Não rochosa; ( )Pouco rochosa; ( )Rochosa; ( )Muito rochosa; ( )Extremamente rochosa.			
	SOLO: ( )Argissolo; ( )Cambissolo; ( )Gleissolo; ( )Latossolo; ( )Neossolo.			
	DESCRIÇÃO DA CAMADA:			
<b>RELEVO</b>	FORMA: H ( )Convergente; ( )Divergente; ( )Planar. // V ( )Convexa; ( )Côncava; ( )Retilínea.			
	ENTORNO: ( )Morro/Colinas; ( )Escarpa; ( )Depressão; ( )Planalto/chapada; ( )Pedimento; ( )Planície; ( )Planície de Inundação; ( )Terraço fluvial.			
	REGIONAL: ( )Plano; ( )Suave ondulado; ( )Ondulado; ( )Forte ondulado; ( )Montanhoso.			
DRENAGEM: ( )Muito mal drenado; ( )Mal drenado; ( )Moderadamente drenado; ( )Bem drenado; ( )Acentuadamente drenado; ( )Fortemente drenado; ( )Excessivamente drenado.				
TÁTIL VISUAL: cor, textura e plasticidade:				
<b>EROSÃO</b>	TIPO: ( )Laminar; ( )Linear. // ( )Ligeira; ( )Moderada; ( )Forte; ( )Muito forte; ( )Extrema.			
	DEFLAGRADOR: ( )Água; ( )Vento; ( )Piping; ( )Criação de animais; ( )			
	CONDICIONANTE: <i>EROSÃO LAMINAR</i> - ( )Cobertura vegetal; ( )Morfologia; ( )Tipos de Solos.			
	<i>EROSÃO LINEAR</i> - ( )Topossequência; ( )Morfologia; ( )Pedologia ( )Hidrogeologia: ( )percolação da água, ( )urgências, ( )nível freático, ( )outro			
	( )Erosão Conectada; ( )Erosão Desconectada.			
OBSERVAÇÕES:				
GRAU DE ANTROPIZAÇÃO: ( )Nulo; ( )Leve; ( )Moderado; ( )Alto; ( )Pleno.				
OBSERVAÇÕES:				
Assinatura do(a) responsável				

Figura 3.3: Planilha de cadastro de erosões e coleta de amostras

### 3.2. ETAPA II: TRABALHO DE CAMPO

O trabalho de campo ocorreu no período de 29 de novembro a 02 de dezembro de 2021, com equipe composta pelos pesquisadores da Universidade Federal de Goiás (UFG), Universidade de Brasília (UnB) e o técnico representante da empresa Furnas S.A. (Figura 3.4). Teve como objetivo: cadastramento de feições erosivas; validação dos levantamentos feitos por parte do P&D SEDIMENTOS; observação dos perfis de solos expostos em decorrência de processos erosivos; e coletar amostras para realização de ensaios de caracterização e daqueles que permitirão a análise do comportamento geotécnico quanto à erodibilidade dos referidos materiais inconsolidados.



Figura 3.4: Equipe responsável pelo trabalho de campo

Os levantamentos ocorridos durante o trabalho de campo podem ser categorizados ou classificados, conforme descrito por Furnas (2021a), em quatro tipos de levantamentos, os quais foram utilizados para validar as atividades executadas na etapa I. Assim, os levantamentos realizados podem ser descritos como:

- I. **Perfil completo com descrição físico-morfológica e coleta de amostras:** se constitui em uma das formas mais completas para levantamento pedológico em campo. Neste tipo de levantamento, o perfil de solo é exposto por meio da abertura de uma trincheira ou aproveitamento de cortes nas margens de estradas.
- II. **Observação de perfil por meio de feições erosivas:** semelhante ao trabalho e atividades realizadas no perfil completo. No entanto, nesta forma de abordagem dá-se maior ênfase à observação das feições erosivas e seu comportamento em face do tipo de material, bem como o arranjo de suas camadas ou horizontes.
- III. **Levantamento com trado holandês:** neste tipo de levantamento não há possibilidade de observação, bem como descrição morfológica dos horizontes, tendo em vista que a retirada de amostras ocorre apenas com a mesma deformada. Por outro lado, dada a rapidez com a qual o material é retirado, é possível fazer a prospecção de um maior número de pontos e principalmente em maiores profundidades.
- IV. **Observação rápida:** é a forma mais simples e rápida de realizar levantamentos. No entanto, a descrição se restringe a porção superficial, sendo comumente utilizada apenas para confirmar a continuidade de outros levantamentos já realizados.

No cadastramento das erosões foi utilizada a ficha elaborada para essa finalidade, a qual foi preenchida em campo (Figura 3.5). O cadastramento foi acompanhado da coleta de amostras deformadas, com o uso de trado holandês e de amostras indeformadas, neste caso, utilizando-se um amostrador do tipo copo ou caneco, disponibilizado pela Escola de Agronomia da UFG e anéis de aço disponibilizados pelo LABOGEF / IESA / UFG. A Figura 3.6 exibe o procedimento de coleta e as referidas amostras obtidas.

		<b>UNIVERSIDADE DE BRÁSILIA</b> <b>PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA</b>			
<b>FICHA DE CADASTRO DE EROSÕES</b>					
Nº DO PONTO: <i>P8</i>		Nº DA FOTO: <i>2329 - 2335</i>		DATA: <i>30/11/21</i>	
Nº DA AMOSTRA: <i>P8</i>		HORIZINTE: <i>Diverso</i>		COBERTURA: <i>Não possui</i>	
LAT.: <i>17° 1' 8"</i>		LONG.: <i>47° 13' 59"</i>		TEMPERATURA: <i>—</i>	
TEMPO: <input checked="" type="checkbox"/> Sol; ( ) Chuva; ( ) Nublado					
<b>ORIGEM</b>	GEOLOGIA: <i>Não identificável visualmente.</i>				
	LITOLOGIA: <input checked="" type="checkbox"/> Não rochosa; ( ) Pouco rochosa; ( ) Rochosa; ( ) Muito rochosa; ( ) Extremamente rochosa.				
	SOLO: ( ) Argissolo; ( ) Cambissolo; ( ) Gleissolo; <input checked="" type="checkbox"/> Latossolo; ( ) Neossolo.				
	DESCRIÇÃO DA CAMADA: <i>latossolo amarelo</i>				
<b>RELEVO</b>	FORMA: H <input checked="" type="checkbox"/> Convergente; ( ) Divergente; ( ) Planar. // V ( ) Convexa; ( ) Côncava; <input checked="" type="checkbox"/> Retilínea.				
	ENTORNO: <input checked="" type="checkbox"/> Morro Colinas; ( ) Escarpa; ( ) Depressão; ( ) Planalto chapada; ( ) Pedimento; ( ) Planície; ( ) Planície de Inundação; ( ) Terraço fluvial.				
	REGIONAL: <input checked="" type="checkbox"/> Plano; ( ) Suave ondulado; ( ) Ondulado; ( ) Forte ondulado; ( ) Montanhoso.				
DRENAGEM: ( ) Muito mal drenado; ( ) Mal drenado; <input checked="" type="checkbox"/> Moderadamente drenado; ( ) Bem drenado; ( ) Acentuadamente drenado; ( ) Fortemente drenado; ( ) Excessivamente drenado.					
TÁTIL VISUAL: cor, textura e plasticidade: <i>Perfil diverso e profundo Amarelo; Argila siltosa/plástica</i>					
<b>EROSÃO</b>	TIPO: ( ) Laminar; <input checked="" type="checkbox"/> Linear. // ( ) Ligeira; ( ) Moderada; ( ) Forte; <input checked="" type="checkbox"/> Muito forte; ( ) Extrema.				
	DEFLAGRADOR: <input checked="" type="checkbox"/> Água; ( ) Vento; ( ) Piping; ( ) Criação de animais; <input checked="" type="checkbox"/> <i>Antropica</i>				
	CONDICIONANTE: EROSAO LAMINAR - ( ) Cobertura vegetal; ( ) Morfologia; ( ) Tipos de Solos. EROSAO LINEAR - ( ) Toposequência; <input checked="" type="checkbox"/> Morfologia; <input checked="" type="checkbox"/> Pedologia; <input checked="" type="checkbox"/> Hidrogeologia; ( ) percolação da água; ( ) surgências; ( ) nível freático; <input checked="" type="checkbox"/> outro <i>Drenagem</i>				
	<input checked="" type="checkbox"/> Erosão Conectada; ( ) Erosão Desconectada.				
	OBSERVAÇÕES: <i>Coletou-se amostras até a profundidade 1.0 metro, totalizando 5 amostras</i>				
GRAU DE ANTROPIZAÇÃO: ( ) Nulo; ( ) Leve; ( ) Moderado; ( ) Alto; <input checked="" type="checkbox"/> Pleno.					
OBSERVAÇÕES: <i>Fazenda Porto Velho, proprietário Sr. Edilson</i>					
Assinatura do(a) responsável 					

Figura 3.5: Ficha de cadastramento do Ponto 8 preenchida no campo



Figura 3.6: Coleta de amostras com a) trado holandês e b) amostrador de amostra indeformáveis tipo copo ou caneco

Foram cadastrados, entre os dias 29/11/2021 e 02/12/2021, 24 pontos pertencentes a área de estudo que identificavam a localização geográfica, altitude e algumas observações preliminares importantes. Dentre os referidos pontos, foram amostrados de 6 localidades distintas (P7, P8, P13, P22, P23 e P24), conforme é apresentado na Tabela 3.1, na qual os pontos com destaque representam os pontos amostrados. As amostras foram coletadas variando a profundidade, de modo que a amostra A1 corresponde a profundidade 0-20 cm, A2: 20-40 cm, A3: 40-60 cm e assim sucessivamente. Foram coletadas 38 amostras deformadas dos pontos P7, P8, P13, P22, P23 e P24, em profundidades que variam do A1, até A10 para alguns pontos; e 18 amostras indeformadas dos pontos P7, P22 e P24, nas profundidades A1 e A2 (Figura 3.7). Os ensaios foram realizados com as amostras em condição de umidade natural (N) e higroscópica (H).

Tabela 3.1: Localização geográfica e sucinta descrição preliminar de cada ponto cadastrado

COORD. X	COORD. Y	ALTITUDE	OBSERVAÇÕES	DATA
UTM (m)	UTM (m)	(m)		
257369.14	8119933.80	861	(P1) Erosão laminar	29/11/2021
256276.01	8119299.21	822	(P2) Represa próxima aos pontos 23 e 24	29/11/2021
256313.05	8119396.52	819	(P3) Latossolo vermelho-amarelo sobre Filito carbonoso. Erosão de grande escala	29/11/2021
258432.32	81111466.36	794	(P4) Filito untuoso com microdobramentos. Drenagem na borda do reservatório.	30/11/2021
258530.92	8111188.99	789	(P5) Ponto dentro do reservatório na época da cheia. Latossolo vermelho-amarelo. Presença de matéria orgânica nos horizontes superficiais. Filito carbonoso	30/11/2021
258550.82	8111359.60	788	(P6) Ponto dentro do reservatório na época da cheia	30/11/2021
<b>258427.00</b>	<b>8111171.79</b>	<b>808</b>	<b>(P7) Ponto da chuva intensa. Retirado amostras P7</b>	<b>30/11/2021</b>
<b>262271.04</b>	<b>8116975.85</b>	<b>824</b>	<b>(P8) Fazenda Porto Velho. Latossolo amarelo. Retirado amostras P8</b>	<b>30/11/2021</b>
262239.61	8116981.34	821	(P9) Fazenda Porto Velho. Plantação	30/11/2021
262246.83	8116944.82	821	(P10) Fazenda Porto Velho. Plintossolo Pétrico sobreposto ao "Latossolo Amarelo"	30/11/2021
264777.67	8111585.45	779	(P11) Fazenda Porto Velho. Próximo ao reservatório	30/11/2021
264173.23	8111545.38	780	(P12) Fazenda Porto Velho. Próximo ao reservatório. Argissolo amarelo	30/11/2021
<b>264223.16</b>	<b>8111342.67</b>	<b>787</b>	<b>(P13) Fazenda Porto Velho. Ponto dentro do reservatório na época da cheia. Retirado amostras P13</b>	<b>30/11/2021</b>
266129.10	8113900.35	792	(P14) Ponte com gabião	01/12/2021
267928.19	8112820.83	800	(P15) Latossolo Vermelho	01/12/2021
264906.85	8116275.40	903	(P16) Neossolo Litólico/Plintossolo Pétrico	01/12/2021
271452.88	8112582.21	815	(P17) Via de acesso sem pavimento	01/12/2021
270481.22	8112554.59	839	(P18) Plintossolo Pétrico	01/12/2021
270561.34	8112477.37	826	(P19) Latossolo Vermelho-Amarelo	01/12/2021
271835.57	8109654.62	908	(P20) Fazenda Zanoli	01/12/2021
266576.02	8110616.14	803	(P21) Latossolo Vermelho-Amarelo	01/12/2021
<b>266579.77</b>	<b>8110650.93</b>	<b>802</b>	<b>(P22) Latossolo Vermelho-Amarelo. Retirado amostras P22</b>	<b>01/12/2021</b>
<b>256290.31</b>	<b>8119266.17</b>	<b>816</b>	<b>(P23) Represa particular. Plintossolo Pétrico. Retirado amostras P23 do aterro de cascalho</b>	<b>02/12/2021</b>
<b>256270.30</b>	<b>8119306.84</b>	<b>815</b>	<b>(P24) Represa particular. Retirado amostras P24</b>	<b>02/12/2021</b>



Figura 3.7: Amostras deformadas e indeformadas coletadas

### 3.3. ETAPA III: ESTUDO DA ERODIBILIDADE

A etapa III, estudo da erodibilidade, consistiu na realização dos ensaios laboratoriais, utilizando as amostras coletadas na etapa II, na elaboração dos mapas e na análise e discussão dos resultados.

Os ensaios laboratoriais e suas referências normativas para execução foram:

- Umidade natural – Realizada com base na NBR 6457/2016;
- Classificação e caracterização expedita MCT – Realizado com base no método das pastilhas para identificação expedita de Solos Tropicais, metodologia MCT, proposto por Fortes e Nogami (1991);
- Granulometria a laser – Equipamento da marca Microtrac MRB modelo *Flowsync*;
- Espectrômetro de fluorescência de raios x por energia dispersiva (XRF/EDX);
- Massa específica aparente com emprego de balança hidrostática – Realizado com base na NBR 16867/20;

- Perda de massa por imersão – Realizado com base na norma DNER 256/94;
- Infiltrabilidade – Realizado com base na norma DNER-ME 194/88.

A Tabela 3.2, lista, em ordem alfabética, os mapas elaborados e suas respectivas escalas. Alguns metadados (camada, fontes e escala/resolução de dados) utilizados para elaborar os mapas estão listadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.2: Mapas elaborados e suas respectivas escala dos dados

<b>MAPA</b>	<b>ESCALA DOS DADOS</b>
Comprimento de fluxo	1:100.000
Curvaturas	1:100.000
Declividade	1:100.000
Dissecação	1:100.000
Distribuição das feições erosivas	1:25.000
Erodibilidade	1:100.000
Geologia	1:250.000
Geomorfologia – Unidades e relevo	1:250.000
HAND – Altura acima da drenagem mais próxima	1:100.000
Hipsometria	1:100.000
Litologia	1:250.000
Localização	1:25.000
Modificações antrópicas	1:25.000
Solos	1:50.000
Susceptibilidade às erosões laminares	1:50.000
Susceptibilidade às erosões lineares	1:50.000
Uso e coberturas do solo	1:100.000

Tabela 3.3: Metadados utilizados para elaboração dos mapas

CAMADA	FONTE DE DADOS	ESCALA/RESOLUÇÃO DE DADOS
Área de Preservação Permanente; Reserva Legal e Área de uso restrito	CAR	1:50.000
Bacia Hidrográfica	Meta 1	1:25.000
Cobertura e uso do solo (2013 - Labogef)	Labogef/Furnas com base em imagens <i>LandSat</i> 8 de 26 de julho de 2013	30 metros
Drenagem (detalhe)	Meta 1	1:25.000
Estações meteorológicas	INMET e Meta 1	1:250.000
Geológicos	CPRM	1:250.000
Imagens CBRES 4A	INPE	8 metros
Imagens de alta Resolução	FURNAS	80 centímetros
Imagens Sentinel	NASA	10 metros
Limites das propriedades rurais	CAR	1:50.000
Localidades e Limites administrativos	IBGE	1:250.000
Malha urbana e viárias	Meta 1	1:25.000
MDE (NASADEM e SRTM)	Meta 1 (NASADEM e SRTM)	30 metros
Nascentes	CAR	1:50.000
Ocorrências Erosivas	Meta 1	1:25.000
Relevo Sombreado (NASADEM e SRTM)	NASA	30 metros
Reservatório	SIC-Goiás; GEO-Sisemanet; Meta 1	1:100.000
Solos	SIC-Goiás; GEO-Sisemanet; Equipe Labogef/Furnas	1:50.000
Unidades de Conservação	MMA	1:250.000
Vegetação nativa e áreas consolidadas	CAR	1:50.000

**CAR:** Cadastro Ambiental Rural

**Labogef/Furnas:** Laboratório de Geomorfologia, Pedologia e Geografia Física do Instituto de Estudos Sócio Ambientais da Universidade de Goiás em parceria com Furnas Centrais Elétricas

**CPRM:** Serviço Geológico do Brasil

**Meta 1:** Frente de ação número 1 (Modelagem Cartográfica) do Projeto P&D SEDIMENTOS

**FURNAS:** Furnas Centrais Elétricas S.A.

**MMA:** Ministério do Meio Ambiente

**GEO-Sisemanet:** Sistema de Informação do estado de Minas Gerais

**NASA:** Agência Espacial estadunidense

**IBGE:** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

**NASADEM:** Reprocessamento de dados do SRTM

**INMET:** Instituto Nacional de Meteorologia

**SIC-Goiás:** Superintendência de Geologia e Mineração para o estado de Goiás

**INPE:** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

**SRTM:** Missão Topográfica de Radar Embarcado (*Shuttle Radar Topography Mission*)

### 3.3.1. ENSAIOS LABORATORIAIS

Nesta seção será apresentada a execução dos ensaios laboratoriais realizados nos seguintes laboratórios da Universidade de Brasília – UnB: Laboratório de Geotecnia do departamento de engenharia civil, Central Analítica do Instituto de Química (CAIQ) e Laboratório de Infraestrutura Rodoviária (INFRALAB). Os ensaios foram realizados durante o período compreendido entre os meses 12/2021 a 05/2022, utilizando amostras coletadas durante o trabalho de campo ocorrido entre os dias 29/11/2021 a 02/12/2021.

#### 3.3.1.1. UMIDADE NATURAL E HIGROSCÓPICA

O ensaio foi realizado com base na NBR 6457/2016: Amostras de Solo – Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização.

Foram utilizados os seguintes aparelhos: Balança com precisão de 0,001g, estufa com temperatura aproximada de 100 °C, cápsulas e pinças metálicas. A Figura 3.8 apresenta alguns dos equipamentos utilizados.



Figura 3.8: Equipamentos utilizados para o ensaio de umidade natural

#### 3.3.1.2. CLASSIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO EXPEDITA MCT

O ensaio de caracterização foi realizado pelo Método das Pastilhas para Identificação Expedita de Solos Tropicais, metodologia MCT, proposto por Fortes e Nogami (1991). O método baseia-se em determinações efetuadas em pastilhas que são moldadas em anéis de PVC,

secadas, verificando-se a contração diametral, e submetidas a reabsorção de água, quando se observa o surgimento de trincas, expansão, e resistência a penetração de um penetrômetro padrão (mini).

Aparelhos utilizados: Anéis de PVC com diâmetro interno de  $20 \pm 0,05$  mm; suporte de apoio para secagem dos anéis moldados; cuba para reabsorção d'água pela pastilha; paquímetro com precisão de 0,1 mm; espátula flexível de lâmina de cerca de 80x20mm; estufa que permita manter a temperatura de aproximadamente 60 °C; peneiras de malhas quadradas, com aberturas nominais de 0,42 e 2,00 mm; penetrômetro padrão (mini) de 10 g de massa e agulha de 1,3 mm de diâmetro, cerca de 5 mm de comprimento útil e ponta plana perpendicular ao seu eixo; papel filtro; placa de vidro plano esmerilhado.

A preparação da amostra (Figura 3.9) é um processo que se inicia com a secagem do solo ao ar por, pelo menos 24 horas, seguida por destorroamento e peneiramento até obter-se amostra passante na peneira 0,42 mm. Na sequência a amostra é saturada com água destilada e deixada descansar em cápsula estanque por, no mínimo, 8 horas. Após o descanso, a pasta é submetida a espatulação e ajustagem de sua consistência sobre a face esmerilhada da placa de vidro; terminada a espatulação, determina-se a consistência da pasta utilizando-se do penetrômetro, ajustando-se o teor de umidade até conseguir a penetração 1 mm.

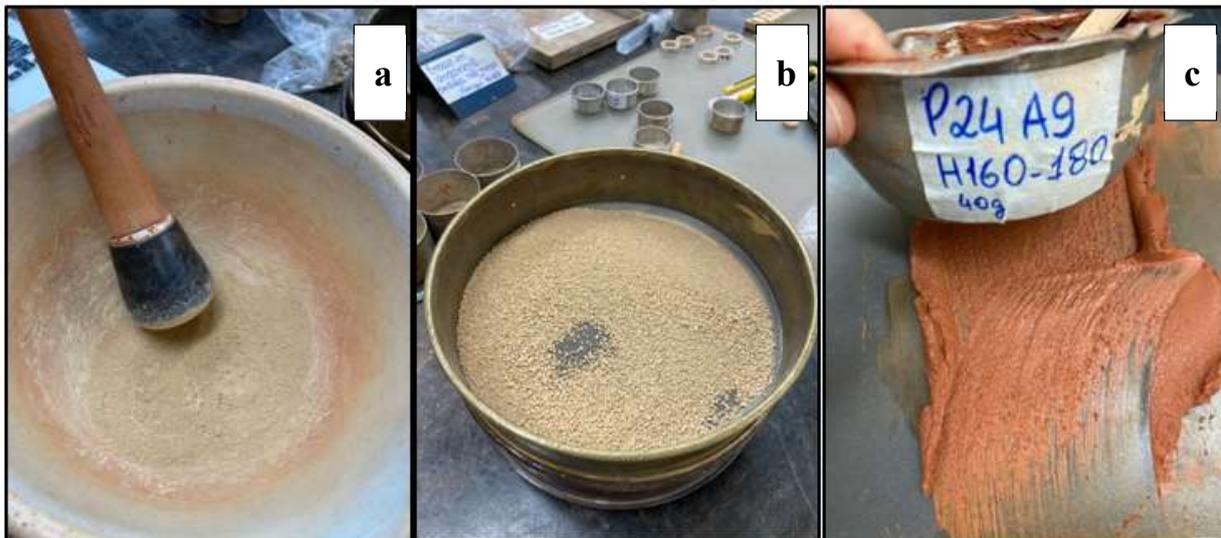


Figura 3.9: Preparação da amostra para ensaio de caracterização expedita: a) destorroamento, b) peneiramento, c) espatulação.

Após a preparação da pasta, é executada a moldagem triplicada em anéis PVC; os anéis são acondicionados em suporte apropriado que permita mantê-los em posição vertical, até secagem (12 horas seco ao ar ou 6h seco em estufa a 60 °C). A Figura 3.10 mostra o processo de secagem pós moldagem das amostras nos anéis de PVC, é possível identificar visivelmente que as amostras (pastilhas) apresentam grau elevado de contração diametral; posteriormente a contração diametral é aferida com auxílio de paquímetro manual.



Figura 3.10: Secagem das pastilhas moldadas nos anéis de PVC em suporte vertical

Após a moldagem, a pasta que sobrou, ainda úmida, é dividida em 2 partes. A primeira parte é coletada para aferição da umidade de moldagem. A outra parte é executada o ensaio de plasticidade.

O ensaio de plasticidade é executado buscando-se moldar um rolinho de aproximadamente 10 cm de comprimento, cujo diâmetro almejado é de, aproximadamente,

3mm. O comportamento apresentado pelo rolinho é correlacionar com o grau de plasticidade da amostra, conforme Tabela 3.4. A Figura 3.11 apresenta exemplo do ensaio executado.

Tabela 3.4: Correlação das características da amostra com o grau de plasticidade

Plasticidade	
Não se consegue obter rolinhos com diâmetro inferior a 3 mm	Não plástico (np)
Obtém-se com muita dificuldade rolinhos com diâmetro de 3 mm, que se rompem facilmente	baixa plást.. (bp)
Obtém-se facilmente rolinhos com diâmetro de 3 mm, mas os mesmos rompem-se facilmente ao serem dobrados	media plasticidade (mp)
Obtém-se facilmente rolinhos com diâmetro de 3 mm, e os mesmos podem ser facilmente dobrados e remoldados	alta plasticidade (ap)

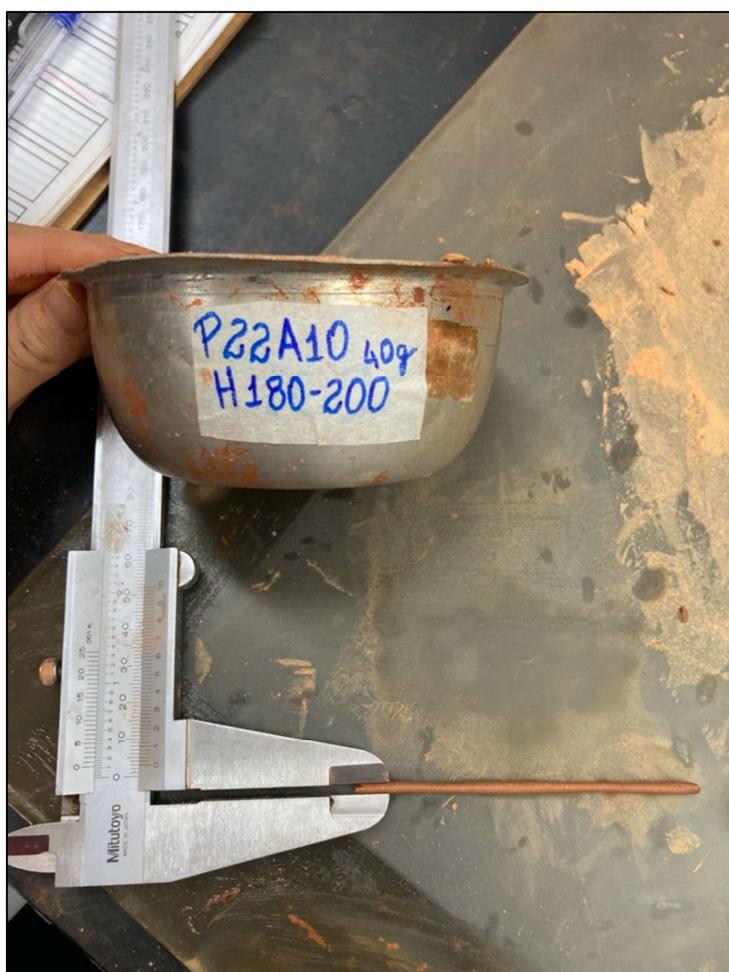


Figura 3.11: Ensaio de plasticidade para amostra P22A10

Após secagem e aferição da contração diametral, as pastilhas são submetidas ao processo de reidratação, onde ficarão em repouso por, no mínimo 2 horas. A Figura 3.12 apresenta o equipamento utilizado para reidratar as pastilhas.



Figura 3.12: Equipamento utilizado para reidratação das pastilhas

A medida da penetração ocorre após a hidratação. Foi utilizado o penetrômetro padrão conforme descrito nos equipamentos utilizados. A Figura 3.13 mostra as pastilhas moldadas em 14/02/22 (amostras P22A10 {AI, AII, AIII}, P24A1 {BI, BII, BIII}, e P24A2 {CI, CII, CIII}) após a penetração. Conforme pode ser observado na Figura 3.13, as amostras P24A1 {grupo B} e P24A2 {grupo C} não apresentaram penetração, tampouco variação de sua condição inicial a hidratação, enquanto que a amostra P22A10 apresentou elevada expansão, penetração e fissuração das pastilhas.



Figura 3.13: Pastilhas após penetração com penetrômetro padrão

Por fim, o ensaio determina o grupo MCT relacionando a média de contração diametral com a média de penetração. A Figura 3.14 apresenta os resultados das planilhas de cálculo utilizada para a amostra P22A10, na qual identifica a amostra como sendo argila não laterítica (NG). Correlacionando a caracterização expedita com a plasticidade da amostra, identificou-se a amostra com média plasticidade (mp).

**IDENTIFICAÇÃO E DESCRIÇÃO EXPEDITA (VISUAL-TÁCTIL) DE SOLOS  
METODOLOGIA MCT**

<b>CLASSIFICAÇÃO FINAL</b>	<b>Argila não laterítica</b>	<b>Amostra</b>	<b>P22A10 H180-200</b>
<b>Observações:</b> GI - Seco em esfufa po 6 horas		<b>Data:</b>	14/02/2022

Plasticidade	
Não se consegue obter rolinhos com diâmetro inferior a 3 mm	Não plástico (np)
Obtém-se com muita dificuldade rolinhos com diâmetro de 3 mm, que se rompem facilmente	baixa plást.. (bp)
Obtém-se facilmente rolinhos com diâmetro de 3 mm, mas os mesmos rompem-se facilmente ao serem dobrados	media plasticidade (mp)
Obtém-se facilmente rolinhos com diâmetro de 3 mm, e os mesmos podem ser facilmente dobrados e remodelados	alta plasticidade (ap)

Medidas dos anéis				
Anel	Contração (mm)	Penetração (mm)	Tempo de ascensão d'água	Peculiaridades da amostra após 2 horas de reidratação
AI	2,0	4,3	08'45"	Expansão, fissuração, baixa resistencia
AII	2,0	3,03	09'10"	Expansão, fissuração, baixa resistencia
AIII	2,1	3,4	09'05"	Expansão, fissuração, baixa resistencia

Umidade de moldagem, obtido dos anéis (%) :	<b>57,5</b>	Média contração (mm) :	<b>2,0</b>
		Média penetração (mm) :	<b>3,6</b>

Cálculo de c'	
Contração ct de 0,1 a 0,5 mm - $c' = (\log_{10}ct + 1)/0,904$	<b>2,01</b>
Contração ct > 0,6 mm - $c' = (\log_{10}ct + 0,7)/0,5$	

**IDENTIFICAÇÃO E DESCRIÇÃO EXPEDITA (VISUAL-TÁCTIL) DE SOLOS  
METODOLOGIA MCT**

Determinação do Grupo MCT		
c'	Penetração (mm)	Grupo MCT
< 0,5	< 3,0	LA
	3,1 a 3,9	NA
	>=4,0	NA / NS'
0,6 a 0,9	< 2,0	LA - LA'
	2,1 a 3,9	NA' - NS'
	>=4,0	NS' - NA'
1,0 a 1,3	< 2,0	LA'
	2,1 a 3,9	NA'
	>=4,0	NS'
1,4 a 1,7	< 2,0	LA' - LG'
	2,1 a 3,9	NA' / NG' - NS'
	>=4,0	NS' - NG'
>= 1,8	< 2,0	LG'
	<b>2,1 a 3,9</b>	<b>NG</b>
	>=4,0	NS'

Significado de - e

- separa	opção	equivalente
/ separa	opção	decrecente

NA = Areia não laterítica  
 NA' = Arenoso não laterítico  
 NS' = Siltoso não laterítico  
**NG = Argila não laterítica**  
 LA = Areia laterítica  
 LA' = Arenoso laterítico  
 LG' = Argiloso laterítico

UMIDADE DE MOLDAGEM			
P22A10 H180-200			
Capsula nº	A I	A II	A III
Capsula (g)	7,012	7,056	7,362
Capsula+solo úmido (g)	22,507	18,396	18,689
Capsula+solo seco (g)	16,875	14,243	14,542
Umidade (%)	<b>57,102</b>	<b>57,785</b>	<b>57,758</b>
		<b>w (%) :</b>	<b>57,55</b>

Figura 3.14: Planilhas de cálculo para caracterização MCT expedita para amostra P22A10

### 3.3.1.3. GRANULOMETRIA A LASER

O ensaio de granulometria a laser foi executado pelo equipamento da marca Microtrac MRB, modelo Flowsync (Figura 3.15), que se encontra instalado no Laboratório de Infraestrutura Rodoviária (INFRALAB), Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília. O ensaio foi executado com base na metodologia proposta por Farias *et al.* (2010).

A Figura 3.16 apresenta uma das 18 amostras ensaiadas, cuja preparação foi feita mediante secagem ao ar por 24h, destorroamento com mão de grau e peneiramento até obter-se amostra suficiente passante na peneira 0,42 mm.

Foram ensaiadas 18 amostras de 6 pontos distintos, nas profundidades superficiais (2 amostras) e finais (1 amostra) em que foram coletadas: P7A1, P7A2, P7A3; P8A1, P8A2, P8A5; P13A1, P13A2, P13A6; P22A1, P22A2, P22A10; P23A1, P23A2, P23A4 e P24A1, P24A2, P24A10. Cada amostra foi ensaiada para as condições Sem Ultrassom (SU) e Com Ultrassom (CU – equivalente a ‘com defloculante’) em 3 ciclos cada uma, com tempo de execução de 60 segundos para cada ciclo e, ao final das 3 análises, foi gerada uma análise ‘média’ com base nos 3 ciclos realizados.



Figura 3.15: Equipamento Granulômetro a Laser - Marca Microtrac MRB, modelo Flowsync



Figura 3.16: Amostra utilizada para realizar o ensaio de granulometria a laser

### 3.3.1.4. ESPECTRÔMETRO DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X POR ENERGIA DISPERSIVA (XRF/EDX)

O ensaio de Espectrômetro de Fluorescência de Raios X (tubo de Rh) por Energia Dispersiva (XRF/EDX) foi realizado no equipamento da marca Shimadzu, modelo EDX 720HS, na Central Analítica do Instituto de Química (CAIQ) da Universidade de Brasília. A Figura 3.17 apresenta o referido equipamento.

O equipamento realiza análise elementar (faixa de Na - U), com recipiente para amostras de tamanho de até 300 mm (diâmetro) x 150 mm (altura). Possui trocador automático de colimadores, sistema de câmera CCD para visualização de amostra, e motor acionador de carrossel para amostras líquidas e sólidas.



Figura 3.17: Equipamento Espectrômetro de Fluorescência de Raios X por Energia Dispersiva (XRF/EDX)

O preparo das amostras seguiu 03 passos, conforme ilustra a Figura 3.18:

1. Transferir a amostra homogênea e finamente dispersa para um porta-amostra. A quantidade necessária de amostra deve apenas preencher o fundo do porta-amostra;
2. Identificar adequadamente o porta-amostra;
3. Acondicionar os porta-amostras dentro do pote ZIPLOC para posterior análise no equipamento.

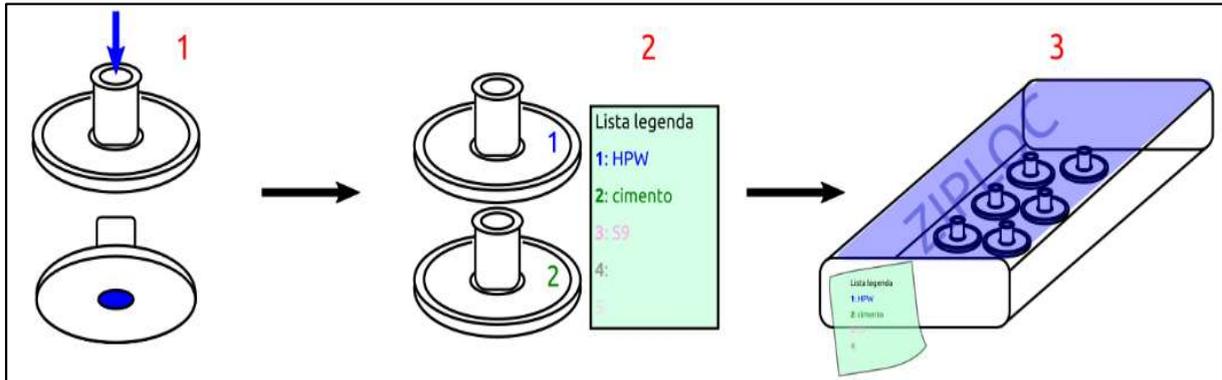


Figura 3.18: Procedimento de preparo de amostras para realização do ensaio de XRF/EDX

### 3.3.1.5. MASSA ESPECÍFICA APARENTE COM EMPREGO DE BALANÇA HIDROSTÁTICA

O ensaio de massa específica aparente com emprego de balança hidrostática foi realizado em conformidade com a NBR 16867 – Massa específica aparente de amostras indeformadas de solo.

Foram ensaiadas 6 amostras dos pontos P7, P22 e P24, nas profundidades superficiais e  $H = +20$  cm em umidade natural. A Figura 3.19 exhibe as amostras nas diversas fases do ensaio.

O objetivo de realizar esse ensaio é de caracterizar, verificar e correlacionar a massa específica aparente de amostras indeformadas com a erodibilidade identificada nos ensaios de perda de massa por imersão e infiltrabilidade.



Figura 3.19: Ensaios de massa específica aparente: a) amostras indeformadas; b) e c) preparação das amostras; d) e e) pesagem das amostras em balança hidrostática

### 3.3.1.6. PERDA DE MASSA POR IMERSÃO

O ensaio de perda de massa por imersão foi executado com base a norma DNER 256/94 - Determinação da perda de massa por imersão.

Foram executadas 2 rodadas de ensaios com 6 amostras indeformadas de cada vez, em umidade natural (N), reaproveitando-a para a umidade higroscópica (H - seco ao ar por, pelo menos, 10 dias) na segunda rodada. As amostras são oriundas de 3 pontos distintos (P7, P22 e P24), nas profundidades superficial (A1) e até 20 cm (A2).

O procedimento do ensaio baseia-se em sacar 10 mm do corpo de prova (Figura 3.20a) e posicionar a amostra horizontalmente, submergindo toda a amostra em água (Figura 3.20b) por, no mínimo, 20h; coletar, secar em estufa, pesar e registrar toda a massa desprendida pela amostra (Figura 3.20c).

A Figura 3.21 apresenta imagens de amostras extraídas do mesmo ponto e profundidade, ensaiadas em diferentes ocasiões nas umidades natural (a) e higroscópica (b –

seco ao ar). É possível verificar visivelmente o quantitativo de massa despreendida muito semelhante das amostras.



Figura 3.20: Ensaio de perda de massa por imersão. a) Saque de 10mm do corpo de prova; b) Submersão das amostras em água; c) massa despreendida após secagem em estufa.

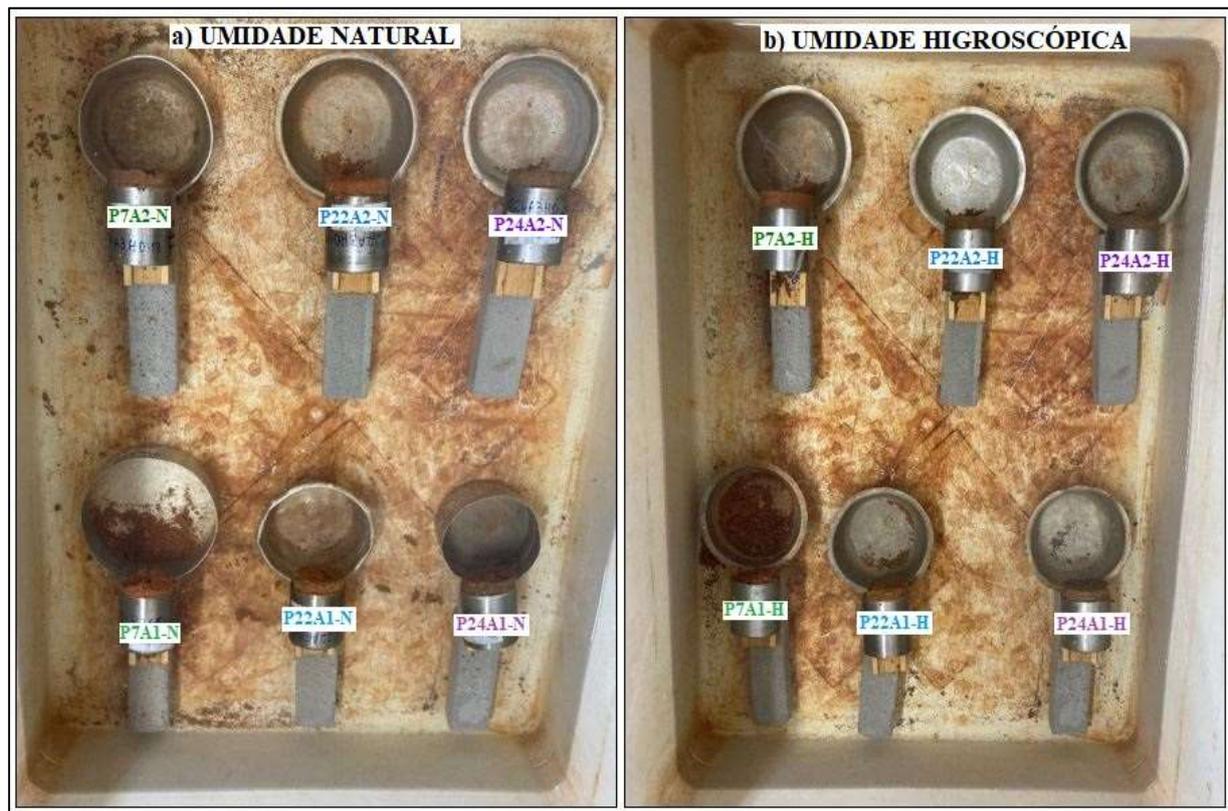


Figura 3.21: Comparativo dos ensaios de perda de massa por imersão realizado com amostras extraídas do mesmo ponto e profundidade, mas ensaiadas nas condições de: a) umidade natural; b) umidade higroscópica

### 3.3.1.7. INFILTRABILIDADE

O ensaio de infiltrabilidade, também chamado de sucção capilar d'água, ocorreu com base na norma DNER-ME 194/88 - Ensaio de Sucção Capilar d'água e Permeabilidade.

Foram ensaiadas 6 amostras indeformadas dos pontos P7, P22 e P24 em profundidades superficiais (A1) e de profundidade de até 20 centímetros (A2). A Figura 3.22 apresenta a execução do ensaio. A Tabela 3.5 apresenta os valores aferidos durante os ensaios para as amostras em umidades natural (N) e umidade higroscópica (H).



Figura 3.22: Equipamento utilizado para realizar o ensaio de infiltrabilidade

Tabela 3.5: Valores aferidos durante os ensaios de infiltrabilidade.

AMOSTRA P7A1-N		AMOSTRA P7A2-N		AMOSTRA P22A1-N		AMOSTRA P22A2-N		AMOSTRA P24A1-N		AMOSTRA P24A2-N	
TEMPO	LEITURA										
$\sqrt{\text{minuto}}$	cm										
0	11	0	69	0	53	0	2	0	62,2	0	16,1
2	14,6	2	76	2	69	2	14	2	69,5	2	40,3
3	16	3	78	3	74	3	22	3	75,4	3	46,5
4	18	4	80,2	4	77,3	4	36,2	4	80,7	4	48
5	20,9	5	82,5	5	81	5	38,6	5	81,3	5	48,9
6	24,1	6	84,5	6	83,3	6	40,1	6	81,6	6	49,9
7	27	7	86,5	7	85,6	7	41,8	7	82,3	7	51
8	30	8	88	8	88,2	8	43,8	8	83	8	51,6
10	40	10	90,8	10	94	10	47,2	10	84	10	52
12	55	12	92	12	96	12	50,7	12	85,5	12	53,2
14	57	14	93	14	97,5	14	53,2	14	87,5	14	55
30	60	30	96	30	101	30	56	30	88	30	56
AMOSTRA P7A1-H		AMOSTRA P7A2-H		AMOSTRA P22A1-H		AMOSTRA P22A2-H		AMOSTRA P24A1-H		AMOSTRA P24A2-H	
TEMPO	LEITURA										
$\sqrt{\text{minuto}}$	cm										
0	45	0	2	0	38	0	57	0	7	0	11
2	88	2	51	2	102	2	150	2	43	2	75
3	135	3	72	3	128,5	3	185	3	61	3	100
4	155	4	89	4	152,5	4	190	4	81	4	117
5	183	5	99	5	162,5	5	193	5	99	5	118,5
6	196	6	115	6	165	6	197	6	107	6	121
7	200	7	125	7	167,5	7	201,5	7	120	7	123,5
8	205	8	139	8	169,5	8	207	8	125	8	126
10	212	10	142	10	172,5	10	213	10	128,5	10	130,5
12	220	12	145	12	178,5	12	222	12	132	12	136
14	225	14	148	14	185,5	14	234	14	138	14	146
30	226	30	151	30	190	30	239	30	140	30	153

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos no decorrer da presente pesquisa de acordo com cada etapa metodológica.

### **4.1. RESULTADOS OBTIDOS NA ETAPA I**

Nesta seção é apresentada a caracterização da área de estudo e o planejamento do trabalho de campo que foram desenvolvidos no decorrer da etapa I do presente trabalho.

#### **4.1.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO: RESERVATÓRIO DE BATALHA; BACIA DO RIO SÃO MARCOS; BACIA DE CONTRIBUIÇÃO DIRETA; ÁREA DE INFLUÊNCIA DIRETA**

A Usina Hidrelétrica de Batalha situa-se na bacia do rio São Marcos, rio que serve de limite entre os estados de Goiás e Minas Gerais (Figura 4.1) A UHE de Batalha configura-se de grande importância para o setor elétrico nacional (EPE, 2021), mas também para as comunidades de pequenos agricultores dessa região, por conta da contribuição na irrigação de lavouras locais (Paulista *et al.*, 2021). A UHE Batalha teve sua construção iniciada em meados de 2008, com operação a partir de 2014, sendo seu reservatório formado a partir do represamento do rio São Marcos. A área da bacia do rio São Marcos apresenta 12.140 km<sup>2</sup>, destes, 5.156 km<sup>2</sup> compõem a Área de Influência Direta (AID) do reservatório da UHE Batalha. O reservatório de Batalha possui 138 km<sup>2</sup>, o que corresponde a 1,13% da área da bacia do rio São Marcos, possuindo capacidade de geração 52,5 MW (energia para abastecer uma cidade de 130 mil habitantes) e contempla três municípios: Cristalina-GO, Paracatu-MG e Unaí-MG (Furnas *et al.*, 2005a; Matamoros Sevilla, 2016; Jesus *et al.* 2017; Silva *et al.*, 2021).

A bacia do rio São Marcos tem por afluentes, pela margem esquerda, os ribeirões Soberbo, Mundo Novo e da Batalha e o rio São Bento e, pela margem direita, o rio Samambaia e os ribeirões Arrojado, São Firmino, Castelhana e Imburuçu. Abrange um território de 12.140 km<sup>2</sup> pertencente aos estados de Goiás e Minas Gerais e ao Distrito Federal. (Furnas *et al.*, 2005a).

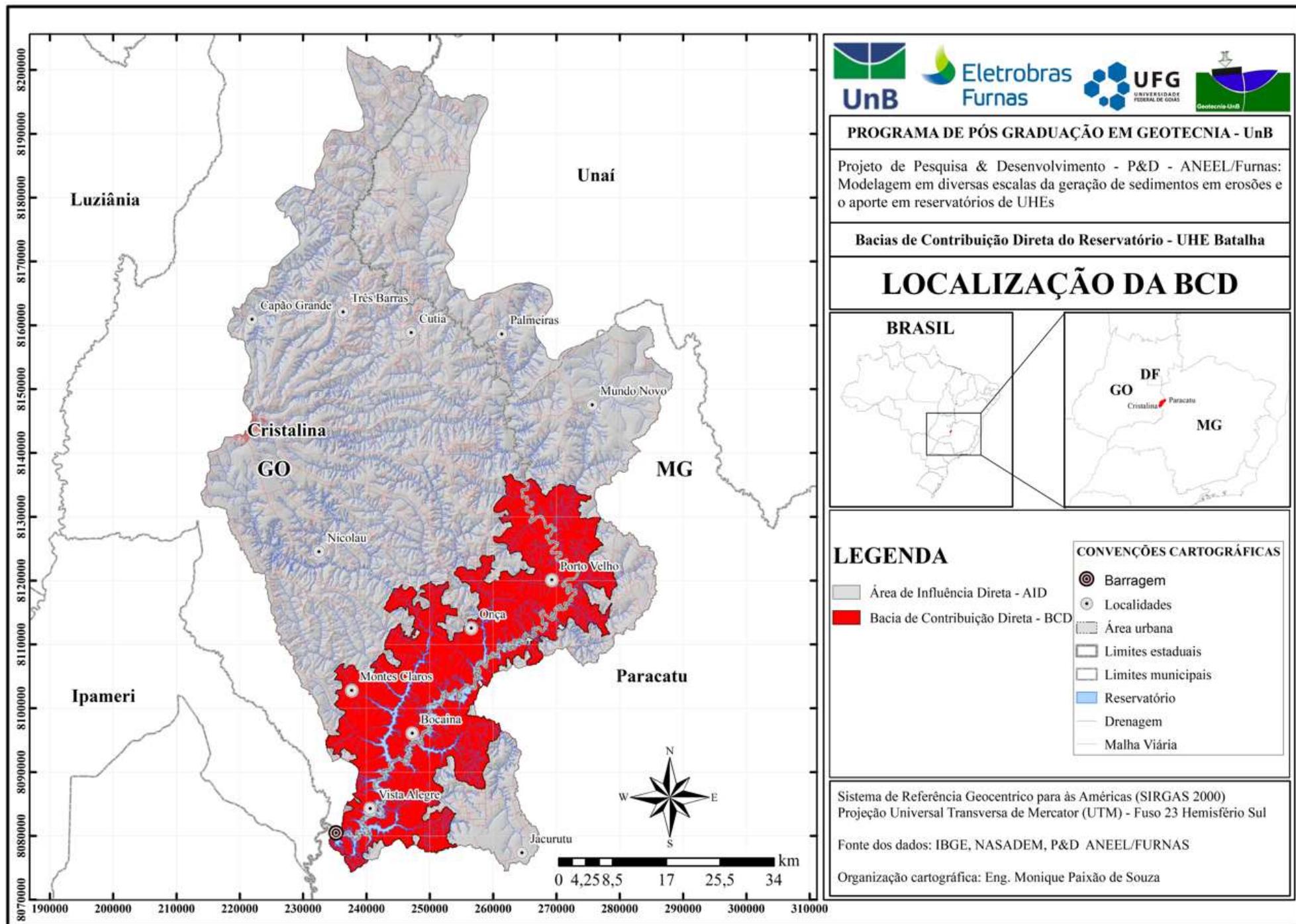


Figura 4.1: Mapa de localização da área de estudo

Segundo Silva *et al.* (2021), no ano de 1985, cerca de 66% da AID do reservatório da UHE Batalha era representada por coberturas vegetais naturais, predominando as formações campestres (37,9%) e savânicas (18,9%). No caso dos usos antrópicos, a pastagem era a mais representativa (15,6%), seguida pela classe de mosaico de agricultura e pastagem (12,5%) – ambas classes ocorrendo de maneira fragmentada por toda a região. Neste último ano, em 2021, salientam os autores, as formações campestres foram reduzidas para apenas 14,4% da AID, e as formações savânicas para somente 10,8%. A Figura 4.2 apresenta coberturas vegetais presentes na BCD de Batalha.

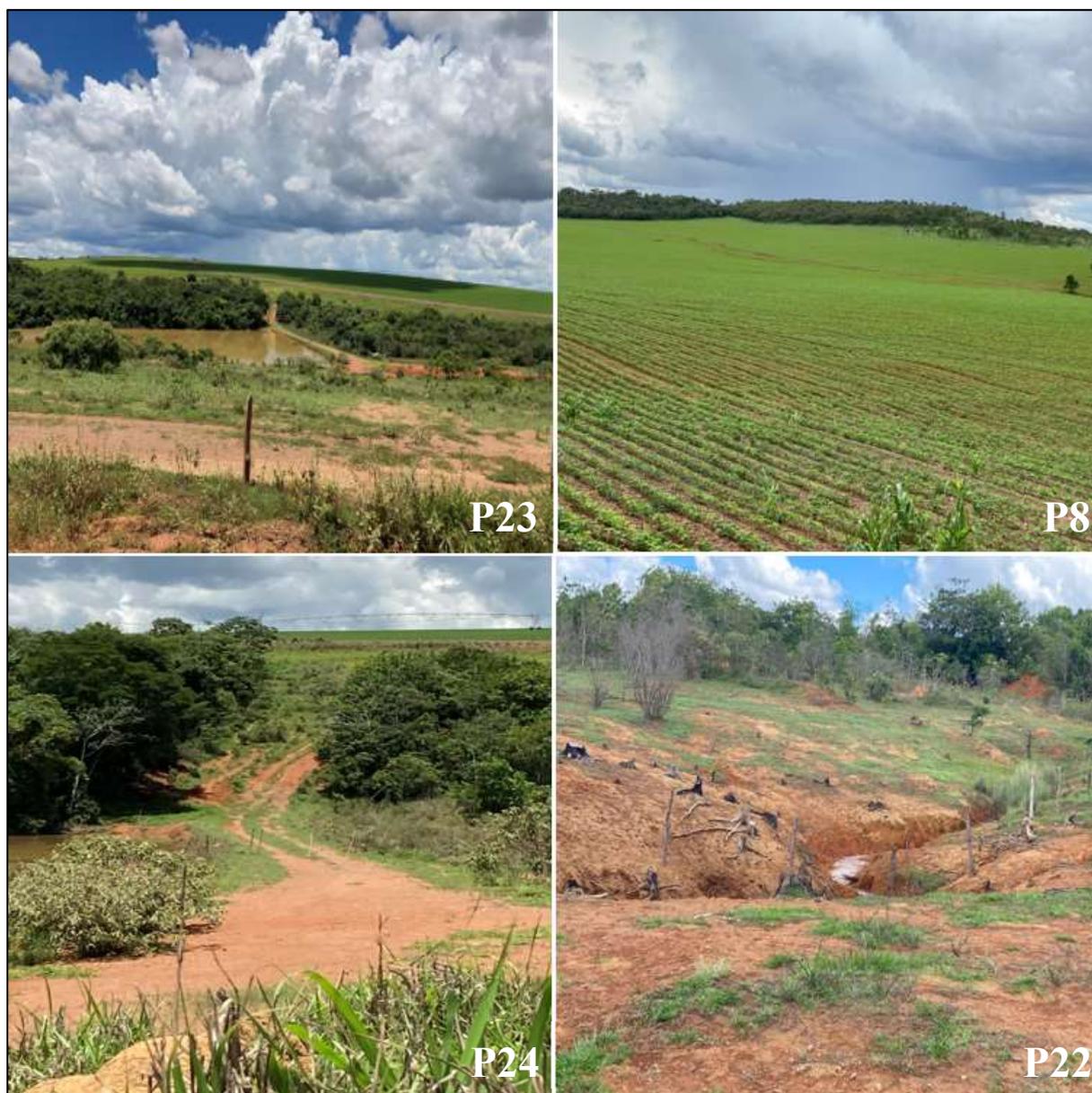


Figura 4.2: Coberturas vegetais presentes na AID de Batalha

Com relação a precipitação anual, 60% corresponde ao trimestre mais chuvoso (meses de novembro, dezembro e janeiro). O trimestre mais seco, com apenas 2% da precipitação anual, corresponde aos meses de junho, julho e agosto. A duração do período seco varia de 4 a 6 meses (Matamoros Sevilla, 2016). A inconstante precipitação implica diretamente na dinâmica sazonal do nível do reservatório entre períodos secos e chuvosos que, associada às mais elevadas altitudes e declividades, pode favorecer a instabilidade dos taludes nas suas bordas imediatas, podendo contribuir na deflagração de processos erosivos e de movimentos de massa, gerando sedimentos que são transportados para o manancial, ocasionando seu assoreamento e, conseqüentemente, comprometendo o sistema de geração de energia (Jesus *et al.*, 2017). O levantamento pluviométrico referente os anos de 1982 até 2011 para as estações pluviométricas no entorno da AID de Batalha (Códigos das estações: 1546005, 1547014, 1546005, 1547014, 1547021, 1547022, 1646003, 1647002, 1648002, 1746001, 1756002, 1746007, 1748000, 1748005, 1846015, 1847003, 1748004) são apresentados na Figura 4.3 com base em informações disponíveis no portal HidroWeb do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) (ANA, 2012).

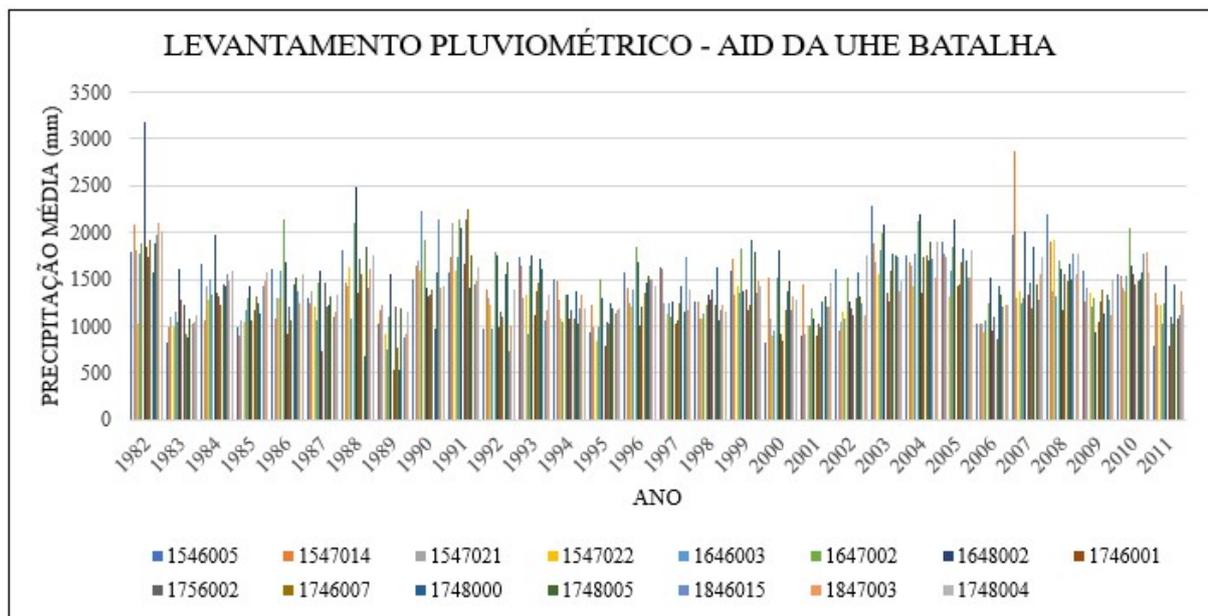


Figura 4.3: Precipitação média na AID de Batalha. Fonte dos dados: ANA, 2012

O Estudo de Impacto Ambiental (EIA) apresentado por Furnas *et al.*, (2005b) relata que o trimestre mais quente corresponde aos meses de janeiro, fevereiro e março, com

temperaturas máximas absolutas da ordem de 37 °C; o trimestre mais frio corresponde aos meses de maio, junho e julho. De modo geral, a temperatura média anual da bacia do rio São Marcos é de aproximadamente 22 °C, devido, principalmente, à conjugação do fator relevo, com base na altitude, com o fator latitude, que propiciam maior inclinação dos raios solares e maior participação do ar frio polar na região.

Conforme apontado por Romão e Souza (2017), o substrato geológico do contexto de Batalha consiste principalmente em material inconsolidadas correspondentes a depósitos aluvionares, coberturas detrito-lateríticas ferruginosas e especialmente filitos da Formação Landim que, expostos comumente, dão origem no local a fenômenos de empastilhamento (Figura 4.4). O empastilhamento consiste no processo de desagregação superficial das rochas, quando submetidas a ciclos naturais de umidificação e secagem. Deste modo, o empastilhamento pode tornar a área expressivamente suscetível aos processos erosivos.



Figura 4.4: Rocha intemperizada do tipo Filito carbonoso. Fenômeno do empastilhamento

Matamoros Sevilla, (2016) aduz que o Estudo de Impacto Ambiental, disponível em Furnas *et al.*, (2005b), apresenta uma análise da geologia da bacia que conclui que ocorrem as unidades litoestratigráficas do Grupo Canastra (Neoproterozóico/Mesoproterozóico), Grupo Bambuí, representado pela Formação Paraopeba (Neoproterozóico) e Coberturas Detrítico- Lateríticas do Terciário/ Quaternário e a Formação Landim.

Com relação ao relevo, Silva *et al.* (2021), descrevem a condição de relevos suave ondulado e ao domínio de colinas amplas e suaves. Paulista *et al.*, (2021) explicam que na AID de Batalha, onde a declividade média é menor, de 6%, percebe-se que as classes de relevos montanhosos e escarpados ocorrem de modo difuso na área, contrastando com o relevo plano que predomina na região (Figura 4.5). Isto demonstra a considerável diversidade altimétrica em Batalha, que mostra maior suscetibilidade ao processo erosivo, sobretudo pela atuação da força gravitacional (energia potencial) e de provável ocorrência predominante de escoamento superficial em maiores velocidades, no período chuvoso. Ao comparar a declividade com a altimetria, é possível correlacionar os relevos mais planos às altitudes mais baixas, mais próximas ao reservatório, e os locais mais elevados observados se encontram associados aos relevos fortemente ondulados e escarpados.

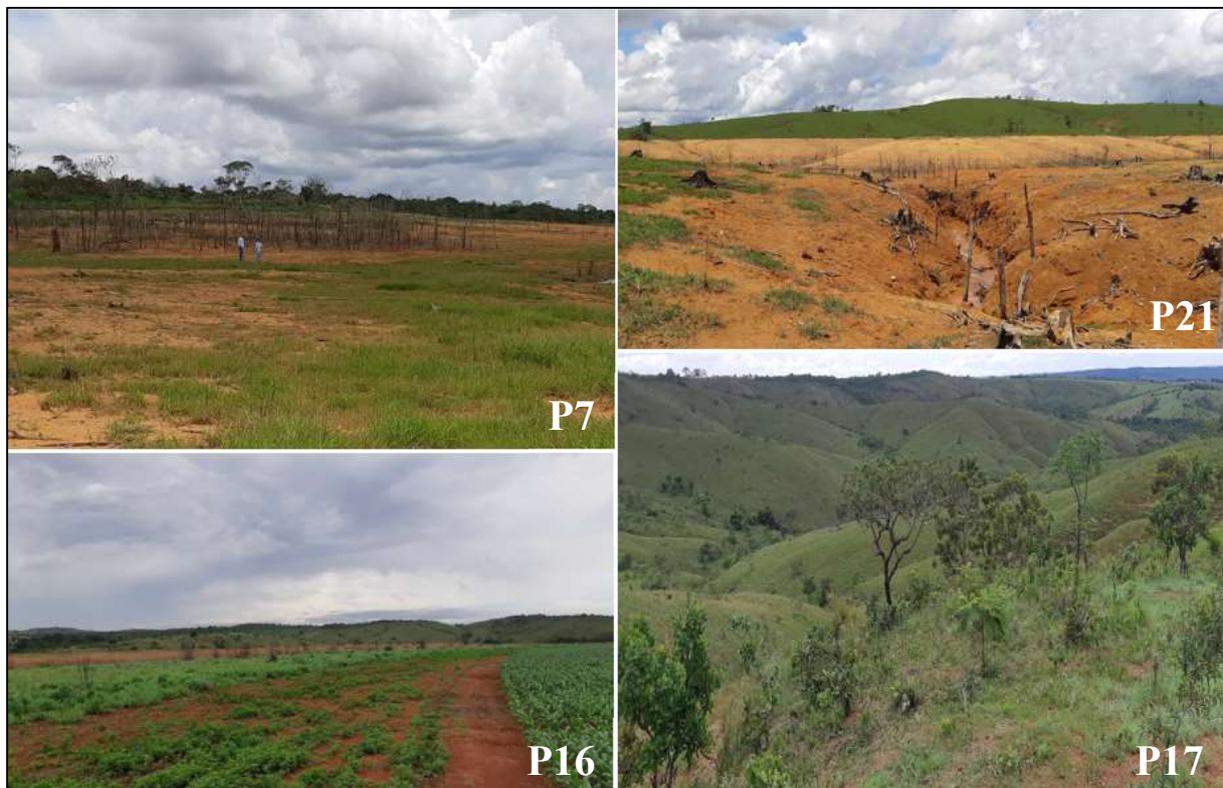


Figura 4.5: Diferentes formas de relevo identificadas na BCD de Batalha

Quanto à pedologia, Silva *et al.* (2021), apontam a prevalência dos solos do tipo Cambissolo, constituídos por material mineral com horizonte B incipiente e pouco desenvolvidos – condições que não favorecem o uso agrícola, por causa das limitações de pedregosidade e de profundidade. Em áreas com maiores altitudes, em relevos planos, de planaltos e chapadas, acrescentam os autores, há a ocorrência expressiva de solos do tipo Latossolo, usualmente utilizados para fins agrícolas, sobretudo por serem bem desenvolvidos, profundos e bem drenados.

Matamoros Sevilla, (2016) e Furnas *et al.* (2005b) esclarecem que os tipos de solos mais encontrados nas AID de Batalha foram:

- LATOSSOLO VERMELHO Distrófico – LVd; com boa resistência à erosão, requerendo, contudo, trato conservacionista adequado, conforme o declive do terreno em uso. Distribuem-se ao longo de toda a área de influência direta (AID), principalmente na margem direita do rio São Marcos.
- LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico – LVAd; Apesar de o Latossolo Vermelho-Amarelo ser mais susceptível à erosão, quando esse se encontra em áreas com declividades altas, não se diferencia do Latossolo Vermelho quanto aos tratos conservacionistas para o controle de erosão. Distribuem-se ao longo de toda a AID, principalmente na região central e na margem esquerda do rio São Marcos.
- CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico – CXbd; São solos pouco evoluídos, de características bastante variáveis, mas em geral rasos ou pouco profundos e com teores de silte relativamente elevados. Ocorrem nas áreas mais movimentadas da Área de Influência Direta (AID), compreendendo as áreas de morros, morros residuais, rebordos erosivos e, principalmente, nas vertentes íngremes referentes à calha do rio São Marcos. São solos que, embora possam ser utilizadas com pastagens, apresentam alto risco de degradação, sendo classificados como de forte suscetibilidade à erosão.

Visando melhor identificar e descrever os fatores que influenciam os processos erosivos na região do reservatório de Batalha, a equipe do Projeto P&D – ANEEL/FURNAS/UFG/UNB (P&D SEDIMENTOS) delimitou a Área de Influência Direta (AID) atuante no reservatório, de modo a criar a Bacia de Contribuição Direta (BCD). Para a

delimitação da BCD considerou-se a largura mínima da faixa de 5 km e máxima definida de acordo com o comprimento das bacias que drenam diretamente para os reservatórios, considerando outros barramentos presentes na AID que poderiam contribuir para conter os sedimentos gerados ao longo da bacia do rio São Marcos. Tanto a largura mínima de 5 km, quanto o comprimento das bacias que drenam diretamente, tem início na linha que inclui a faixa da área de oscilação do nível d'água, desde sua cota mínima, até sua cota máxima, com base na análise histórica da oscilação dos respectivos níveis d'água (Furnas, 2021b).

Deste modo, o processo de mapeamento, bem como de levantamento de campo, especialmente em nível de detalhe, desta pesquisa se limitará a BCD, tendo com pressuposto de que os dados planimétricos da parte a ser mapeada será elaborado a partir dos dados planimétricos existentes, atualizando-se aqueles referentes, principalmente, ao acesso à área, relativo à malha viária, à rede de drenagens, às localidades, às malhas urbanas, entre outros (Furnas, 2021b).

A BCD possui uma extensão de aproximadamente 1.108 km<sup>2</sup> que representa 21,4% da AID. A localiza espacial da área de estudo, foi apresentada na Figura 4.1.

#### **4.1.2. PLANEJAMENTO DO TRABALHO DE CAMPO**

A partir das análises do relatório RT\_07\_2021 (Furnas, 2021a), que utilizou o Programa *Google Earth Pro* e por meio de imagens de satélite (CBERS 4) foi identificado as erosões pré cadastradas. A Tabela 4.1 apresenta as 39 erosões pré cadastradas anteriores ao trabalho de campo; salienta-se que o sequenciamento apresenta números faltantes, tendo em vista que foram realizadas diversas investigações buscando confirmar a relevância das erosões pré-cadastradas, excluindo-as quando irrelevantes para o estudo.

Tabela 4.1: Erosões pré-cadastradas pelo P&amp;D SEDIMENTOS. Fonte: Furnas, 2021a

IDENTIFICAÇÃO	TIPO	LOCALIDADE	COORDENADA X	COORDENADA Y	FUSO
01-B	Laminar e Linear	Paracatu - MG	237.090	8.076.359	23 S
02-B	Laminar	Paracatu - MG	237354	8077949	23 S
03-B	Laminar	Paracatu - MG	236517	8077524	23 S
04-B	Laminar e Linear	Paracatu - MG	234709	8078255	23 S
05-B	Linear	Paracatu - MG	244061	8081748	23 S
06-B	Linear	Paracatu - MG	248106	8090503	23 S
07-B	Linear	Paracatu - MG	247465	8090979	23 S
08-B	Linear	Paracatu - MG	247324	8091290	23 S
09-B	Laminar	Paracatu - MG	254292	8092812	23 S
10-B	Linear	Paracatu - MG	256399	8088453	23 S
11-B	Laminar	Paracatu - MG	255635	8093838	23 S
12-B	Laminar	Cristalina - GO	243451	8096466	23 S
13-B	Laminar	Cristalina - GO	243443	8102388	23 S
14-B	Linear	Cristalina - GO	239918	8102642	23 S
15-B	Laminar	Cristalina - GO	243184	8104819	23 S
16-B	Linear	Paracatu - MG	256662	8102446	23 S
17-B	Linear	Paracatu - MG	256574	8102249	23 S
18-B	Linear	Cristalina - GO	255137	8103255	23 S
19-B	Linear	Paracatu - MG	259247	8106450	23 S
20-B	Laminar	Paracatu - MG	260861	8107366	23 S
21-B	Linear	Paracatu - MG	261855	8108151	23 S
22-B	Linear	Paracatu - MG	263530	8100000	23 S
23-B	Linear	Paracatu - MG	263591	8108581	23 S
24-B	Linear	Paracatu - MG	267430	8110698	23 S
25-B	Laminar e Linear	Paracatu - MG	267542	8110649	23 S
26-B	Laminar	Cristalina - GO	259223	8108890	23 S
27-B	Linear	Paracatu - MG	255294	8098769	23 S
28-B	Laminar	Paracatu - MG	255407	8099111	23 S
29-B	Laminar e Linear	Paracatu - MG	255020	8100035	23 S
30-B	Linear	Cristalina - GO	249603	8107588	23 S
33-B	Laminar	Paracatu - MG	271048	8126043	23 S
34-B	Laminar e Linear	Cristalina - GO	269370	8123945	23 S
35-B	Linear	Cristalina - GO	256326	8119449	23 S
36-B	Laminar	Cristalina - GO	258254	8122015	23 S
37-B	Linear	Cristalina - GO	259162	8118013	23 S
38-B	Laminar	Cristalina - GO	243187	8104918	23 S
39-B	Laminar e Linear	Paracatu - MG	252413	8100294	23 S
40-B	Laminar e Linear	Paracatu - MG	271192	8115065	23 S
41-B	Linear	Cristalina - GO	251637	8103902	23 S

A partir destas informações, foi traçada a rota de campo objetivando agilizar o processo de análise *in loco* das erosões pré-cadastradas, validando-as quando possível. Foi também elaborada uma ficha de campo, para executar o cadastro das erosões identificadas.

## 4.2. RESULTADOS OBTIDOS NA ETAPA II

Na etapa II foi realizada o trabalho de campo, cujo trabalho permitiu a concretização do cadastramento de novas feições erosivas, validação das erosões pré cadastradas, caracterização dos perfis de solos e coleta de amostras para realização de ensaios.

### 4.2.1. CADASTRAMENTO E VALIDAÇÃO DAS FEIÇÕES EROSIVAS

A Tabela 4.2 apresenta o resumo dos dados coletados em campo para os 06 pontos amostrados, dentre os 24 cadastrados. Do levantamento feito em campo é possível identificar grande predominância de solo do tipo Latossolo com cores variando entre o amarelo e o vermelho (Figura 4.6a). Mas também foi encontrado o solo do tipo Argissolo (Figura 4.6b) e Plintossolo Pétrico (Figura 4.6c). Os referidos solos, com exceção do Plintossolo Pétrico, tendem a apresentarem-se como não rochosos. No geral, o relevo varia consideravelmente de um ponto a outro apresentando-se hora como plano, hora como suave ondulado e até mesmo, ondulado. O grau de antropização é acentuado e, em várias regiões visitadas podem ser classificadas como grau pleno de antropização.



Figura 4.6: Solos do tipo – a) Latossolo vermelho-amarelo; b) Argissolo; c) Plintossolo Pétrico

Tabela 4.2: Erosões cadastradas durante o trabalho de campo

	LATITUDE	LONGITUDE	ORIGEM	RELEVO	DRENAGEM	TÁTIL VISUAL	EROSÃO	GRAU DE ANTROPIZAÇÃO
P7	17° 4'16.04"S	47°16'11"O	Latossolo vermelho/amarelo. Não rochoso	Convergente-Convexa. Entorno com morros e colinas. Região suave ondulada	Moderadamente drenado	Argila siltosa	Erosão laminar: ligeira. Deflagradores: água e vento. Condicionante: morfologia, pedologia, hidrogeologia e antropização	Plenamente antropizado
P8	17° 1'8"S	47°13'59"O	Latossolo amarelo. Não rochoso	Convergente-Retilínea. Entorno com morros e colinas. Região plana.	Moderadamente drenado	Argila siltosa plástica	Erosão linear: muito forte. Deflagradores: água e antropização. Condicionante: morfologia, pedologia, hidrogeologia.	Plenamente antropizado
P13	17° 4'12"S	47°12'55"O	Argissolo amarelo. Não rochoso	Planar-Retilínea. Entorno com vales abertos. Região plana.	Mal drenado	Argila plástica	Erosão laminar: ligeira; e de bordas imediatas. Deflagradores: água e vento. Condicionantes: pedologia, hidrogeologia, nível freático e antropização	Plenamente antropizado
P22	17° 4'36"S	47°11'36"O	Latossolo vermelho. Não rochoso	Convergente-Côncava. Entorno com morros e colinas. Região ondulada	Moderadamente drenado	Argila siltosa	Erosão linear: muito forte. Deflagradores: água, vento e <i>piping</i> . Condicionante: morfologia, pedologia, hidrogeologia.	Altamente antropizado
P23	16°59'52"S	47°17'20"O	Latossolo vermelho/amarelo. Não rochoso	Planar-Retilínea. Entorno com vales abertos. Região suave ondulada	Moderadamente drenado	Areia siltosa	Erosão laminar: ligeira. Deflagradores: água e vento. Condicionante: morfologia, pedologia, hidrogeologia e antropização	Plenamente antropizado
P24	16°59'50"S	47°17'21"O	Latossolo vermelho/amarelo. Não rochoso	Planar-Retilínea. Entorno com vales abertos. Região suave ondulada	Moderadamente drenado	Argila siltosa	Erosão linear: extrema. Deflagradores: antropização e água. Condicionante: morfologia e hidrogeologia	Plenamente antropizado

#### 4.2.2. PERFIS DE SOLO IDENTIFICADOS

Com base nos levantamentos realizados, foi possível identificar 3 tipos distintos de perfis de solo, correlacionando-os com a caracterização de horizontes segundo proposta de Pastore e Fontes (1998):

- Perfil Profundo (PP): Apresenta-se como um perfil largamente intemperizado, comum em regiões de clima tropicais. É composto superficialmente por horizonte que pode apresentar camada orgânica de pequena espessura (horizonte I), seguido por horizonte laterítico que se constitui por solos residuais ou que sofreram processos de evolução pedológica. Não apresenta estrutura típica da rocha de origem, por, pelo menos, 2 metros; ou seja: nos primeiros 2 metros de profundidade não apresenta indicativo da rocha matriz (horizonte III - solo saprolítico). Tende a apresentar cores predominantes em tons vermelhos e amarelos (Figura 4.7).
- Perfil Intermediário (PI): Muito semelhante ao Perfil Profundo, diferenciando-se, apenas, por apresentar o horizonte III em profundidade inferior a 2 metros (Figura 4.8).
- Perfil Raso (PR): Constituído por horizontes ou camadas de material inconsolidados superficialmente rasas, podendo estes ser transportados ou de origem sedimentar, mas que apresentam o horizonte III - solo saprolítico - e/ou IV - Horizonte saprolito – bem definido na profundidade de até 1 metro (Figura 4.9).

Ainda que a maioria dos perfis identificados, conforme Tabela 4.3, seja do tipo profundo, é comum que haja variação da tonalidade de suas camadas em função da profundidade, conforme pode-se observar na Figura 4.10a que apresenta 10 amostras de solo deformadas no Ponto 22 (P22) coletadas com trado holandês. A Figura 4.10b apresenta simulação do perfil de solo do P22 em um recipiente de vidro; a camada A1 referente a coleta de 0 a 20 cm, ocupa os primeiros 2 cm do recipiente; a camada A2 referente a profundidade de 20 a 40 cm, é representada no simulador nas profundidades 2 a 4 cm; a camada A3 do solo que é referente a coleta realizada nas profundidades de 40 a 60 cm, é representada no recipiente nas profundidades de 4 a 6 cm, e assim, sucessivamente até amostra A10 que é referente a coleta de 180 a 200 cm de profundidade e encontra-se representada nas profundidades 18 a 20 cm do recipiente.



Figura 4.7: Perfil de solo do tipo profundo (PP)



Figura 4.8: Perfil de solo do tipo intermediário (PI)



Figura 4.9: a) Perfil de solo do tipo raso (PR); b) Detalhe da interface entre os horizontes

Tabela 4.3: Resumo dos perfis observados

TIPO DE PERFIL	QUANTIDADE	QUANTIDADE RELATIVA - %
Perfil Profundo	27	72,97
Perfil intermediário	6	16,22
Perfil Raso	4	10,81
<b>TOTAL</b>	<b>37</b>	<b>100,00</b>

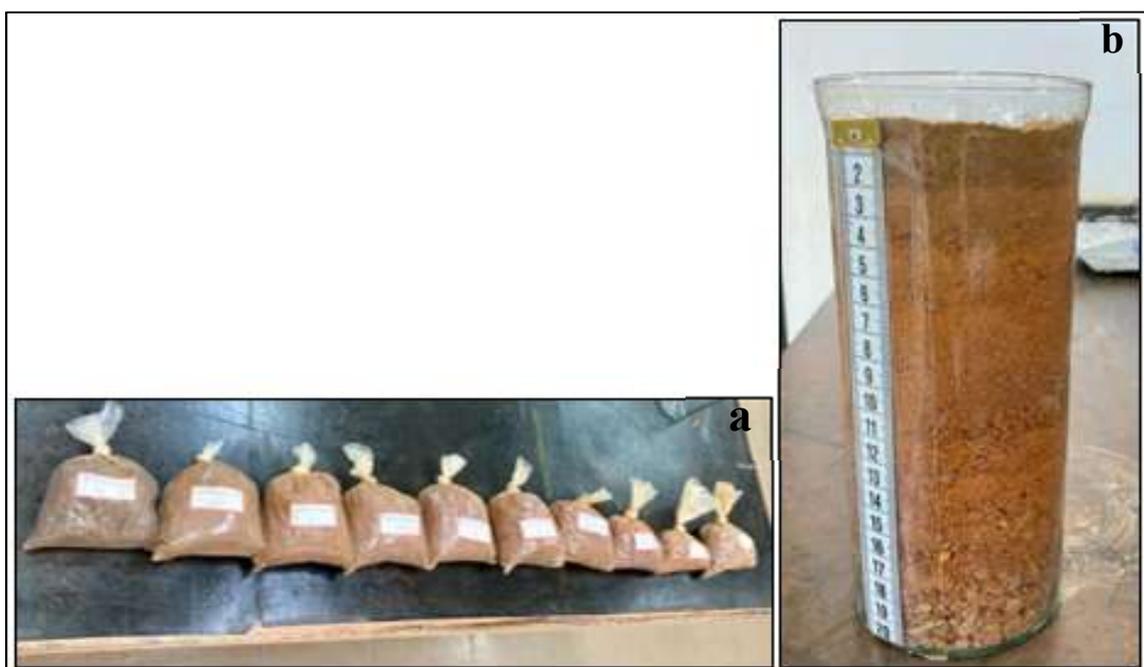


Figura 4.10: Representação das amostras deformadas coletadas no Ponto 22 (P22), com profundidade de até 2,00 metros

### **4.2.3. COLETA DE AMOSTRAS**

Os pontos escolhidos para amostragem foram os que se apresentavam relevantes para o desenvolvimento da presente pesquisa. Foram coletadas, portanto, amostras de 6 pontos distintos, variando a profundidade, de modo que se obteve 38 amostras deformadas, utilizando trado holandês, e 18 amostras indeformadas, utilizando amostrador tipo copo ou caneco. A Figura 4.11 exibe o local de amostragem do Ponto 8 (P8) que, tal como os demais pontos, configura-se como um local que apresenta intensos processos erosivos em andamento.



Figura 4.11: Local de amostragem do Ponto 8 (P8)

## **4.3. RESULTADOS OBTIDOS NA ETAPA III**

Na etapa III foi realizado o estudo da erodibilidade da BCD, sendo subdividido em execução de ensaios laboratoriais e elaboração dos mapas. Como finalização da etapa III, são discutidas as conclusões da presente pesquisa no capítulo 5.

### **4.3.1. RESULTADOS DOS ENSAIOS LABORATORIAIS**

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios laboratoriais executados para a presente pesquisa.

#### 4.3.1.1. ENSAIO DE UMIDADE NATURAL E HIGROSCÓPICA

Foi observado que as amostras apresentam, no geral, variação de umidade entre 13,5% a 45,1%. Em alguns casos, ocorre o decréscimo de umidade de uma camada para outra, voltando crescer a umidade na camada seguinte. Tal fato se justifica, possivelmente, devido a presença de matéria orgânica e/ou presença de pedriscos de quartzo na camada.

Salienta-se, também, que a coleta das amostras foi realizada no período de final de novembro a início de dezembro, período este que envolve o início do trimestre mais chuvoso para a região (novembro, dezembro e janeiro), de modo que pode favorecer as variações de umidade da camada pelo ciclo d'água.

No momento da coleta da amostra P7 havia ocorrido chuvas intensas na localidade, fato que justifica a elevada e constante umidade nas camadas superficiais, 0 - 20 e 20 - 40, com possível infiltração d'água e acúmulo na camada 40 – 60 centímetros.

A Tabela 4.4 e a Figura 4.12 apresentam, respectivamente, numérica e graficamente, a variação da umidade natural das amostras em função das camadas coletadas. A umidade higroscópica foi calculada para as amostras indeformadas, de modo que se aferiu os seguintes valores: P7A1: 2,6%; P7A2: 2,6%; P22A1: 3,6%; P22A2: 3,2%; P24A1: 2,8%; P24A2: 2,5%.

Tabela 4.4: Apresentação numérica da variação da umidade por camada

PROFUNDIDADE (cm)	UMIDADE NATURAL (%)					
	P7	P8	P13	P22	P23	P24
0 - 20	32,2	13,8	33,9	34,4	18,5	31,2
20 - 40	32,2	18,6	40,0	36,3	19,7	29,2
40 - 60	36,5	23,2	44,3	40,0	20,2	27,9
60 - 80		27,0	45,1	41,9	17,3	29,5
80 - 100			34,6	43,2		31,7
100 - 120			40,1	43,3		35,6
120 - 140				44,3		37,1
140 - 160				40,4		38,0
160 - 180				40,9		33,6
180 - 200				33,1		31,0

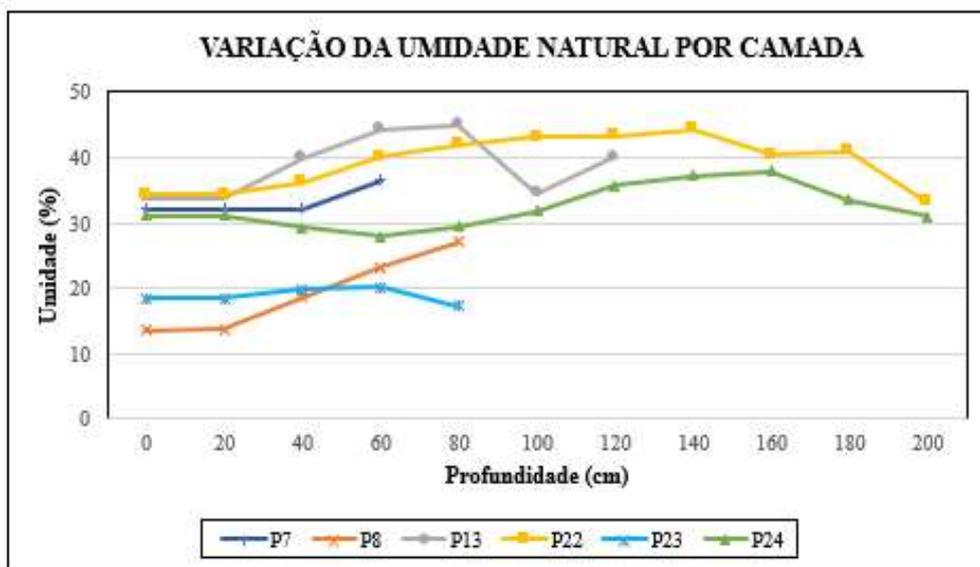


Figura 4.12: Apresentação gráfica da variação da umidade por camada

#### 4.3.1.2. CLASSIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO EXPEDITA MCT

A Tabela 4.5 apresenta os índices físicos obtidos para as amostras indeformadas coletadas. A Tabela 4.6 apresenta o resumo da caracterização e classificação para as amostras deformadas coletadas. É possível verificar que todas as amostras apresentam entre média e alta plasticidade e elevados níveis de contração.

Aproximadamente 84,2% das 38 amostras analisadas apresentam resultados indicativos de solos lateríticos. Para estes solos, o valor médio da contração foi de 2,3 mm, que é considerado compatível com as contrações encontradas por Jesus (2013) para solos lateríticos coletados numa região distante aproximadamente 150 km da AID de Batalha. Além disso, o valor da penetração, na maioria dos resultados, para os solos lateríticos foram muito pequenos, apresentando valor médio de 0,1 mm, que é o esperado para solos lateríticos. Todos os solos considerados lateríticos foram classificados como sendo LG' (Argiloso laterítico). 15,8% do total de amostras analisadas apresentaram resultados indicativos de solos não lateríticos (P23A1, P23A2, P23A3, P23A4, P22A9, P22A10). O solo do Ponto 23 foi identificado em campo como material de enchimento de possível obra de aterro realizada pela ação humana.

Todas as amostras dos pontos ensaiados, exceto as amostras finais do Ponto 22, apresentaram comportamento semelhante do seu grupo de classificação. Ou seja, todas as amostras do Ponto 23 apresentaram comportamento não laterítico, enquanto que todas as

demais amostras, exceto do Ponto 22, apresentaram comportamento laterítico. Especificamente no Ponto 22 as amostras P22A9 e P22A10 apresentaram comportamento não laterítico.

A ocorrência do comportamento não laterítico das amostras P22A9 e P22A10 são justificadas devido a prevalência das características da rocha matriz abaixo da profundidade em que foram coletadas (160 centímetros), a qual, possivelmente ainda não sofreu processo de laterização.

Tabela 4.5: Índices físicos obtidos para as amostras indeformadas

<b>AMOSTRA</b>	<b>TEOR DE UMIDADE (%)</b>	<b>MASSA ESPECÍFICA NATURAL (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>MASSA ESPECÍFICA SECA (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>GRAU DE SATURAÇÃO (%)</b>	<b>ÍNDICE DE VAZIOS</b>
P7A1	32,2	1,77	1,34	84,11	1,053
P7A2	32,2	1,76	1,33	82,70	1,071
P22A1	34,4	1,57	1,17	69,86	1,354
P22A2	36,3	1,58	1,16	72,55	1,376
P24A1	31,2	1,75	1,33	80,45	1,067
P24A2	28,2	1,63	1,27	66,86	1,160

Tabela 4.6: Resultado da caracterização e classificação para as amostras deformadas

AMOSTRA	PLASTICIDADE (*)	UMIDADE DE MOLDAGEM MÉDIA (%)	CONTRAÇÃO MÉDIA (mm)	PENETRAÇÃO MÉDIA (mm)	TEMPO DE ASCENSÃO D'ÁGUA MÉDIO	C'	GRUPO MCT
P7A1	mp	47,5	1,7	0,2	09 min e 20 s	1,88	LG'
P7A2	mp	47,0	1,6	0,1	10 min e 40 s	1,85	LG'
P7A3	mp	46,5	1,6	0,2	08 min e 30 s	1,82	LG'
P8A1	ap	40,9	2,1	0,1	13 min e 20 s	2,04	LG'
P8A2	ap	43,1	2,1	0,1	12 min e 50 s	2,06	LG'
P8A3	ap	42,1	2,3	0,1	15 min e 20 s	2,12	LG'
P8A4	ap	42,8	2,1	0,2	21 min e 05 s	2,06	LG'
P8A5	ap	45,4	2,4	0,2	20 min e 20 s	2,16	LG'
P13A1	mp	44,2	1,7	0,1	12 min e 25 s	1,87	LG'
P13A2	mp	46,2	2,0	0,1	10 min e 50 s	2,01	LG'
P13A3	mp	52,8	2,3	0,1	11 min e 00 s	2,12	LG'
P13A4	mp	54,3	2,6	0,1	08 min e 20 s	2,24	LG'
P13A5	ap	53,5	2,5	0,1	09 min e 10 s	2,20	LG'
P13A6	ap	47,4	2,4	0,1	08 min e 55 s	2,17	LG'
P23A1	mp	47,7	2,1	4,8	12 min e 20 s	2,04	NS'
P23A2	mp	54,8	1,6	4,1	09 min e 10 s	1,83	NS'
P23A3	mp	53,8	1,8	4,4	09 min e 20 s	1,89	NS'
P23A4	mp	55,7	2,1	3,6	10 min e 05 s	2,04	NS'
P22A1	mp	50,1	2,3	0,3	08 min e 10 s	2,11	LG'
P22A2	mp	50,3	2,3	0,1	08 min e 20 s	2,11	LG'
P22A3	mp	51,4	2,2	0,1	09 min e 05 s	2,08	LG'
P22A4	mp	54,8	2,1	0,1	08 min e 50 s	2,04	LG'
P22A5	mp	57,3	2,3	0,1	08 min e 40 s	2,14	LG'
P22A6	mp	58,2	2,3	0,1	09 min e 55 s	2,14	LG'
P22A7	mp	55,4	2,2	0,1	08 min e 20 s	2,10	LG'
P22A8	mp	57,2	2,5	0,3	09 min e 10 s	2,18	LG'
P22A9	mp	59,4	2,4	2,1	09 min e 20 s	2,16	NG
P22A10	mp	57,5	2,0	3,6	09 min e 00 s	2,01	NG
P24A1	mp	50,4	2,4	0,1	08 min e 20 s	2,15	LG'
P24A2	mp	48,9	2,3	0,1	07 min e 00 s	2,13	LG'
P24A3	ap	49,3	2,3	0,1	07 min e 20 s	2,12	LG'
P24A4	ap	49,7	2,1	0,1	06 min e 46 s	2,02	LG'
P24A5	ap	53,6	2,3	0,1	06 min e 25 s	2,12	LG'
P24A6	ap	58,1	2,6	0,1	06 min e 55 s	2,24	LG'
P24A7	mp	58,9	2,6	0,1	06 min e 20 s	2,22	LG'
P24A8	mp	58,4	2,6	0,1	06 min e 30 s	2,22	LG'
P24A9	ap	60,5	2,5	0,1	07 min e 10 s	2,20	LG'
P24A10	ap	63,2	2,8	0,1	07 min e 20 s	2,29	LG'

np - Não plástico  
 bp - Baixa plasticidade  
 mp - Média plasticidade  
 ap - Alta plasticidade

NA = Areia não laterítica  
 NA' = Arenoso não laterítico  
 NS' = Siltoso não laterítico  
 NG = Argila não laterítica

LA = Areia laterítica  
 LA' = Arenoso laterítico  
 LG' = Argiloso laterítico

A Figura 4.13 apresenta imagens fotográficas das amostras deformadas P22A9 e P22A10 em detalhe, mantendo ainda as características do momento da coleta. É possível identificar que ambas amostras apresentam cerosidade, e a amostra P22A10 apresenta indicativo de rocha. A Figura 4.14 apresenta registros fotográficos do Ponto P22, onde foram extraídas as referidas amostras.



Figura 4.13: Detalhes das amostras deformadas P22A9 e P22A10



Figura 4.14: Registro fotográfico do local do Ponto 22

### 4.3.1.3. GRANULOMETRIA A LASER

A Figura 4.15 apresenta, a título demonstrativo, os resultados de cada um dos 3 ensaios de granulometria para as amostras do Ponto 22 (P22A1, P22A2 e P22A10), para os ensaios Sem Ultrassom (SU) e Com Ultrassom (CU – correspondente a ‘com defloculante’). No Anexo A, são apresentados o relatório completo das análises de todos os 18 pontos ensaiados (P7A1, P7A2, P7A3; P8A1, P8A2, P8A5; P13A1, P13A2, P13A6; P22A1, P22A2, P22A10; P23A1, P23A2, P23A4 e P24A1, P24A2, P24A10).

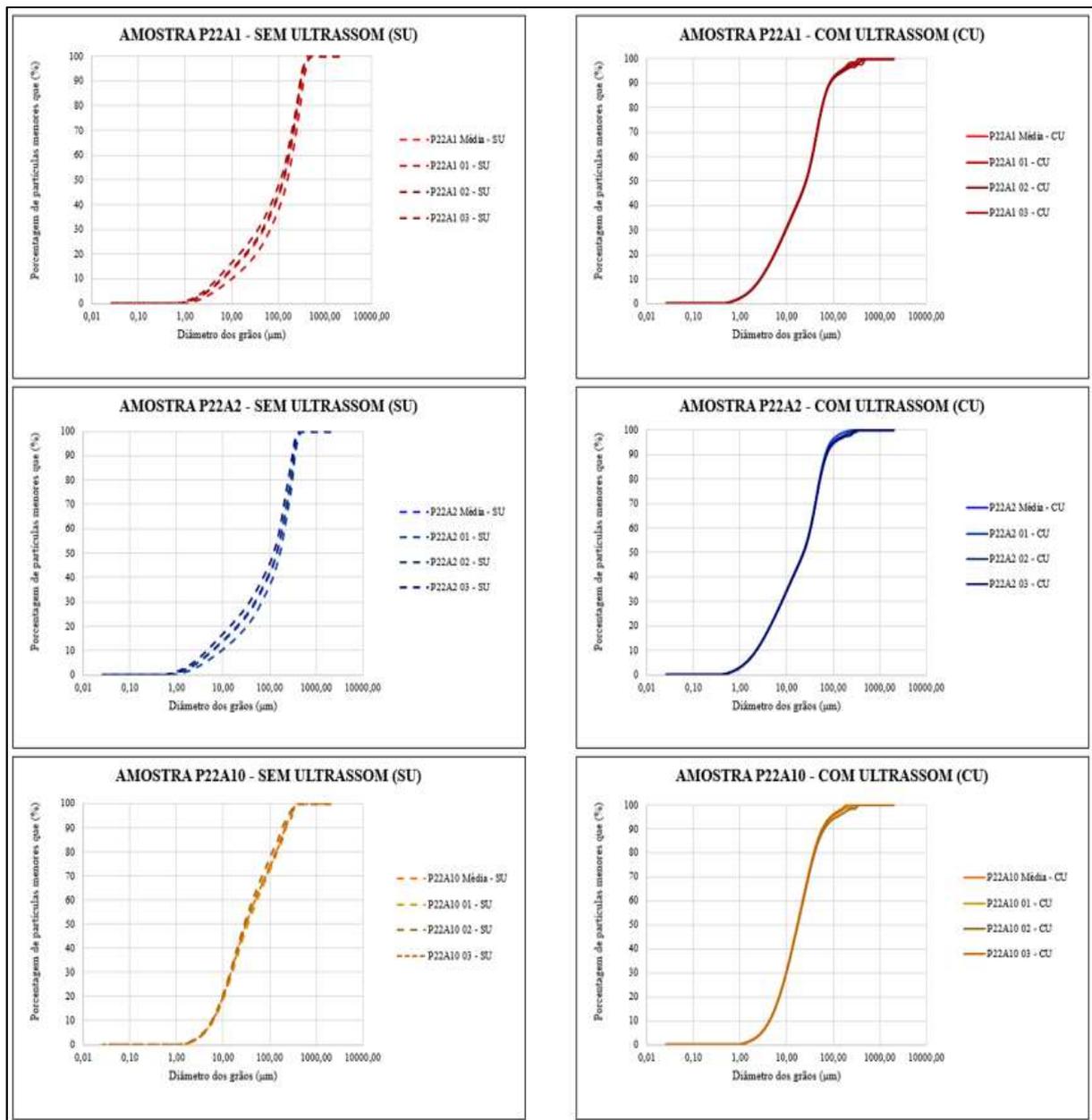


Figura 4.15: Resultados dos ensaios de granulometria Sem Ultrassom (SU) e Com Ultrassom (CU) para as amostras do Ponto 22

Com base nos conceitos estabelecidos na NBR 6502/2022, para efeitos da análise granulométrica, consideram-se as seguintes frações dos solos:

- Fração argilosa: menor que 2 micrômetros;
- Fração siltosa: de 2 a 60 micrômetros;
- Fração arenosa: de 60 a 2000 micrômetros.

A Tabela 4.7 apresenta as frações de argila, siltes e areia para as amostras ensaiadas, segundo a classificação da NBR 6502/22.

Tabela 4.7: Frações de argila, silte e areia das amostras ensaiadas para as condições SU e CU, com base na ABNT NBR 6502/2022

<b>GRANULOMETRIAS 'MÉDIAS' SEM ULTRASSOM (SU)</b>					
<b>(ABNT NBR 6502/22)</b>					
<b>PONTO: P7</b>		<b>PONTO: P8</b>		<b>PONTO: P13</b>	
<b>FRAÇÃO (%)</b>	ARGILA: 5%	<b>FRAÇÃO (%)</b>	ARGILA: 2%	<b>FRAÇÃO (%)</b>	ARGILA: 2%
	SILTE: 35%		SILTE: 68%		SILTE: 48%
	AREIA: 60%		AREIA: 30%		AREIA: 50%
<b>PONTO: 22</b>		<b>PONTO: 23</b>		<b>PONTO: 24</b>	
<b>FRAÇÃO (%)</b>	ARGILA: 1,5%	<b>FRAÇÃO (%)</b>	ARGILA: 0%	<b>FRAÇÃO (%)</b>	ARGILA: 3%
	SILTE: 48%		SILTE: 73%		SILTE: 42%
	AREIA: 50,5%		AREIA: 27%		AREIA: 55%

<b>GRANULOMETRIAS 'MÉDIAS' COM ULTRASSOM (CU)</b>					
<b>(ABNT NBR 6502/22)</b>					
<b>PONTO: P7</b>		<b>PONTO: P8</b>		<b>PONTO: P13</b>	
<b>FRAÇÃO (%)</b>	ARGILA: 10%	<b>FRAÇÃO (%)</b>	ARGILA: 3%	<b>FRAÇÃO (%)</b>	ARGILA: 8%
	SILTE: 72%		SILTE: 84%		SILTE: 72%
	AREIA: 18%		AREIA: 13%		AREIA: 20%
<b>PONTO: 22</b>		<b>PONTO: 23</b>		<b>PONTO: 24</b>	
<b>FRAÇÃO (%)</b>	ARGILA: 6%	<b>FRAÇÃO (%)</b>	ARGILA: 1%	<b>FRAÇÃO (%)</b>	ARGILA: 10%
	SILTE: 82%		SILTE: 85%		SILTE: 79%
	AREIA: 12%		AREIA: 14%		AREIA: 11%

A partir das análises da Tabela 4.7, nota-se que o uso do ultrassom modificou a granulometria das amostras, de modo que:

- A amostra P7 variou negativamente a fração de areia em -70%, enquanto que para silte aumentou em +105% e para argila aumentou em +100%.
- A amostra P8 variou negativamente a fração de areia em -56,7%, enquanto que para silte aumentou em +23,5% e para argila aumentou em +50%.
- A amostra P13 variou negativamente a fração de areia em -60%, enquanto que para silte aumentou em +50% e para argila aumentou em +300%.
- A amostra P22 variou negativamente a fração de areia em -76,2%, enquanto que para silte aumentou em +70% e para argila aumentou em +300%.
- A amostra P23 variou negativamente a fração de areia em -48,1%, enquanto que para silte aumentou em +16,4% e para argila que anteriormente não apresentava fração de argila, passou a apresentar 10%.
- A amostra P24 variou negativamente a fração de areia em -80%, enquanto que para silte aumentou em +88% e para argila aumentou em +233%.

As Figuras de 4.16 a 4.21 apresentam os resultados gráficos dos ensaios de granulometria para cada um dos pontos para as condições SU e CU. Conforme pode-se verificar nas Figuras 4.16 a 4.21, cada um dos 6 pontos (P7, P8, P13, P22, P23 P24) foram ensaiadas para as amostras superficiais (A1 e A2) e para as profundidades finais em que foram coletadas, totalizando 18 amostras. Cada amostra foi ensaiada em 3 ciclos (01, 02, 03) e, a partir dos dados aferidos nestes ciclos foi gerado o resultado ‘médias’ que fornece os dados médios aferidos nos 3 ciclos de cada ensaio amostral.

Verificou-se que para todas as amostras ensaiadas, com exceção das amostras do Ponto 22, os ciclos apresentam consistência nos dados, apresentando poucas variações nos resultados. As amostras do Ponto 22 apresentaram variação quando comparadas as amostras superficiais (A1 e A2) com a coletada em profundidade final (A10). Tal variação pode estar associada, conforme discutido no item ‘4.3.1.2 classificação e caracterização expedita MCT’, devido o Ponto 22 apresentar solo em profundidades iniciais classificado como laterítico (até 160 centímetros), e, a partir da profundidade 160 centímetros apresenta característica da rocha matriz sem ocorrência de processo de laterização.

Em resumo, as amostras sem ultrassom apresentam comportamento entre a Areia silto-argilosas e o Silte areno-argiloso. O uso do ultrassom, por sua vez, promoveu a desagregação das partículas, aumentando as frações de argila e silte, bem como uma redução na fração arenosa, sendo então classificadas como Siltes ou Siltes areno-argilosos.

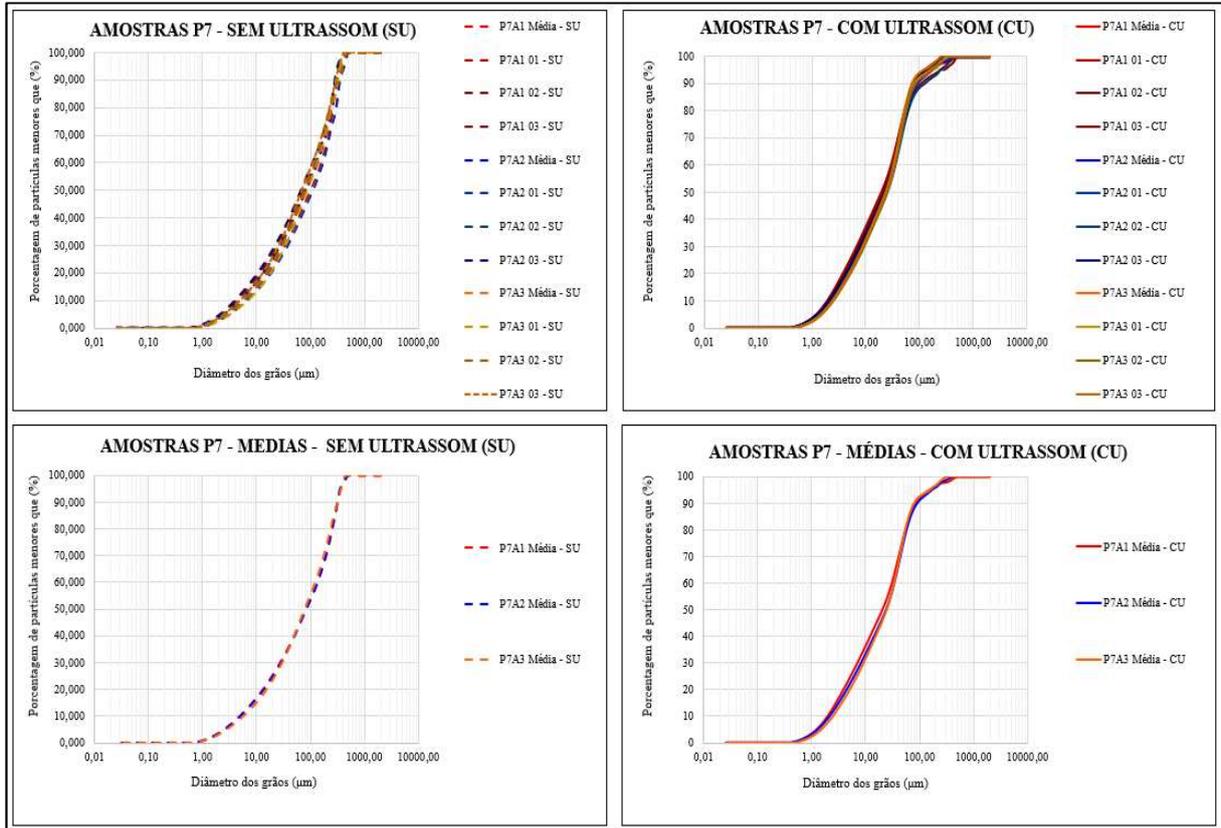


Figura 4.16: Resultados gráficos do ensaio de granulometria para o Ponto 7 nas condições SU e CU

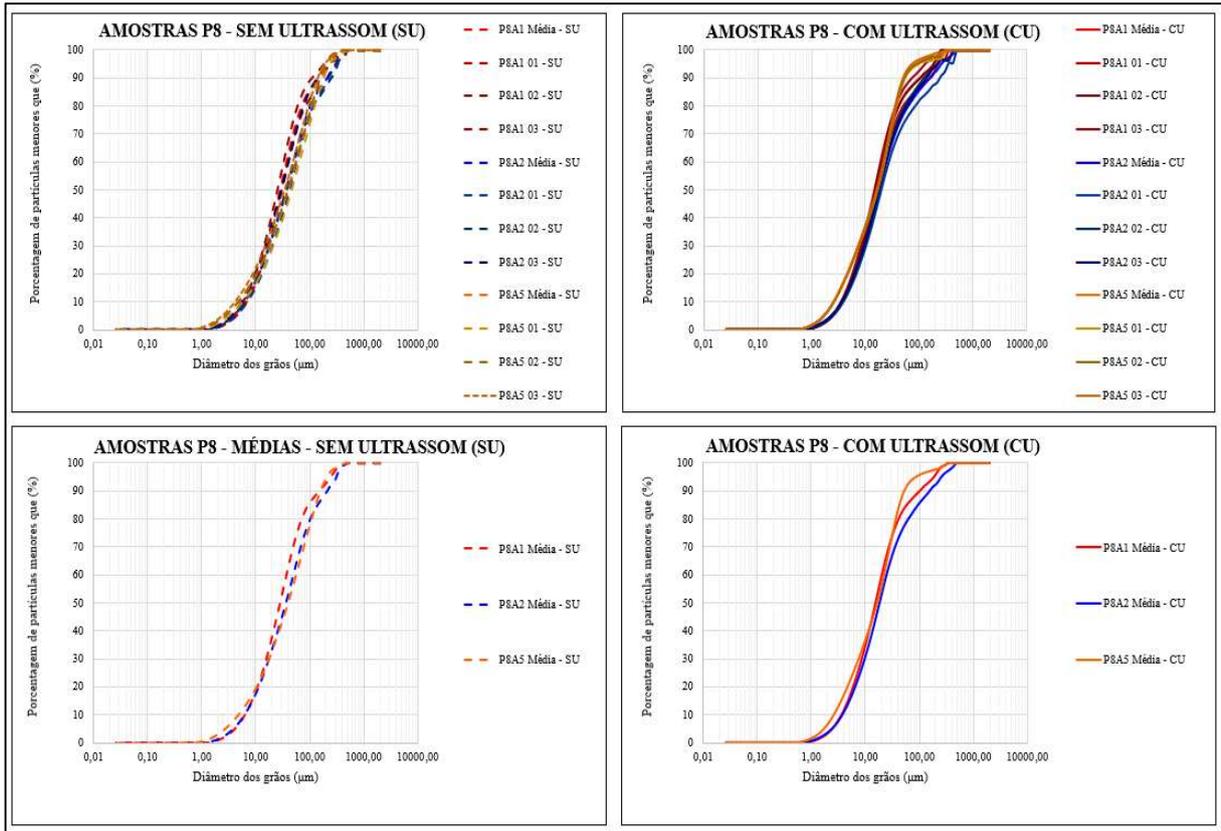


Figura 4.17: Resultados gráficos do ensaio de granulometria para o Ponto 8 nas condições SU e CU

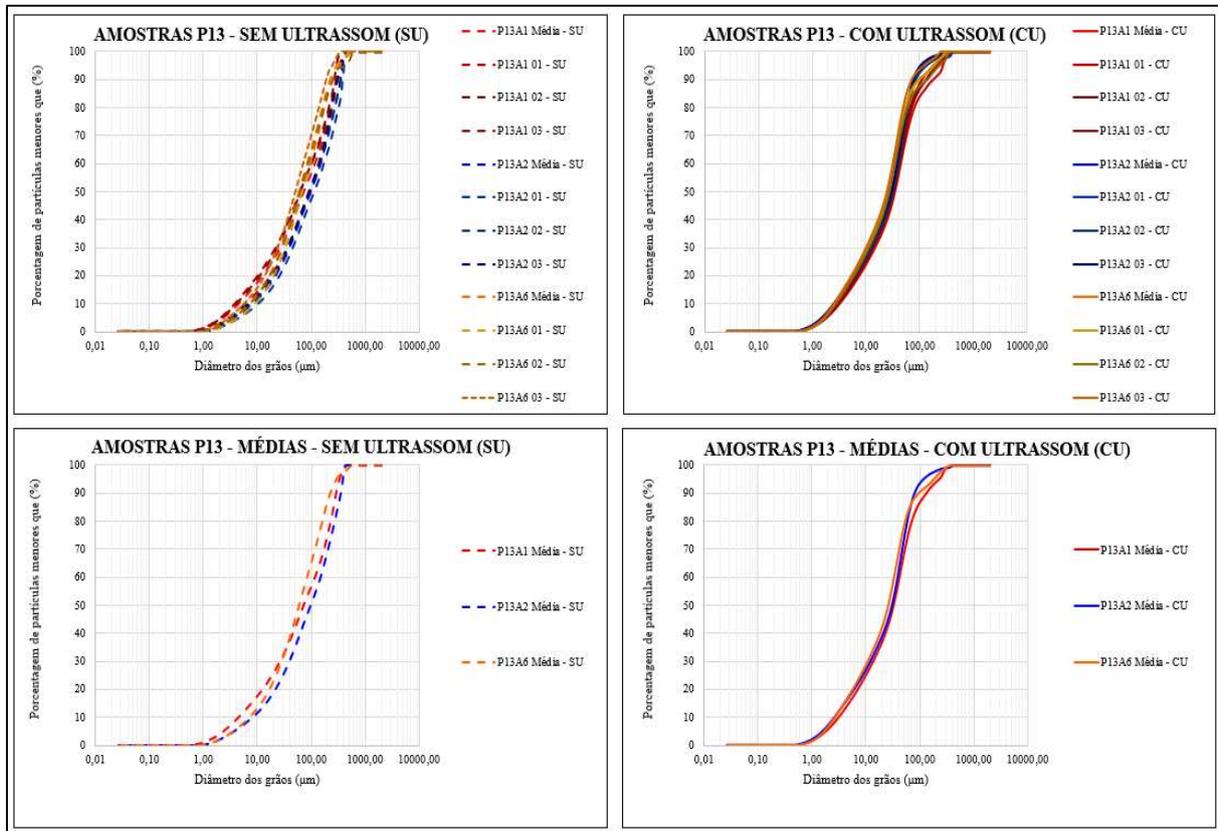


Figura 4.18: Resultados gráficos do ensaio de granulometria para o Ponto 13 nas condições SU e CU

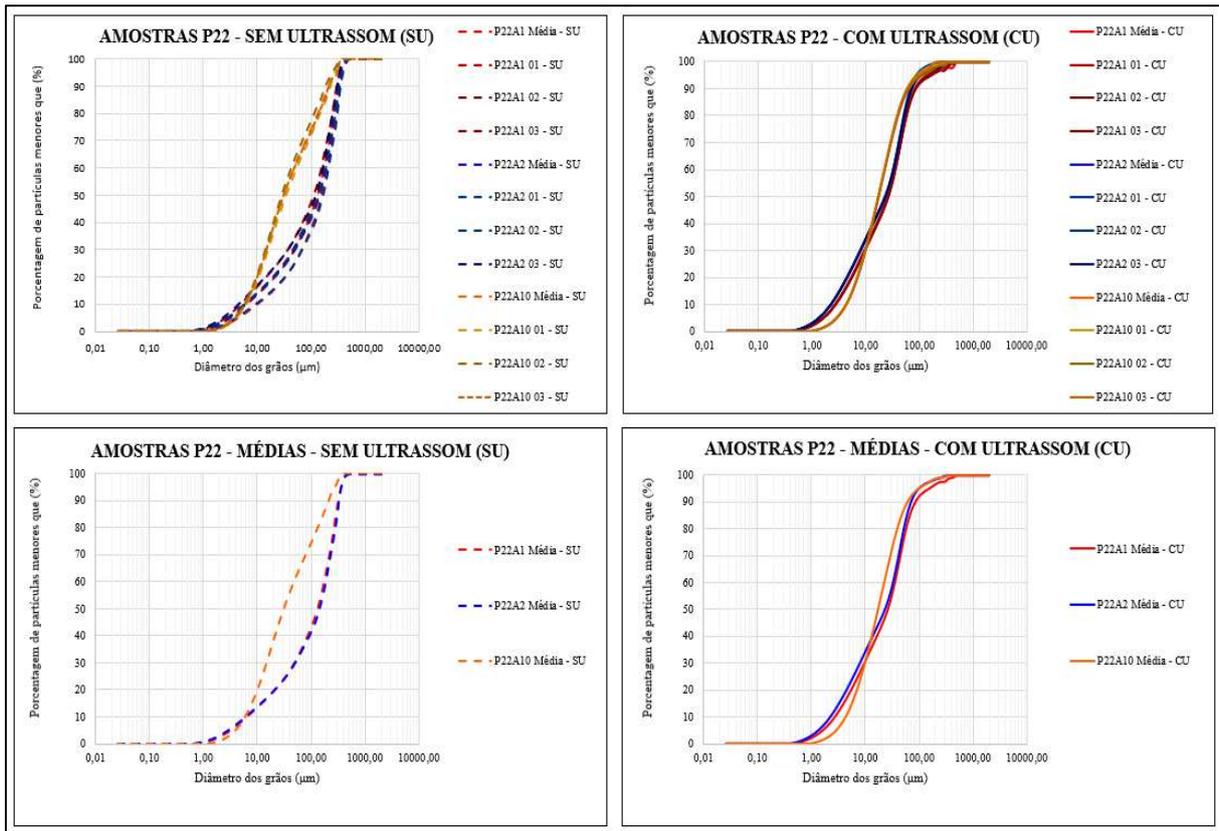


Figura 4.19: Resultados gráficos do ensaio de granulometria para o Ponto 22 nas condições SU e CU

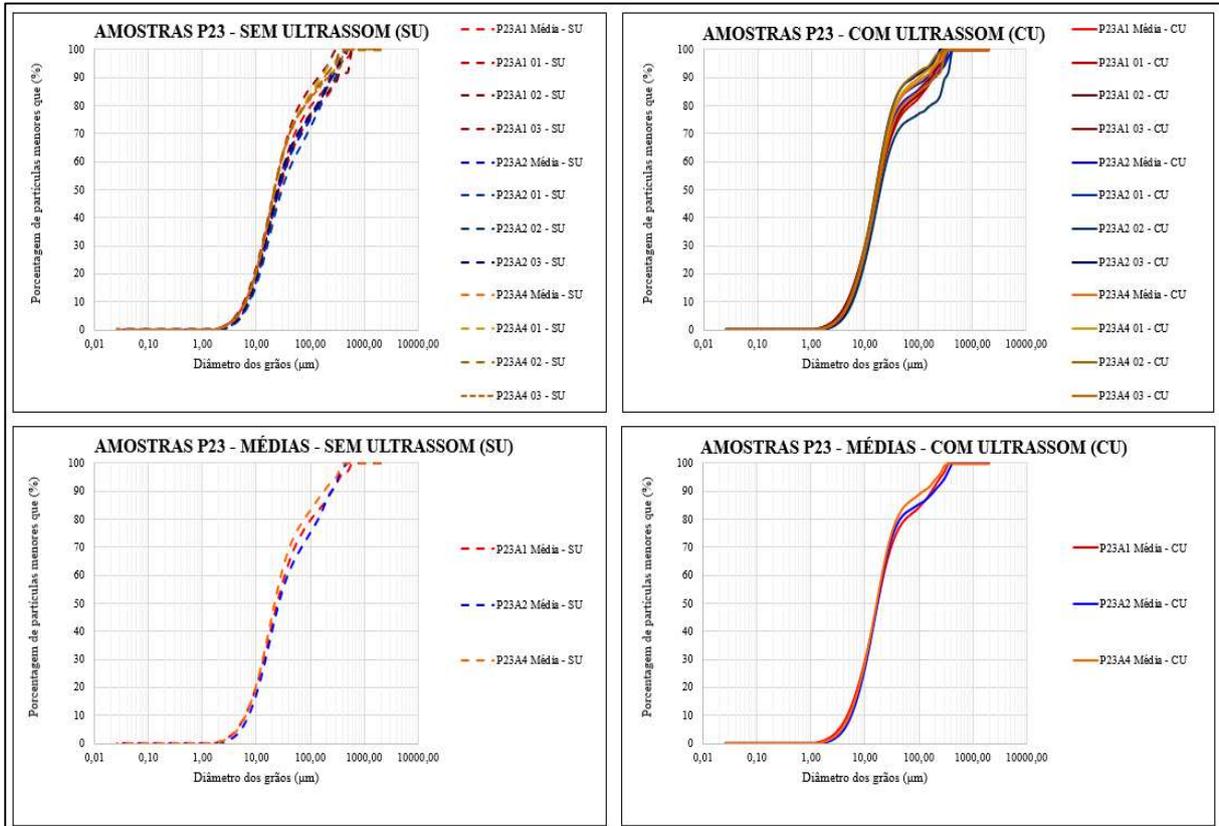


Figura 4.20: Resultados gráficos do ensaio de granulometria para o Ponto 23 nas condições SU e CU

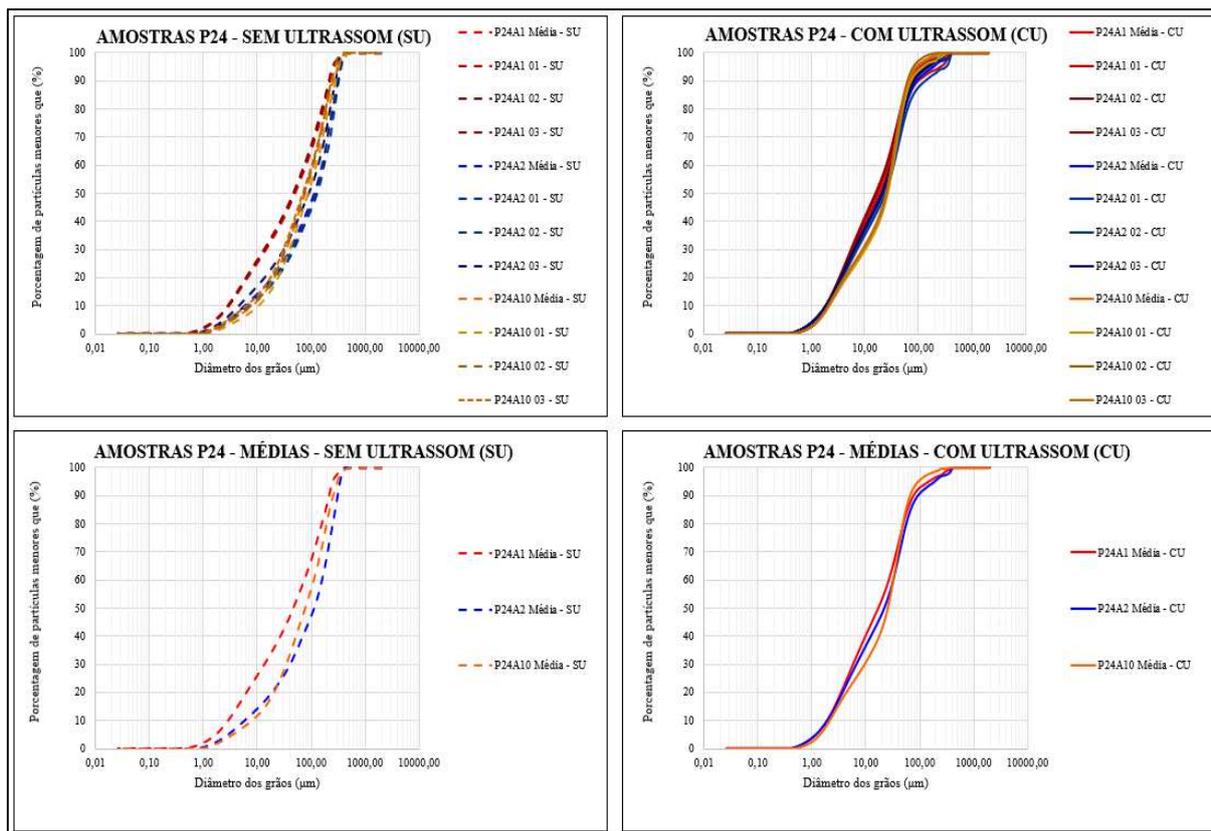


Figura 4.21: Resultados gráficos do ensaio de granulometria para o Ponto 24 nas condições SU e CU

#### 4.3.1.4. ESPECTRÔMETRO DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X POR ENERGIA DISPERSIVA (XRF/EDX)

A Figura 4.22 apresenta os resultados do ensaio de EDX para as amostras ensaiadas.

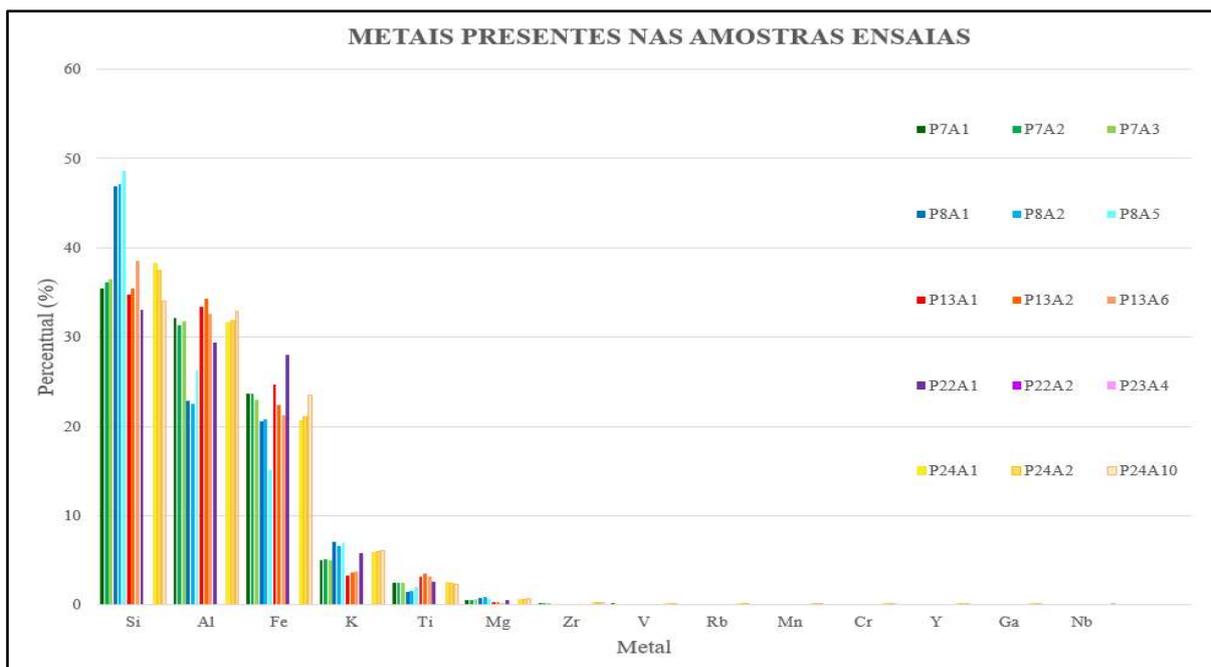


Figura 4.22: Metais presentes nas amostras ensaiadas – Ensaio EDX

Em todas as amostras verificou-se um predomínio dos metais Silício (Si), Alumínio (Al) e Ferro (Fe), em valores percentuais que variam entre 20% e 49%. Ocorre também a presença de Potássio (K) e Titânio (Ti) em percentuais inferiores a 10%. Os metais Magnésio (Mg) e Zircônio (Zr) estão presentes nas amostras em percentuais menores que 1%.

#### 4.3.1.5. PERDA DE MASSA POR IMERSÃO

O referido ensaio foi executado de acordo com a norma DNER 256/94 – Determinação da perda de massa por imersão. Foram ensaiadas 6 amostras indeformadas coletadas de 3 pontos distintos (P7, P22, P24) nas profundidades superficial (A1) e até 20 cm (A2) nas condições de umidade natural (N) e higroscópica (H) – P7A1-N e P7A2-N, P22A1-N e P22A2-N, P24A1-N e P24A2-N; P7A1-H e P7A2-H, P22A1-H e P22A2-H, P24A1-H e P24A2-H.

Os resultados dos valores calculados para a erodibilidade específica ( $\pi$ ) é apresentado na Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Resultados da erodibilidade específica ( $\pi$ ) das amostras ensaiadas nas condições de umidade natural e higroscópica.

CÁLCULO DA PERDA DE MASSA POR IMERSÃO					
UMIDADE NATURAL	AMOSTRAS	ERODIBILIDADE ESPECÍFICA ( $\pi$ )	UMIDADE HIGROSCÓPICA	AMOSTRAS	ERODIBILIDADE ESPECÍFICA ( $\pi$ )
	P7A1-N	64,7%		P7A1-H	74,3%
	P7A2-N	2,1%		P7A2-H	3,6%
	P22A1-N	2,8%		P22A1-H	4,7%
	P22A2-N	2,3%		P22A2-H	2,6%
	P24A1-N	0,5%		P24A1-H	1,2%
	P24A2-N	0,3%		P24A2-H	0,1%

Verifica-se que as amostras, com exceção da amostra P24A2, nas condições de umidade natural tendem a apresentar valores discretamente menores de perda de massa por imersão quando comparadas com as amostras em condição de umidade higroscópica (seco ao ar).

Embora não seja objetivo deste estudo relacionar sucção matricial de solos não saturados com erosão, foi feita uma pesquisa na literatura visando melhor entender o ocorrido no ensaio de perda de massa por imersão. Deste modo, foram encontrados diversos estudos que relacionam a sucção de solos não saturados com o aumento na resistência ao cisalhamento até um valor máximo, de modo que à medida que a sucção matricial aumenta, ocorre um ganho de resistência ao cisalhamento até um valor máximo, a partir do qual se observa uma queda na resistência e posteriormente atinge um valor constante. Entretanto, para solos saturados, tal como ocorre no ensaio de perda de massa por imersão, a coesão aparente desaparece, não sendo, portanto, a sucção matricial inicial fator que contribuiria para manutenção da resistência do solo quando saturado. A literatura não é pacífica quando relaciona não saturação com erosão, porém salienta-se que os resultados da Tabela 4.8 são consistentes com os resultados apresentados por Matamoros Sevilla (2017) cujos solos foram coletados na mesma Área de Influência Direta que o presente trabalho (Bastos, 1999; Matamoros Sevilla, 2016; Bastos et al., 2017).

Outros autores como Silva *et al.* (2009) e Aquino *et al.* (2012) analisaram a perda de massa em solos do tipo Latossolo. Ambos os autores identificaram que chuvas ocorridas logo após o período seco resultaram em maiores perdas de massa do que quando essas chuvas ocorreram após uma prévia saturação do solo. Aquino *et al.* (2012), acrescentam ainda que dependendo da situação da chuva (rápidas, intermediária e demorada), haverá diferenças significativas de perda de massa dos solos estudados, sendo que nas chuvas rápidas foram observadas maiores perdas de massa do solo. Almeida *et al.* (2015) confirmaram o que foi observado por Silva *et al.* (2009) e Aquino *et al.* (2012), acrescentando que essa situação ocorreu, provavelmente, por causa da não saturação do solo no início do pico de chuva.

Embora as amostras do Ponto 24 (P24A1-N e P24A2-H) tenham tido comportamento oposto às demais ensaiadas, apresentando valores discretamente maiores de perda de massa por imersão na condição natural quando comparadas com as amostras em condição de umidade higroscópica, tal resultado é aceitável devido ao pequeno percentual de perda, o qual representa valor de 'pi' menor que 0,5%, o que identifica as amostras com baixíssima erodibilidade específica.

No geral, com exceção das amostras do Ponto 7, as amostras apresentaram pequenos percentuais de perda de massa por imersão, variando de 0,1% até 4,7%. A amostra P7 alcançou 'pi' com valores de 64,7% e 74,3% para as umidades natural e higroscópica, respectivamente, indicando, portanto, elevado valor de erodibilidade específica.

#### 4.3.1.6. INFILTRABILIDADE

O ensaio de infiltrabilidade foi executado de acordo com a norma DNER 194/88 – Ensaio de Sucção Capilar d'água e Permeabilidade. Foram ensaiadas 6 amostras indeformadas coletadas de 3 pontos distintos (P7, P22, P24) nas profundidades superficial (A1) e até 20 cm (A2) nas condições de umidade natural (N) e higroscópica (H) – P7A1-N e P7A2-N, P22A1-N e P22A2-N, P24A1-N e P24A2-N; P7A1-H e P7A2-H, P22A1-H e P22A2-H, P24A1-H e P24A2-H.

Os resultados gráficos aferidos durante a realização dos ensaios estão apresentados nas Figuras 4.23 a 4.25. Pode-se identificar que, em todas as amostras, as curvas se configuram com uma inclinação inicial acentuada (coeficiente de sorção – s), sendo esta inclinação suavizada até se chegar a estabilidade.

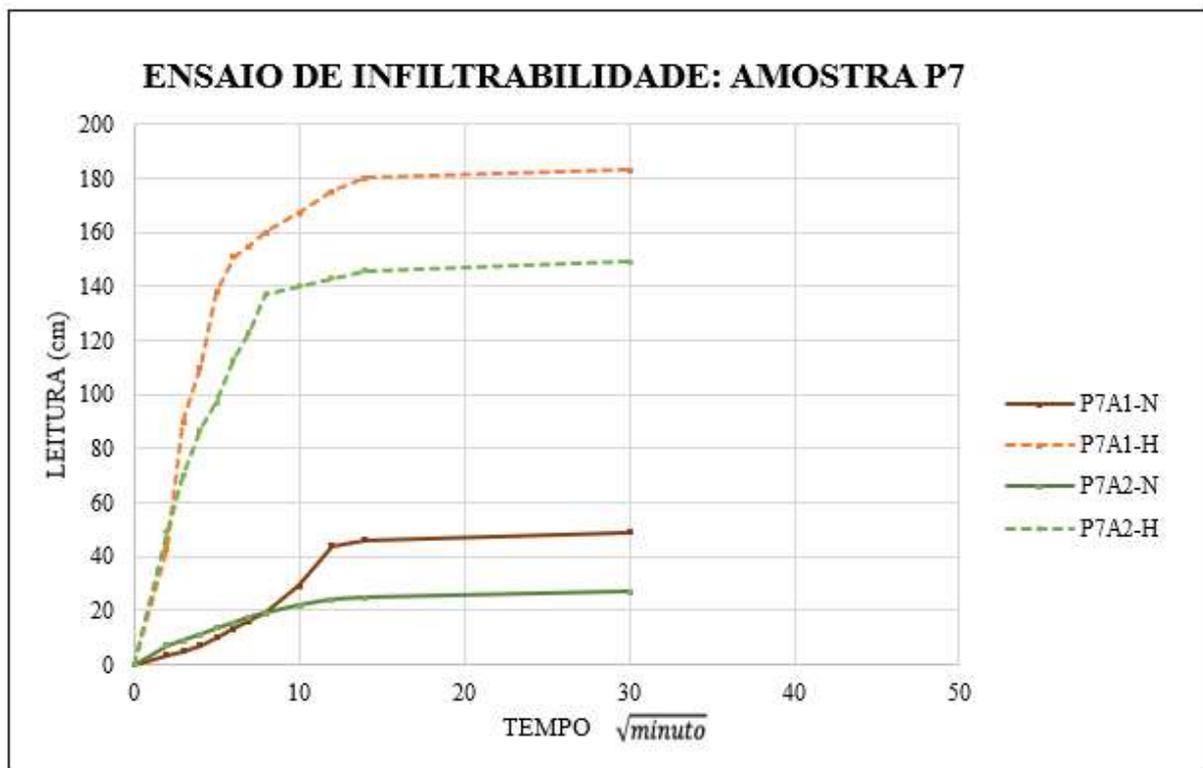


Figura 4.23: Ensaio de infiltrabilidade do Ponto 7 para as umidades natural e higroscópica

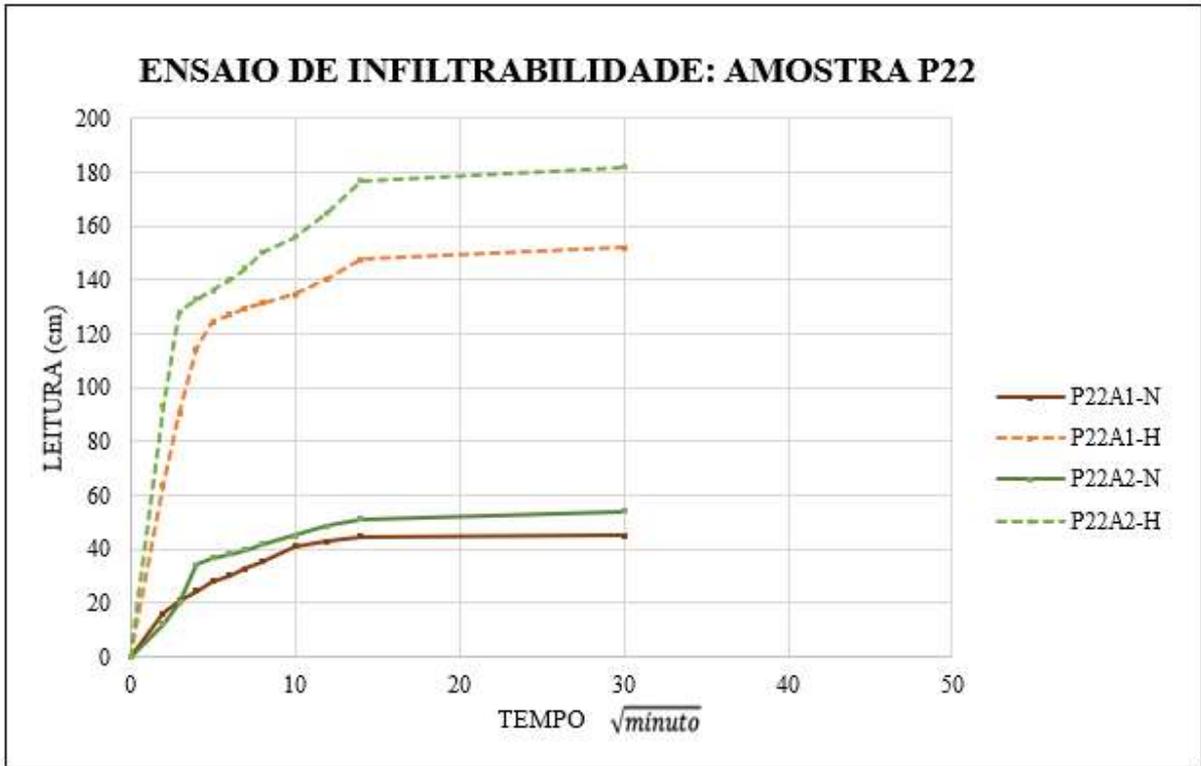


Figura 4.24: Ensaio de infiltrabilidade do Ponto 22 para as umidades natural e higroscópica

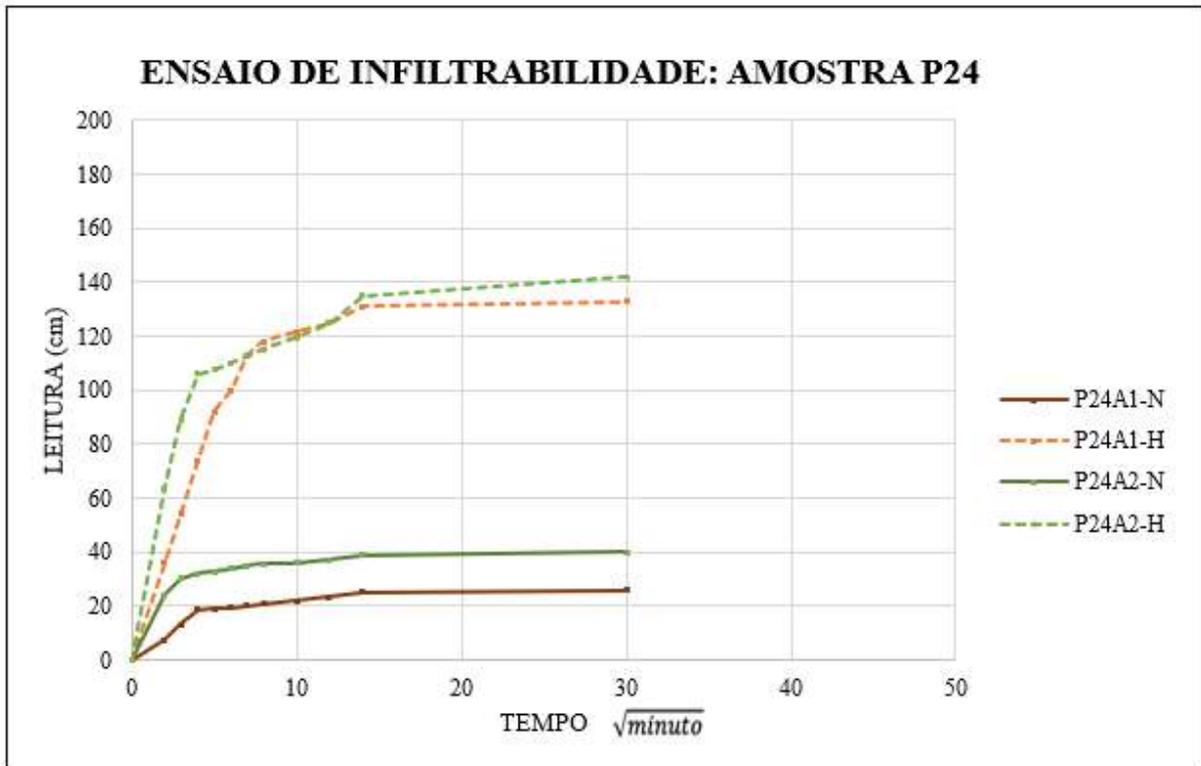


Figura 4.25: Ensaio de infiltrabilidade do Ponto 24 para as umidades natural e higroscópica

No geral, as amostras apresentaram lenta absorção d'água e demorada estabilização. Tal fato, na prática, em caso de chuvas intensas de curta duração, possibilita a formação de poças na superfície do terreno, que, por sua vez, pode favorecer a ocorrência de processos erosivos.

As amostras ensaiadas na condição de umidade higroscópica apresentaram, conforme esperado, curva de infiltração com inclinação mais intensas, quando comparadas com as amostras em umidade natural, devido, principalmente, as forças de sucção que agem nas amostras. Além disso, as amostras apresentam tempo de estabilização mais curtos, quando comparadas as mesmas amostras na umidade natural.

Deste modo, com base nas análises das inclinações das curvas para solos em umidade natural e higroscópica, considerando que o coeficiente de sorção ( $s$ ) é calculado utilizando a maior inclinação inicial da curva de infiltração, é esperado que para amostras em condição de umidade higroscópicas ocorra coeficientes de sorção maiores, devido o valor de 'Lb' ser maior e o valor de 'tb' ser menor, quando comparados com as amostras na condição de umidade natural, conforme estabelecido no item 2.6.2.2 que demonstra o cálculo de 's' a partir das curva de infiltrabilidade. De igual modo, para as amostras em condição de umidade natural, espera-se que a inclinação da curva tenha uma inclinação menor que a de umidade higroscópica, tendo, portanto, um valor de 's' menor do que o valor de 's' para as amostras em condição de umidade higroscópica. A análise da Figura 4.26 conjuntamente com a fórmula de cálculo do coeficiente de sorção ( $s$ ) permite entender mais claramente esta relação.

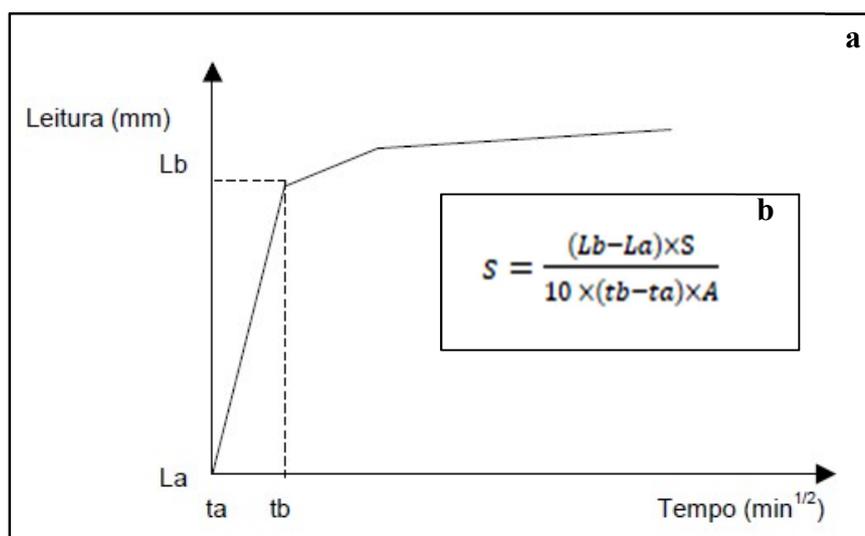


Figura 4.26: a) Comportamento da curva durante o ensaio de infiltrabilidade. b) Fórmula de cálculo do coeficiente de sorção. Fonte: Adaptado de Bastos (1999).

O entendimento deste fenômeno é importante para compreender o cálculo de erodibilidade mediante o critério MCT, que considera a relação entre a erodibilidade específica e o coeficiente de sorção ( $\pi/s$ ). Deste modo, quanto maior for o valor de  $s$ , menor tenderá a ser o valor da erodibilidade calculada pelo critério MCT.

#### **4.3.2. ERODIBILIDADE PELO MÉTODO MCT**

A Tabela 4.9 apresentam os resultados do ensaio de Perda de massa por imersão e Infiltrabilidade, os quais fornecem, respectivamente, os coeficientes ‘ $\pi$ ’ (Erodibilidade específica) e ‘ $s$ ’ (Coeficiente de sorção), que são utilizados para identificar solos erodíveis segundo a metodologia proposta por Nogami e Villibor (1979). Deste modo, para relações de  $\pi/s$  maiores ou iguais a 52, têm-se solos erodíveis.

A Figura 4.27 e 4.28 apresentam graficamente a erodibilidade das amostras, modificando a escala de visualização para que sejam melhor identificadas.

Embora algumas amostras apresentem classificação como não erodível (Figura 4.28), mas, considerando que algumas destas apresentam valores próximos a 70% do limite de erodibilidade (erodibilidade  $>36,4$ ), convém reclassificar duas amostras como ‘tendencialmente erodível’ (cor amarela na Tabela 4.9). Deste modo, obtém-se que 83,3% das amostras são classificadas como ‘erodíveis’ (cor vermelha na Tabela 4.9) ou ‘tendencialmente erodível’, enquanto que 16,7% das amostras ensaiadas apresentam comportamento ‘não erodível’, conforme pode ser visualizado graficamente na Figura 4.28.

Tabela 4.9: Cálculo da erodibilidade mediante critério MCT

ERODIBILIDADE: CRITÉRIO MCT (MODIFICADO PELA AUTORA)			
AMOSTRA	ERODIBILIDADE ESPECÍFICA (pi - %)	COEFICIENTE DE SORÇÃO (s)	ERODIBILIDADE pi/s
P7A1-N	64,7	0,00719	8998,61
P7A1-H	74,3	0,04935	1505,57
P7A2-N	2,1	0,00466	450,64
P7A2-H	3,6	0,03358	107,21
P22A1-N	2,8	0,00804	348,26
P22A1-H	4,7	0,04883	96,25
P22A2-N	2,3	0,01677	137,15
P22A2-H	2,6	0,0652	39,88
P24A1-N	0,5	0,00907	55,13
P24A1-H	1,2	0,02892	41,49
P24A2-N	0,3	0,01987	15,10
P24A2-H	0,1	0,05196	1,92

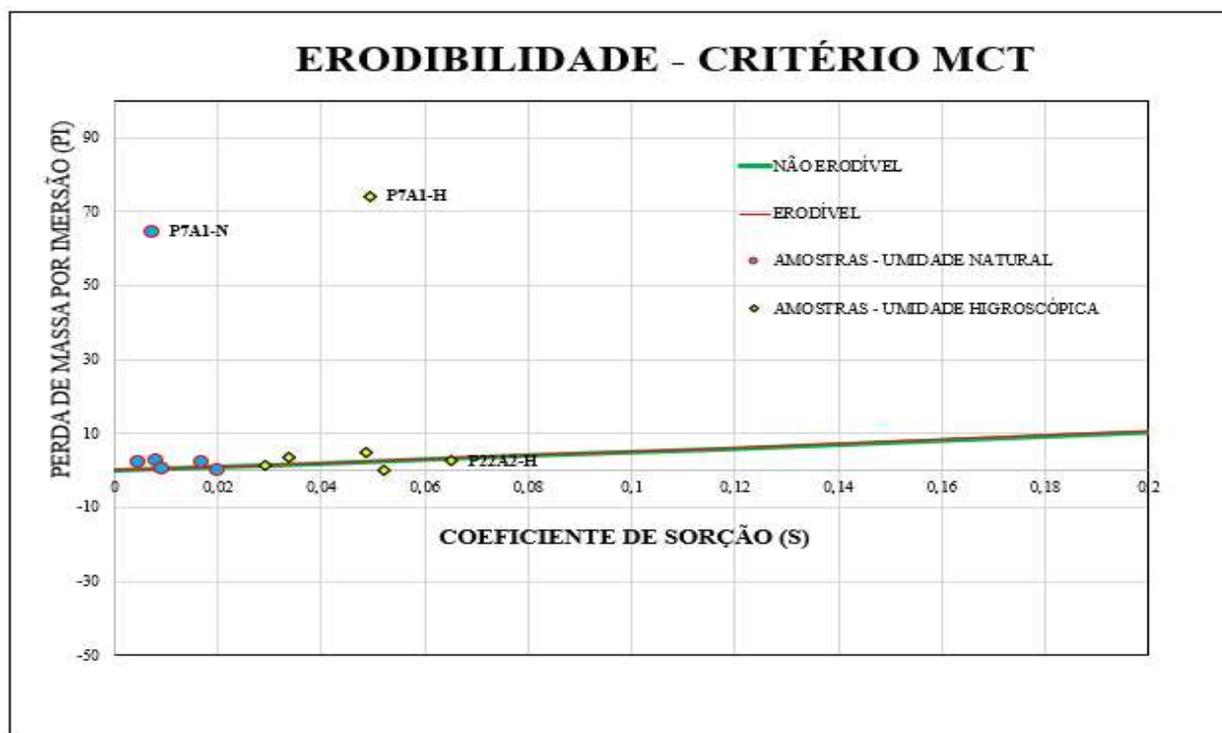
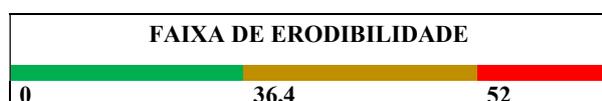


Figura 4.27: Apresentação gráfica da erodibilidade – Critério MCT – para as amostras ensaiadas

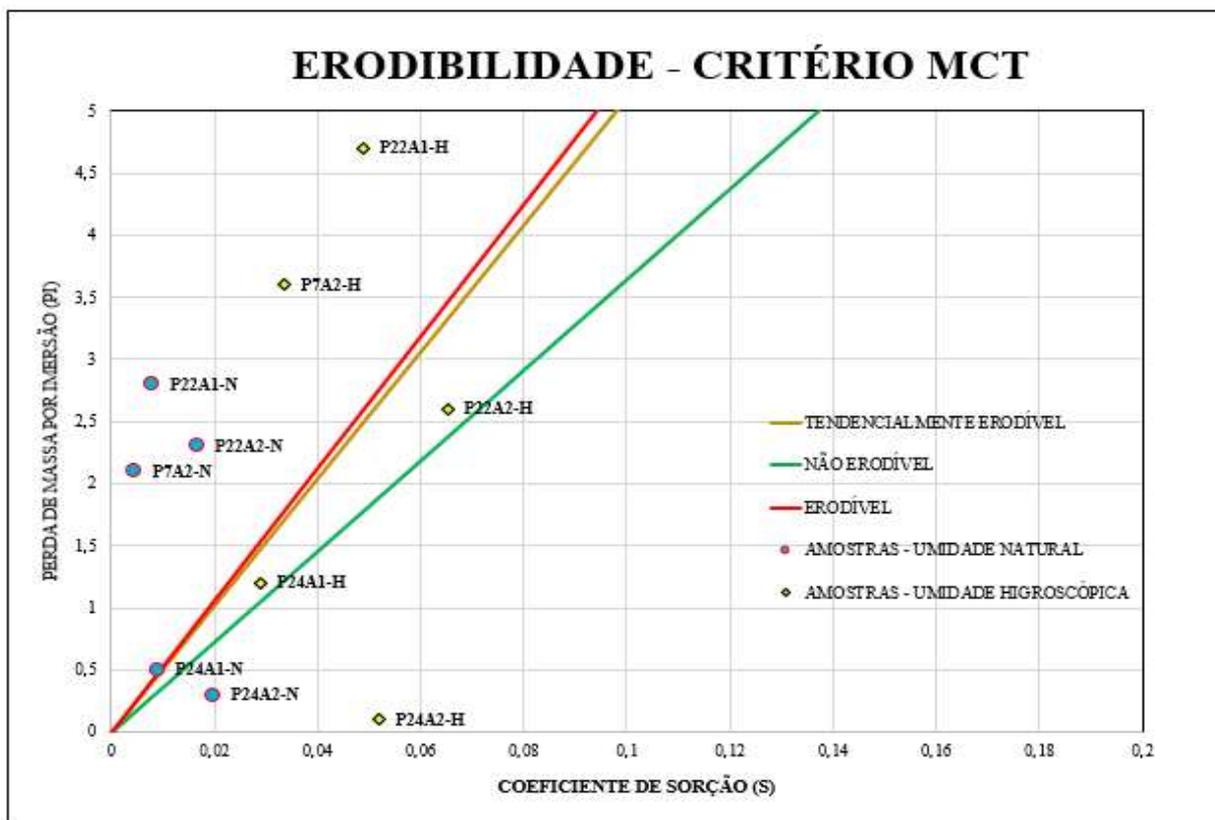


Figura 4.28: Apresentação gráfica da erodibilidade – Critério MCT modificado pela autora – para as amostras ensaiadas (detalhe). Região ‘tendencialmente erodível’

Foi identificado um comportamento de diminuição no grau de erodibilidade das amostras na condição de umidade higroscópica, comparadas as amostras na condição de umidade natural. Tal fato já era esperado em razão da inclinação da curva de infiltrabilidade das amostras em condição de umidade higroscópica apresentar maiores inclinações, que, por sua vez, faz com que o coeficiente ‘s’ seja maior quando comparados a amostras na condição de umidade natural.

É possível identificar pela análise dos gráficos presentes nas Figuras 4.27 e 4.28 que, conforme se aumenta o valor do coeficiente ‘s’, são exigidos maiores valores de ‘pi’ para que o solo seja classificado como erodível.

### 4.3.3. MAPAS ELABORADOS

Nesta seção serão apresentados os mapas desenvolvidos ao longo da presente pesquisa, os quais foram elaborados no Centro Integrado de Pesquisa em Planejamento Geográfico (CIPGeo) do Instituto de Estudos Socioambientais (IESA) da Universidade Federal de Goiás

(UFG), utilizando o programa ArcGIS (software ArcMap) versão 10.3.1, com base na manipulação dos dados do grupo de pesquisa P&D SEDIMENTOS, organizado sob o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000), projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), para o Hemisfério Sul, fuso 23.

#### **4.3.3.1. MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DE FEIÇÕES EROSIVAS**

Dentre as 39 feições erosivas cadastradas e pré-validadas pelo P&D SEDIMENTOS, 33 foram efetivamente validadas durante o presente trabalho. A Figura 4.29 apresenta algumas das erosões identificadas em campo.

Dos 24 pontos cadastrados durante o trabalho de campo, 3 foram eliminados posteriormente, principalmente por já terem sido cadastrados pelo P&D SEDIMENTOS ou não serem relevantes para o trabalho. De modo que, do trabalho de campo, resultaram 21 pontos.

Deste modo, são contabilizadas no mapa que é apresentado na Figura 4.30:

- 33 Feições erosivas cadastradas e pré-validadas pelo P&D SEDIMENTOS, validadas pelo presente trabalho;
- 06 Feições erosivas cadastradas, amostradas e estudadas pelo presente trabalho; e
- 15 Feições erosivas cadastradas pelo presente trabalho.

Nota-se que as feições identificadas tendem a se localizar próximo às regiões das bordas do reservatório, sendo que na região norte da BCD há poucas ocorrências, devido, principalmente, às dimensões do alargamento do reservatório serem menores que ao sul, por exemplo.



Figura 4.29: Processos erosivos identificadas durante o trabalho de campo

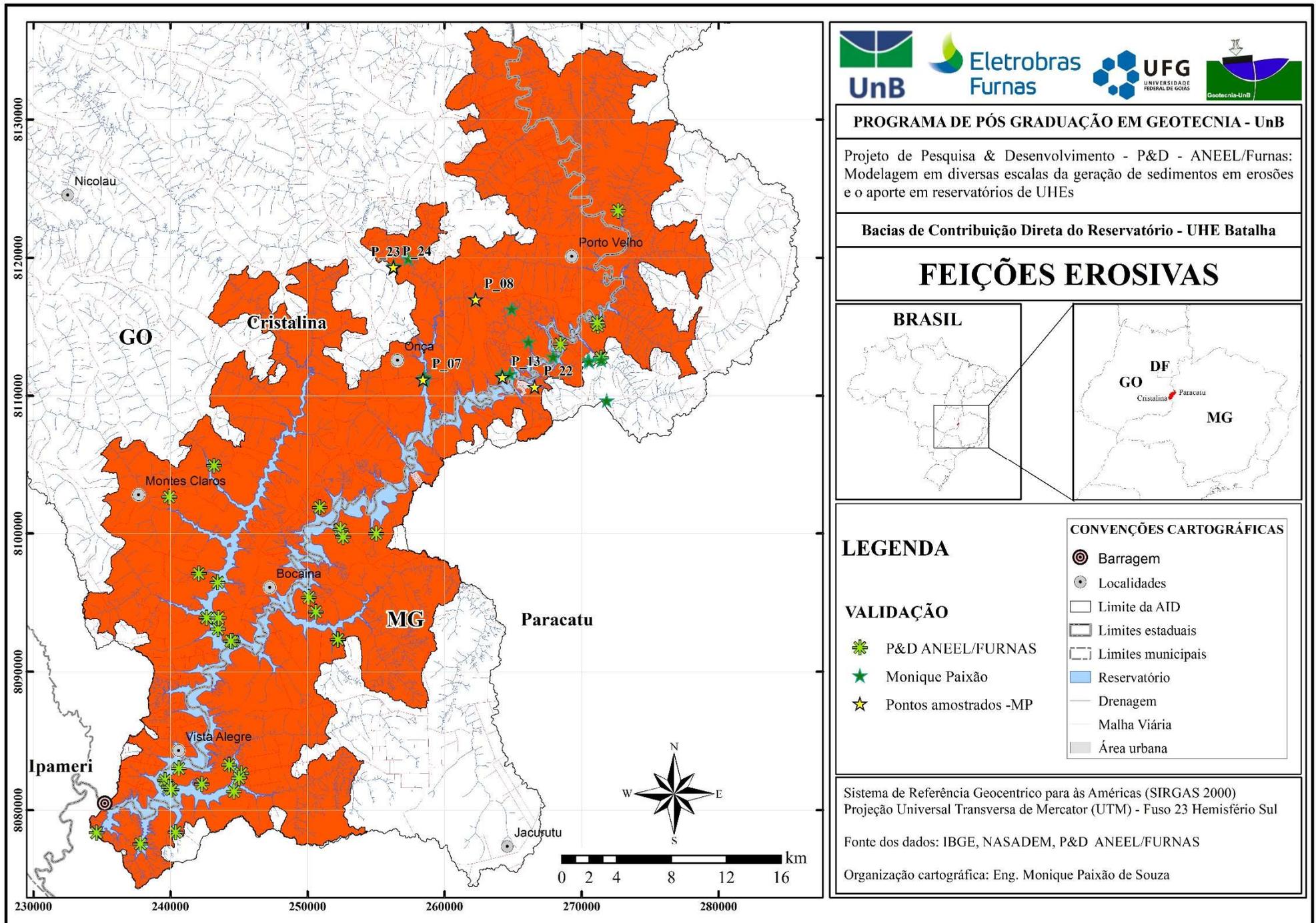


Figura 4.30: Mapa de distribuição das feições erosivas para a BCD da UHE Batalha

#### 4.3.3.2. MAPA GEOLÓGICO

A Figura 4.31 apresenta o mapa geológico da BCD da UHE Batalha, a qual apresenta majoritariamente a Formação Serra do Landim, mas também é composta pelas unidades geológicas de: Formação Chapada dos Pilões, Coberturas Detrito-Lateríticas Paleogênica e Cobertura Detrito-Laterítica Neo-Pleistocênica.

Nota-se que a ‘Formação Serra do Landim’ abrange boa parte da região da BCD, enquanto que a ‘Cobertura Detrito-Laterítica Neo-Pleistocênica’ encontra-se margeando as extremidades nordeste, sudeste, sudoeste e noroeste, sendo que nesta última ocorre uma região um pouco maior que as demais, na qual foram coletadas as amostras do Ponto 8.

A ‘Cobertura Detrito-Laterítica Paleogênica’ concentra-se na região norte, enquanto que a ‘Formação Chapada dos Pilões’ concentra-se na região sul, e a ‘Formação Paracatu’ localiza-se na região sudeste da BCD.

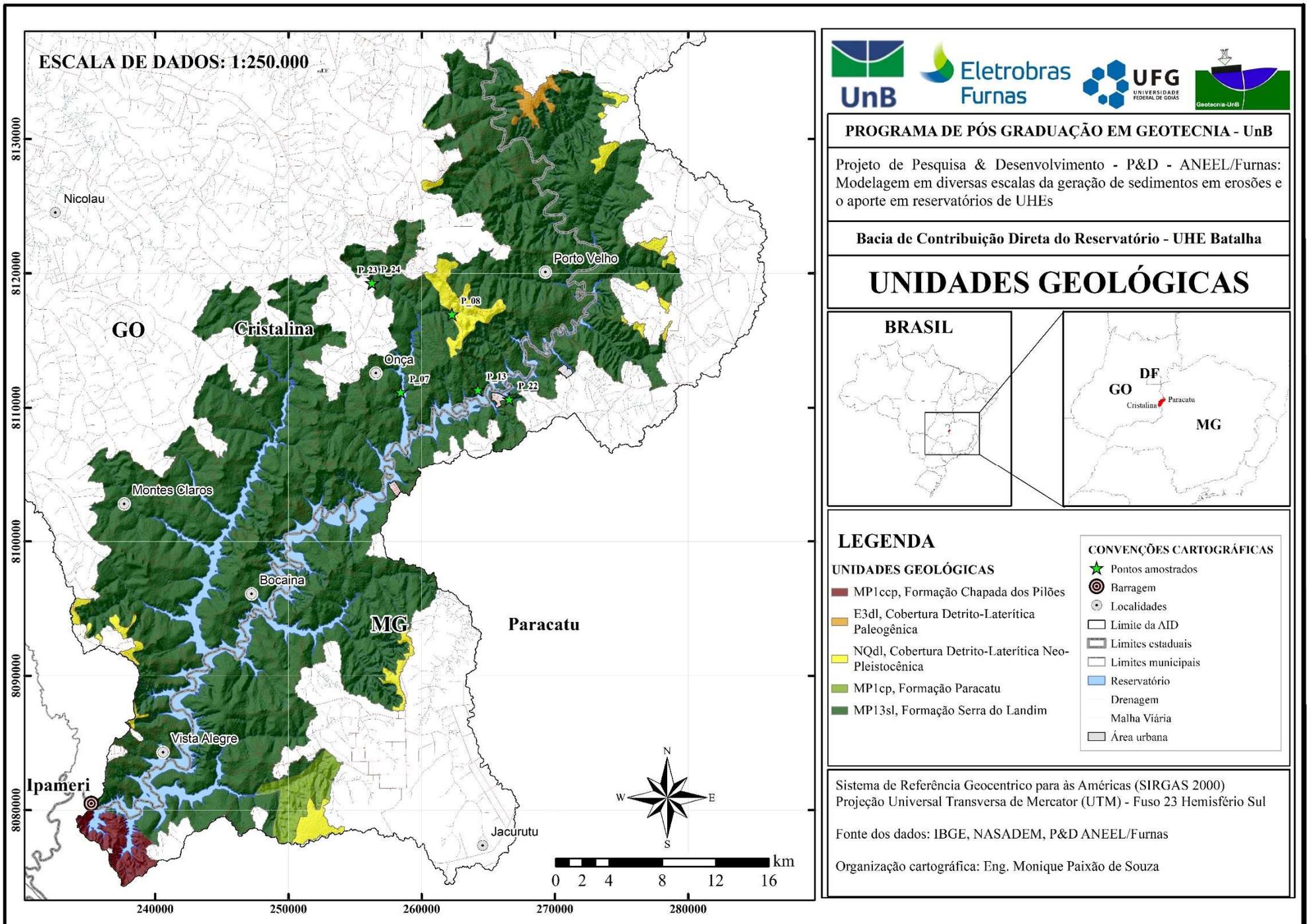


Figura 4.31: Mapa Geológico da BCD da UHE Batalha

#### **4.3.3.3. MAPA DE GEOMORFOLOGIA – UNIDADES E RELEVO**

O mapa de geomorfologia é apresentado na Figura 4.32, a qual permite identificar as unidades de relevo do tipo depressão, planalto, chapadas e patamares.

O ‘Planalto Cristalina’ abrange a maior parte da região da BCD.

Na região central da BCD, onde o reservatório de Batalha apresenta maior porção de áreas alagadas, é observada a unidade de relevo ‘Depressão do Rio São Marcos’.

A unidade de relevo ‘Chapadas de Paracatu’ localiza-se nas extremidades da região sudeste, no município de Paracatu, enquanto que a ‘Chapada de Cristalina’ se localiza na região oeste da BCD.

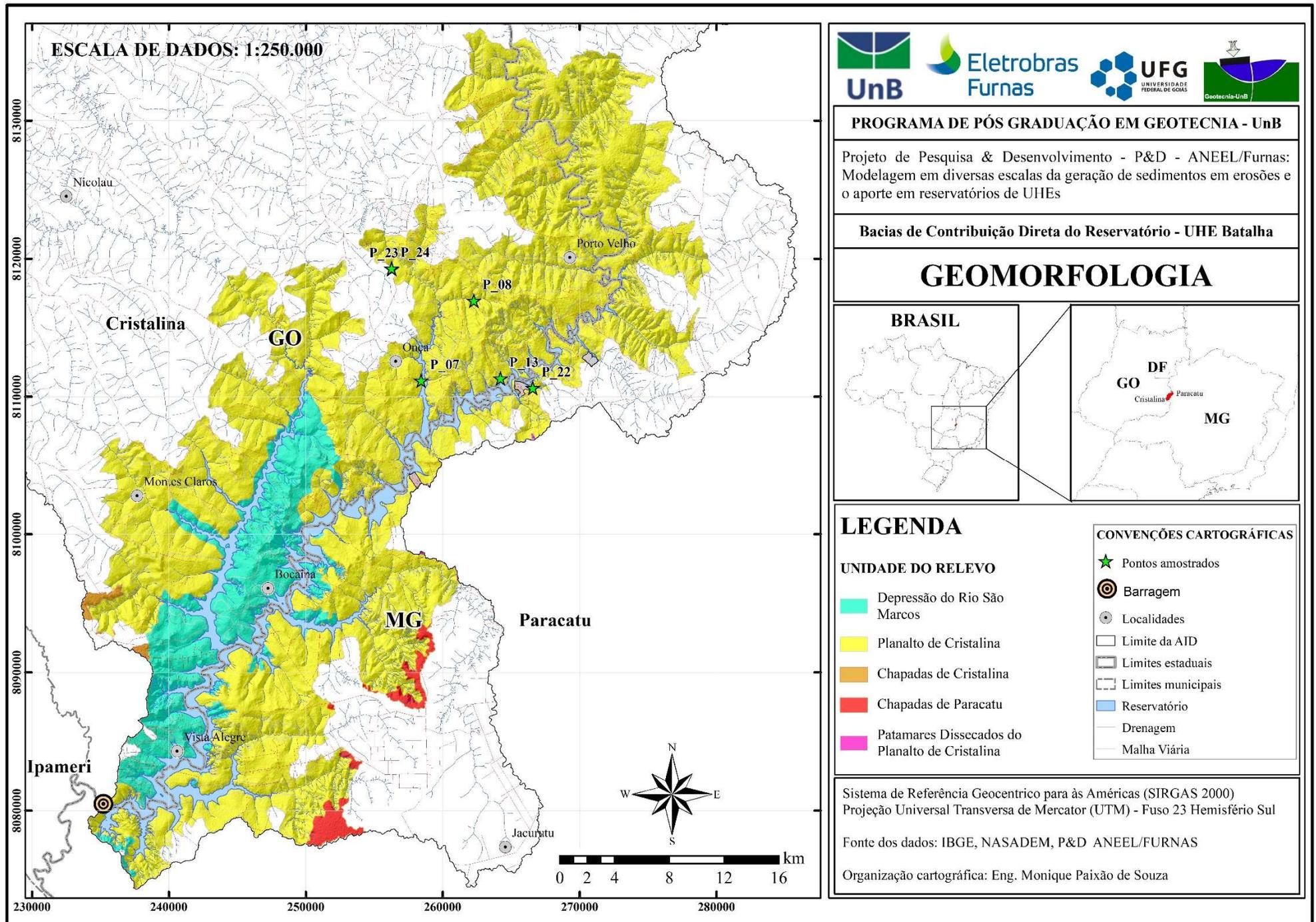


Figura 4.32: Mapa Geomorfológico – Unidades de relevo da BCD da UHE Batalha

#### 4.3.3.4. MAPA DE SOLOS

O mapa de solos que é apresentado na Figura 4.33 expõe diversos tipos de solos que compõem a região da BCD de Batalha de modo disperso. Pode-se identificar os solos: Gleissolo Melânico, Neossolo Flúvico, Neossolo Litólico, Cambissolo Háptico, Plintossolo Pétrico Concrecionário, Plintossolo Pétrico Lintoplíntico, Latossolo Vermelho e Latossolo Vermelho-amarelo. A distribuição dos solos está apresentada na Tabela 4.10.

Os solos do tipo Latossolo e Cambissolo são predominantes em todas as regiões da BCD. É possível identificá-los em pequenas e grandes porções em todas as regiões da BCD.

Na região nordeste do reservatório há a ocorrência de solo do tipo Neossolo Litólito. Nesta mesma região também é possível identificar a presença de Gleissolo. Tal solo apresenta-se, também, nas margens das bordas imediatas do reservatório.

Os solos do tipo Plintossolo Pétrico Concrecionário e Lintoplíntico apresentam-se em pequenas áreas localizadas nas regiões oeste da BCD, próximos à cidade de Montes Claros (sul), na parte central da BCD próximo ao município de Onça, e na parte oeste da BCD entre os municípios de Cristalina e Onça.

Nas imediações das drenagens dos municípios de Cristalina e Montes Claros foi identificada a ocorrência de solos do tipo Neossolo Flúvico.

Tabela 4.10: Solos identificáveis na BCD da UHE Batalha

TIPOS DE SOLO	ÁREA (Km <sup>2</sup> )	% ACUMULADO
CAMBISSOLO HÁPTICO Tb Distrófico típico	492,9568425	44,7%
GLEISSOLO MELÂNICO Tb Distrófico / NEOSSOLO FLÚVICO Tb Eutrófico	96,56173562	8,7%
LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico	155,2548947	14,1%
LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico	157,2595191	14,2%
NEOSSOLO FLÚVICO Tb Eutrófico	22,00009808	2,0%
NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico típico	178,0459878	16,1%
PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário típico	0,910837385	0,1%
PLINTOSSOLO PÉTRICO Litoplíntico	0,729863512	0,1%

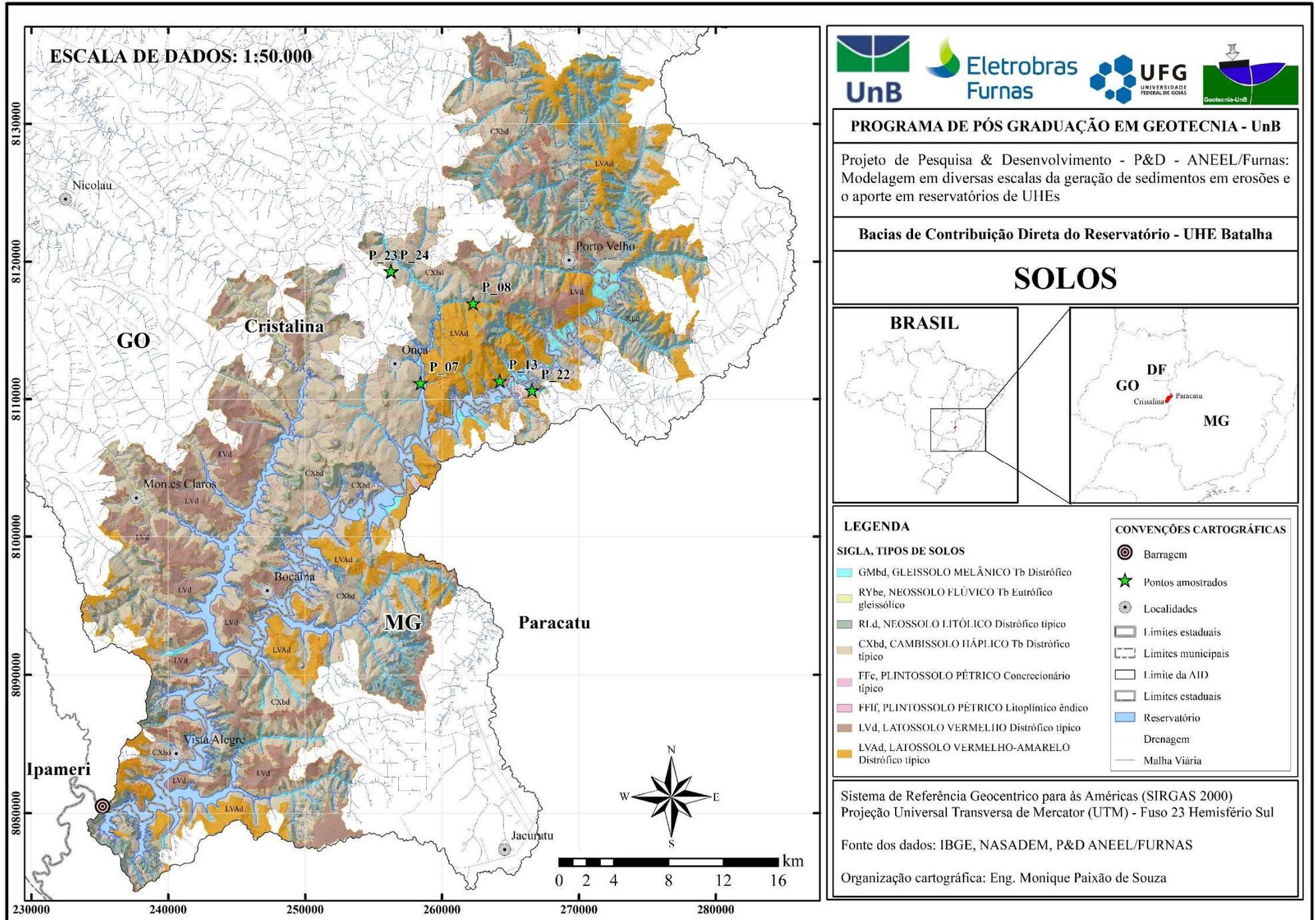


Figura 4.33: Mapa de solos da BCD da UHE Batalha

#### 4.3.3.5. MAPA LITOLÓGICO

A Figura 4.34 apresenta as unidades litológicas presentes na AID. Nota-se que os litotipos presentes são: Aglomerados (areia, argila), Areias, Filitos, e Sericita filítico carbonoso.

Na região norte da BCD há a predominância de Filitos, Sericita filítico carbonoso e Aglomerados.

Na região central e sul da BCD, os litotipos predominantes são os do tipo Sericita filítico carbonoso. Em pequenas áreas localizadas nos limites da região oeste da BCD, é possível identificar a presença de Filito.

Na região sul, mais especificamente nas direções sudoeste e sudeste, é identificado Filito em regiões extremas da BCD. Próximo a estas regiões também há a ocorrência de Aglomerados.

As areias estão presentes ao longo das bordas imediatas do reservatório, principalmente nas regiões centrais da BCD.

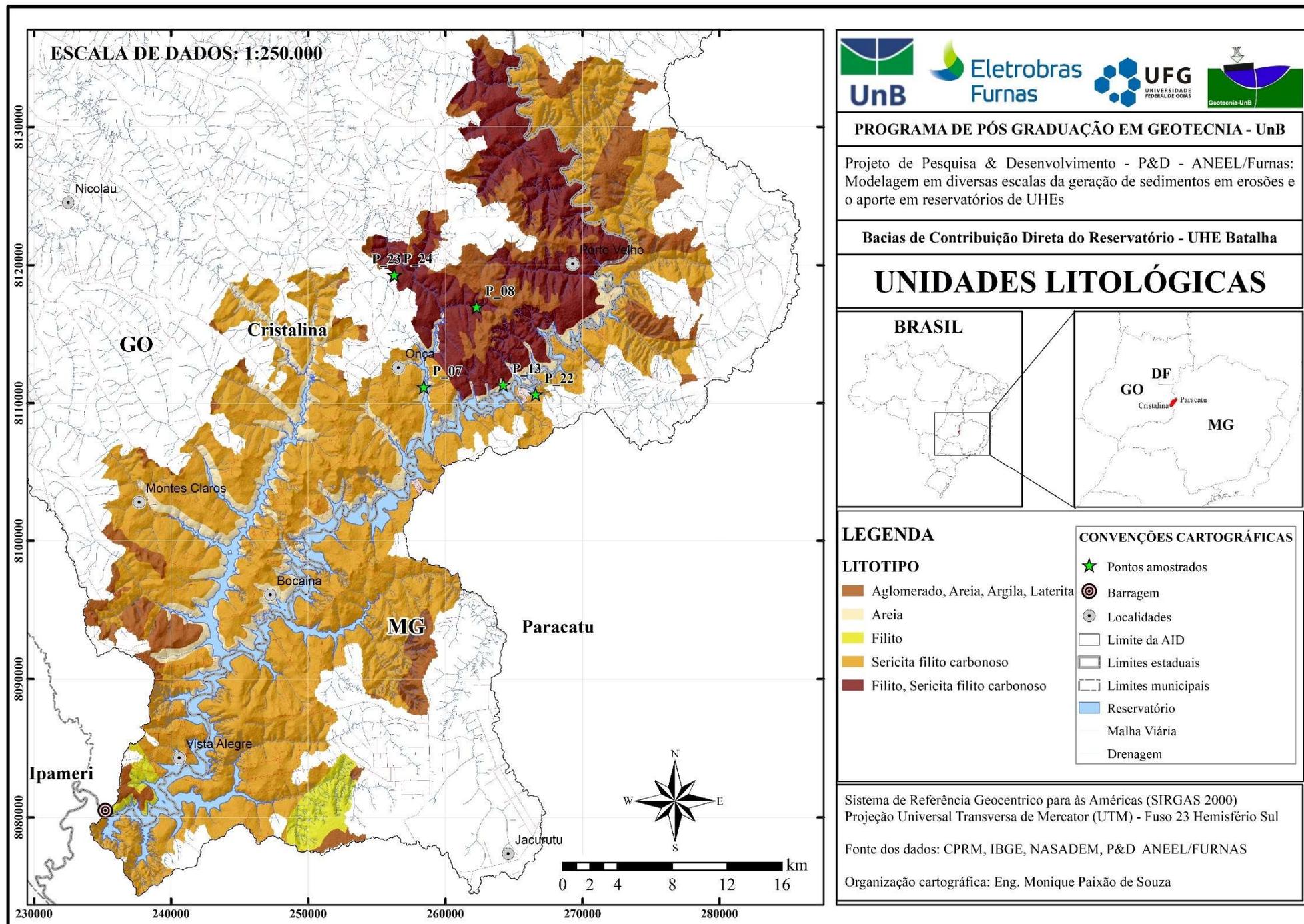


Figura 4.34: Mapa Litológico da BCD da UHE Batalha

#### **4.3.3.6. MAPA HIPSOMÉTRICO**

A análise da hipsometria para a BCD de Batalha, presente na Figura 4.35, identificou que o valor médio da altitude é de aproximadamente 877 m, com amplitude altimétrica de 212 m.

As menores cotas partem de 771 m, na região sudoeste da BCD, próximo à planície do rio São Marcos, onde encontra-se o reservatório. Já as maiores cotas alcançam os 983 m, na região sudeste.

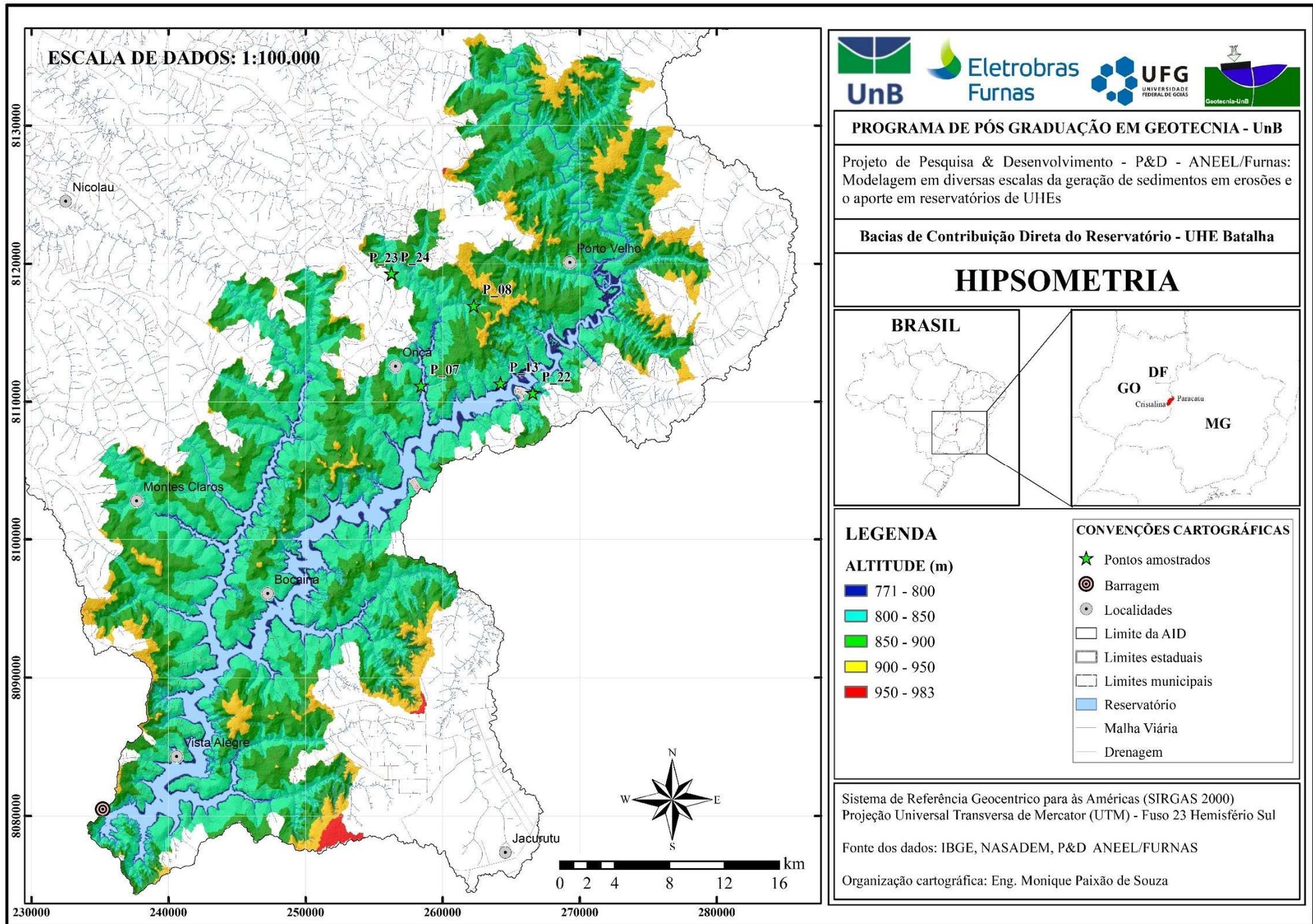


Figura 4.35: Mapa Hipsométrico da BCD da UHE Batalha

#### **4.3.3.7. MAPA DE COMPRIMENTO DE FLUXO**

O mapa apresentado na Figura 4.36 exibe o comprimento do fluxo da BCD que apresenta classes de valores compreendidos entre 0 e 301 m, sendo que algumas áreas apresentam valores ligeiramente maiores que 301 m. Nota-se que são predominantes as classes entre 0 e 50 e 51 e 300.

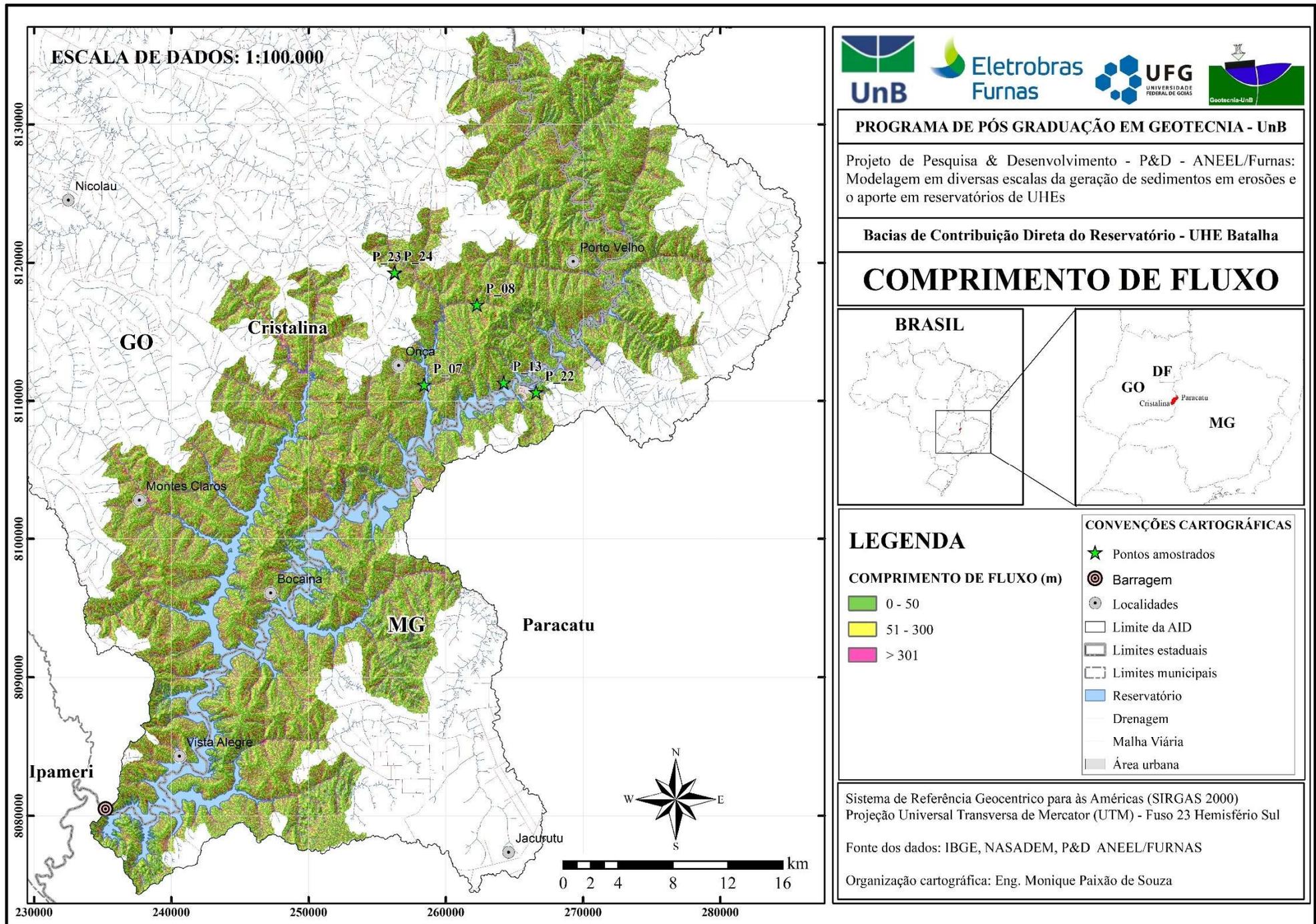


Figura 4.36: Mapa do Comprimento do Fluxo da BCD da UHE Batalha

#### 4.3.3.8. MAPA DE DECLIVIDADES

A declividade que se apresenta no mapa da Figura 4.37 é referenciada de acordo com as classes de declividade sugeridas pela Embrapa (1999), que classifica o percentual de declividade dos solos em:

- 0 – 3%: Relevo do tipo ‘Plano’
- 3 – 8%: Relevo do tipo ‘Suave Ondulado’
- 8 – 20%: Relevo do tipo ‘Ondulado’
- 20 – 45%: Relevo do tipo ‘Forte ondulado’
- 45 – 75%: Relevo do tipo ‘Montanhoso’

A partir das análises do mapa de declividade da BCD, nota-se que os valores de declividade variam de 0 a 45%, significando que as classes de relevo vão do plano, passando pelo suave ondulado, ondulado, chegando até as classes de relevo dos tipos forte ondulado e montanhoso. Essa diversidade altimétrica pode favorecer a ocorrência de processos erosivos.

No geral, a declividade média apresenta um predomínio de plano a suave ondulado na maior parte das regiões. Embora haja a ocorrência da classe de relevo do tipo montanhoso, a mesma ocorre de modo isolado, predominando em pequenas áreas, sendo que na parte norte o relevo montanhoso se apresenta em áreas um pouco maiores.

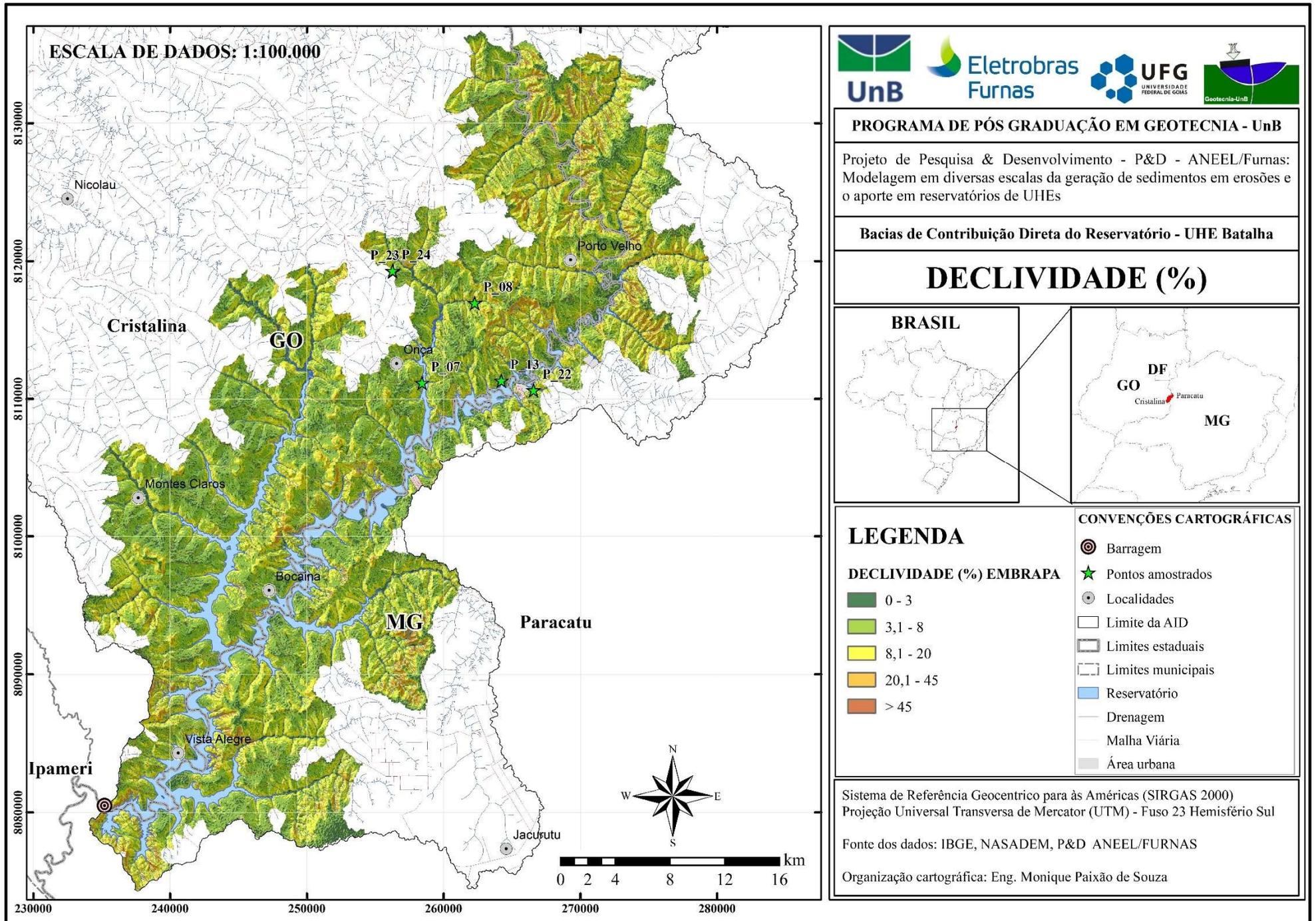


Figura 4.37: Mapa de declividade da BCD da UHE Batalha

#### **4.3.3.9. MAPA DE HAND**

De acordo com a análise do modelo HAND presente no mapa da Figura 4.38 da BCD de Batalha, verificou-se que a maior parte da área se encontra com desníveis entre 16 e 50 m, com topos de morro situados a mais de 50 m em desnível com as drenagens mais próximas.

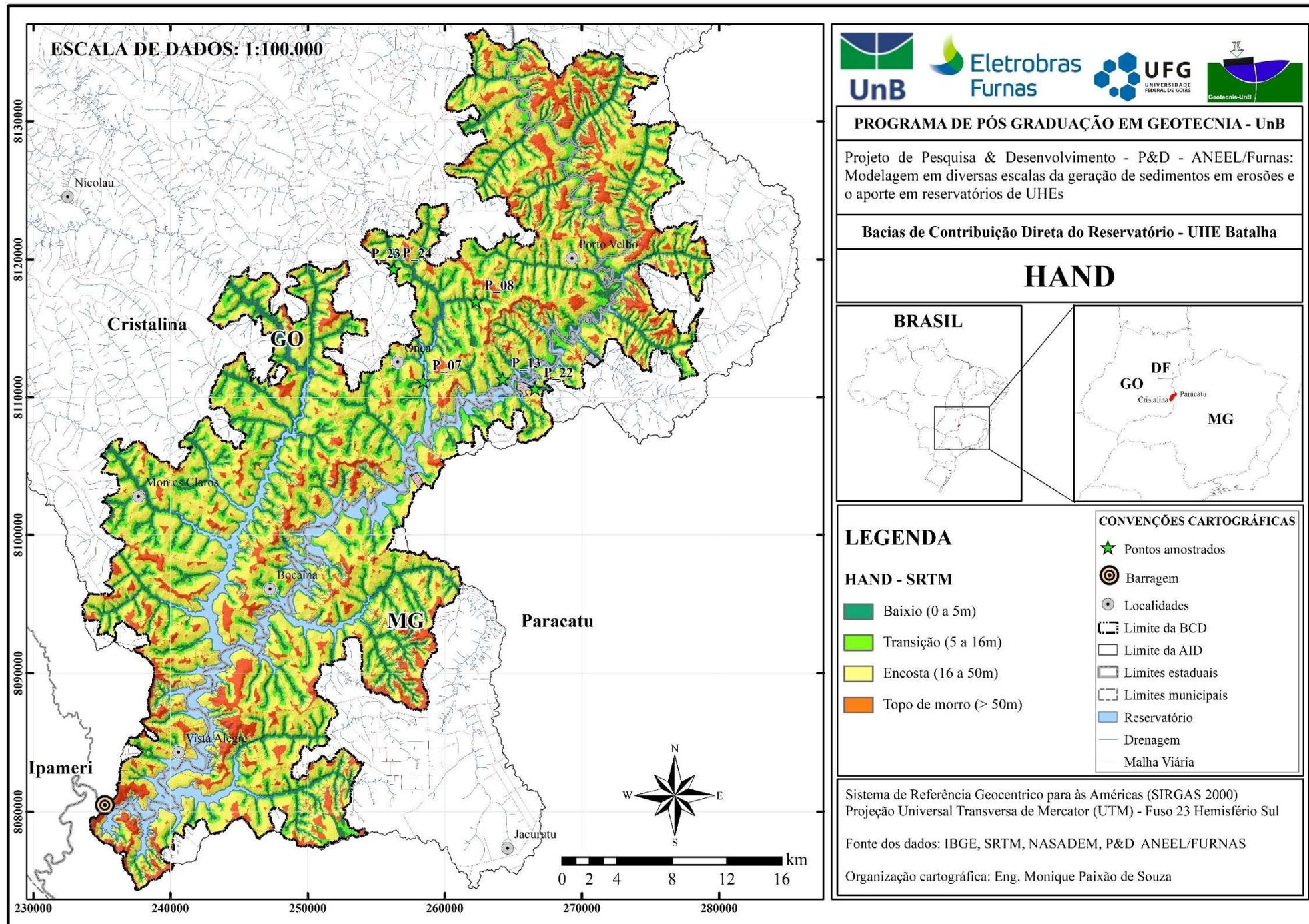


Figura 4.38: Mapa de HAND da BCD da UHE Batalha

#### 4.3.3.10.MAPA DE USO E COBERTURA DO SOLO

As Figuras 4.39 e 4.40 apresentam, respectivamente, as informações gráficas e o mapa do uso e cobertura do solo da BCD da UHE de Batalha referente ao ano de 2020.

Portanto, no ano de 2020, 38,7% da área da BCD era utilizada para fins agrícolas, representando o maior percentual de uso, seguido por 31,9%, que representa a formação campestre; 7,4% da área era ocupada por formações florestais; 11,6% era coberto pela massa de água que o reservatório formava; e 10,4% era composto por pastagem de animais. As áreas urbanas presentes na BCD não representaram valores significativos, mas podem ser identificadas no mapa a nordeste do Ponto 22.

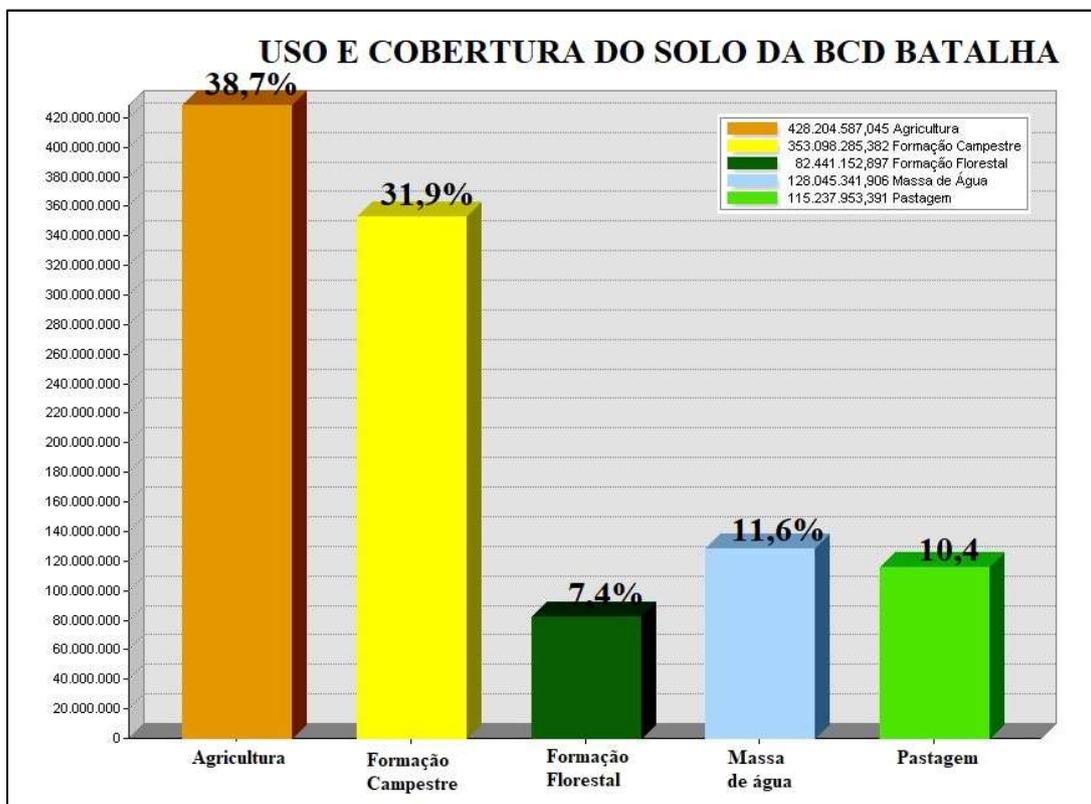


Figura 4.39: Gráfico do uso e cobertura do solo da BCD da UHE Batalha

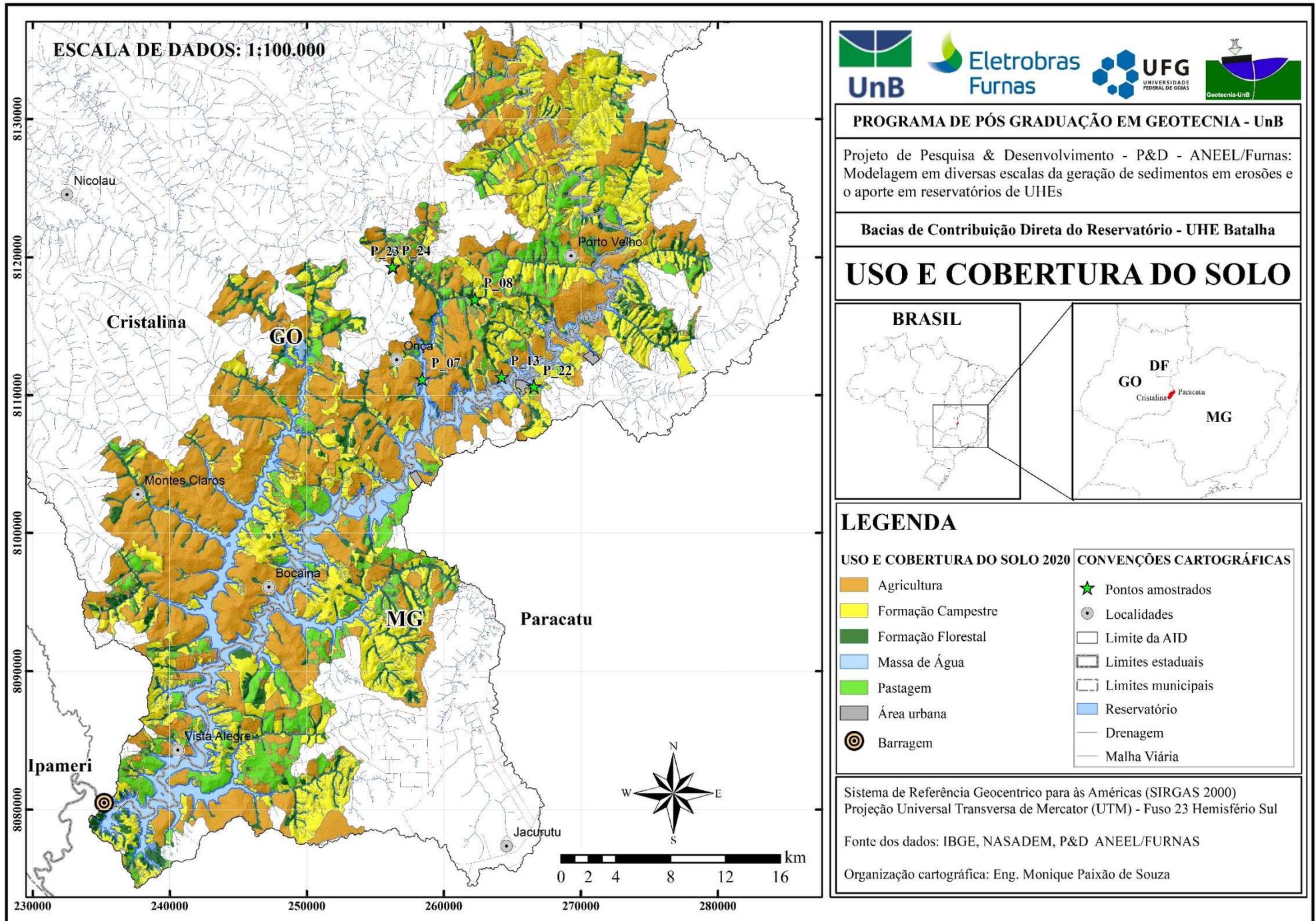


Figura 4.40: Mapa de Uso e Cobertura do Solo da BCD da UHE Batalha

#### **4.3.3.11.MAPA DE DISSECAÇÃO**

Considerando que o índice de dissecação do relevo consiste num parâmetro morfométrico que pode ser utilizado, dentre outras coisas, para avaliar e detectar áreas com fragilidade ambiental, na figura 4.41 é apresentado o nível de dissecação na BCD de Batalha.

Os dados apresentados descrevem a dissecação como: Muito fraca, Fraca, Moderada, Forte e Muito forte. O nível de dissecação ‘Fraca’ representa áreas com poucos indícios de fragilidade e ‘Muito forte’ representa áreas com plenos indícios de fragilidade ambiental.

Percebe-se uma predominância do nível de dissecação moderada a forte na maior parte da BCD da UHE de Batalha indicando, portanto, que boa parte das áreas da BCD encontram-se com fragilidade ambiental.

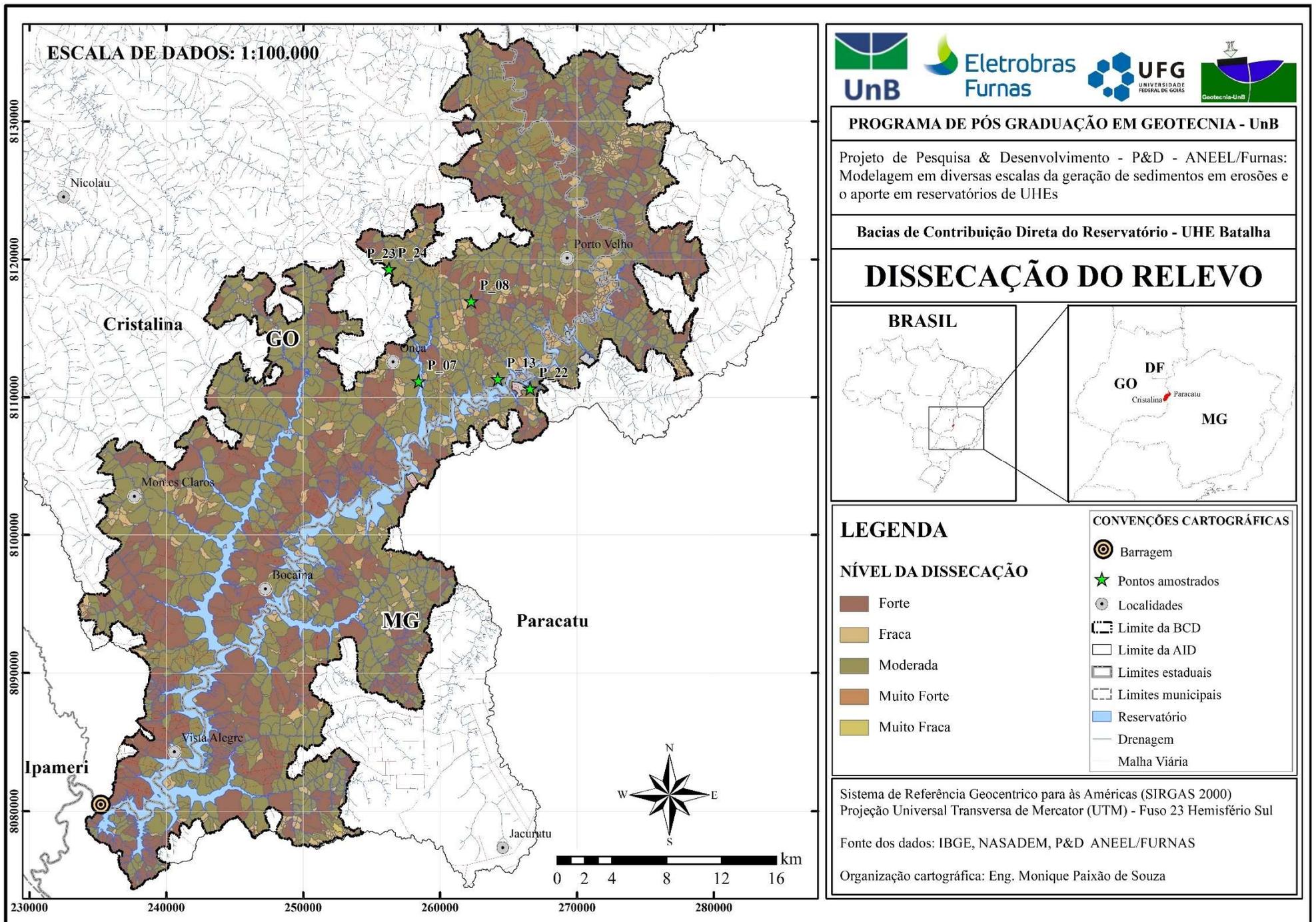


Figura 4.41: Mapa de dissecação do relevo da BCD da UHE Batalha

#### 4.3.3.12.MAPA DE CURVATURAS: FORMAS DA VERTENTE

As formas que as vertentes da BCD de Batalha se configuram são apresentadas na Figura 4.42. A Tabela 4.11 apresenta os quantitativos das áreas identificadas para cada tipo de curvatura. Percebe-se que há um predomínio da curvatura Divergente-Retilíneo em 34,9% das áreas identificadas, seguida pela classe Convergente-Retilíneo com 24,3% e da curvatura Planar-Retilíneo com 18,8%. Deste modo, identifica-se a curvatura vertical predominante como do tipo Retilíneo, enquanto que a curvatura horizontal é bastante diversa, variando no Convergente, Planar e Divergente.

Tabela 4.11: Curvaturas horizontal e vertical da vertente da BCD da UHE Batalha

<b>TIPO DE CURVATURA (Horizontal-Vertical)</b>	<b>ÁREA (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>% ACUMULADO</b>
Convergente-Côncavo	127,78	13,1%
Convergente-Convexo	20,12	2,1%
Convergente-Retilíneo	236,71	24,3%
Divergente-Côncavo	32,63	3,3%
Divergente-Convexo	102,08	10,5%
Divergente-Retilíneo	340,41	34,9%
Planar-Côncavo	36,79	3,8%
Planar-Convexo	23,48	2,4%
Planar-Retilíneo	183,70	18,8%
<b>TOTAL</b>	<b>975,93</b>	<b>100,0%</b>

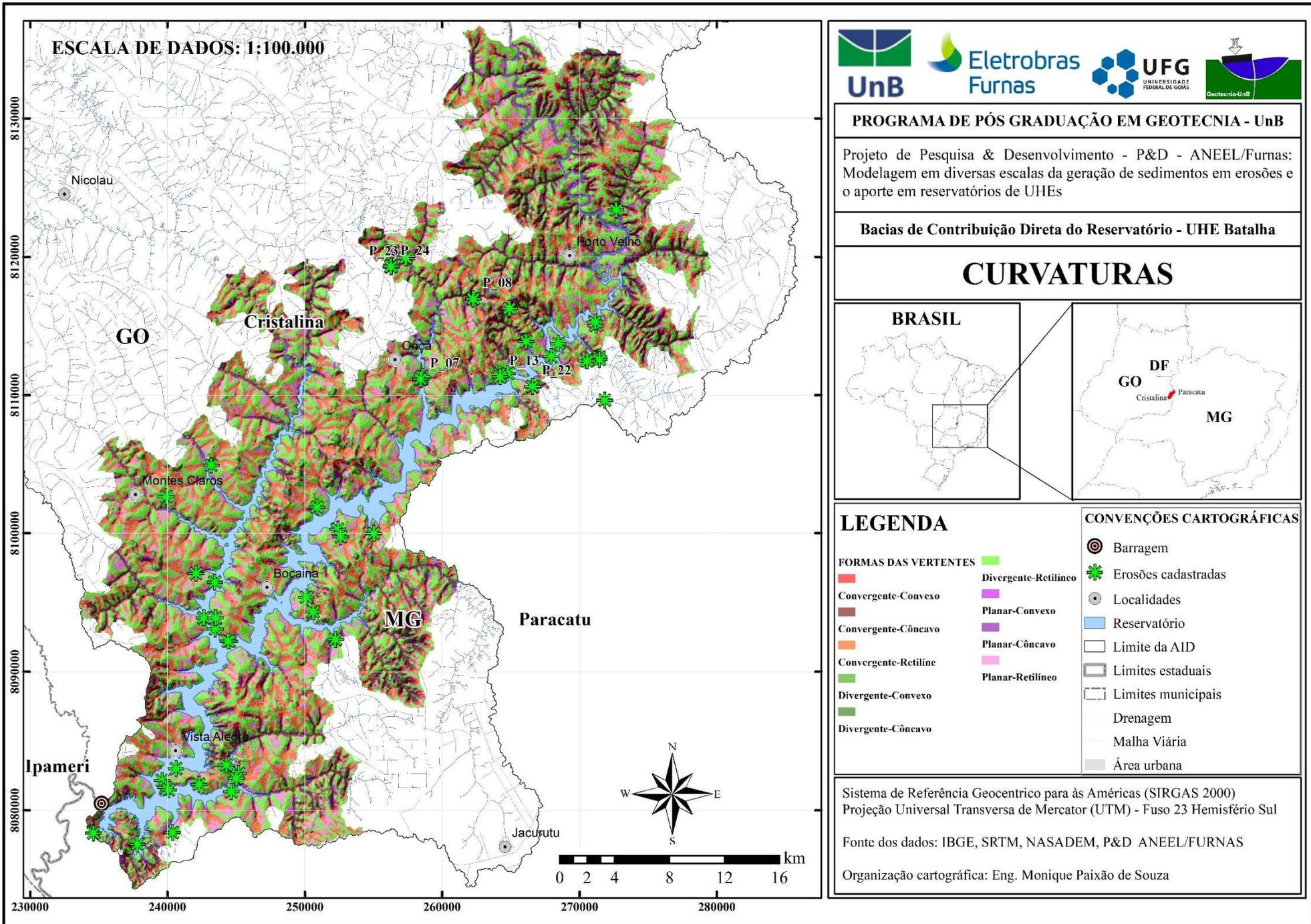


Figura 4.42: Mapa de Curvaturas do relevo da BCD da UHE Batalha

#### **4.3.3.13.MAPA DE MODIFICAÇÕES ANTRÓPICAS**

O mapa apresentado na Figura 4.43 exibe as áreas da BCD que sofreram diretamente modificações antrópicas e as áreas em que se encontra vegetação nativa.

A classificação como vegetação nativa não garante que a região se encontre totalmente preservada, mas sim, indica que mantém características que representam melhor o seu estado natural. Por exemplo, regiões campestres podem estar sendo utilizadas para criação de gado livre, onde o animal usa a região para pastar e se alimentar, mas preservando os biomas.

Verifica-se que aproximadamente 82% da área da BCD já sofreu antropização de modo a modificar sua vegetação nativa.

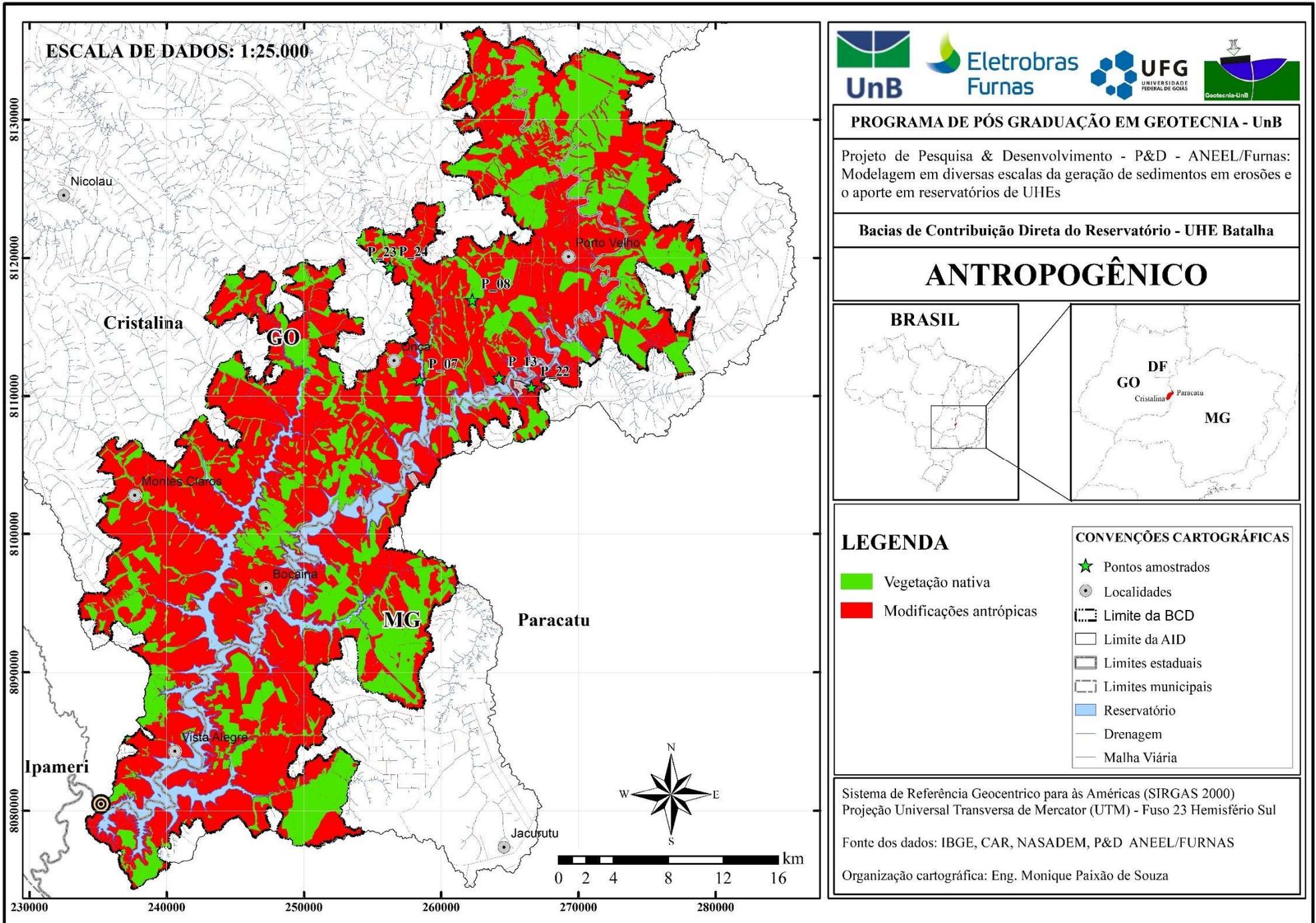


Figura 4.43: Mapa antropogênico da BCD da UHE Batalha

#### **4.3.3.14.MAPA DE ERODIBILIDADE**

O mapa de erodibilidade é apresentado na Figura 4.44, acrescido das erosões validadas no presente trabalho.

É notória a predominância da erodibilidade tipo ‘alta’ na maior parte da BCD. Do mesmo modo, é possível verificar que as áreas classificadas com erodibilidade ‘muito baixa’ são de difícil identificação. Percebe-se também que as ocorrências de algumas feições erosivas identificadas estão localizadas em regiões de erodibilidade ‘baixa’, o que pode significar que as regiões anteriormente mapeadas como erodibilidade baixa podem estar apresentando potencial de erodibilidade minorado ou, ainda, pode indicar que o uso e ocupação destas áreas está ocorrendo de modo inadequado, de modo a induzir erosões mesmo em solos pouco erodíveis.

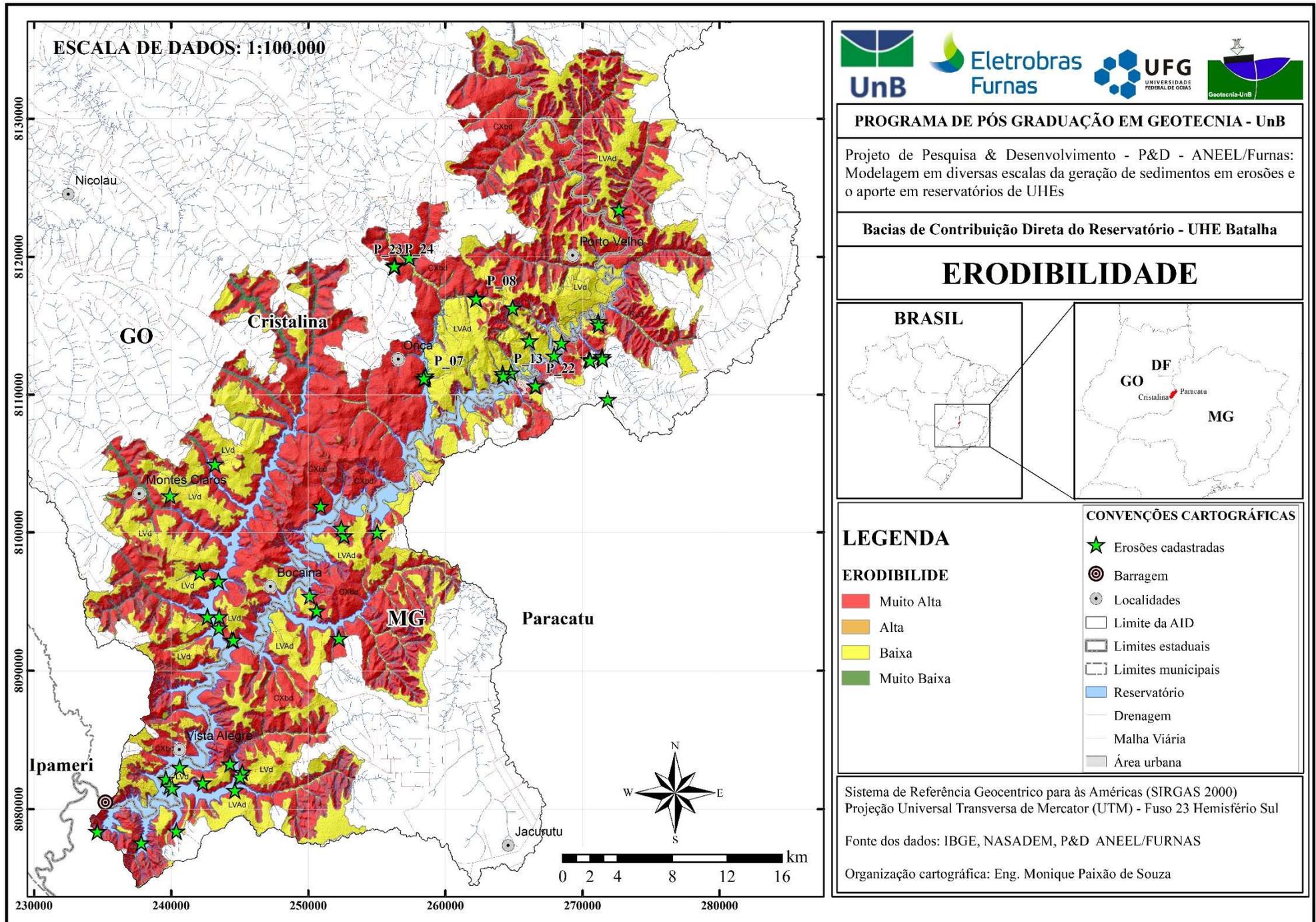


Figura 4.44: Mapa de erodibilidade da BCD da UHE Batalha

#### **4.3.3.15. MAPA DE SUSCETIBILIDADE ÀS EROSÕES LAMINARES**

Por fim, com base em todas as análises feitas na presente pesquisa, e com base na metodologia proposta por Salomão *et al.* (2012) a Figura 4.45 apresenta o mapa de suscetibilidade às erosões laminares para a BCD de Batalha.

É notório o domínio da condição ‘muito suscetível’ na maior parte da BCD, embora estejam visíveis grandes áreas com a condição ‘pouco a não suscetível’.

A condição ‘extremamente suscetível’, embora não seja muito expressiva em termos de concentração de áreas, quando comparada à condição ‘pouco a não suscetível’, por exemplo, apresenta-se de forma acentuada na região ao norte, e mais esparsa nas regiões ao sul da BCD.

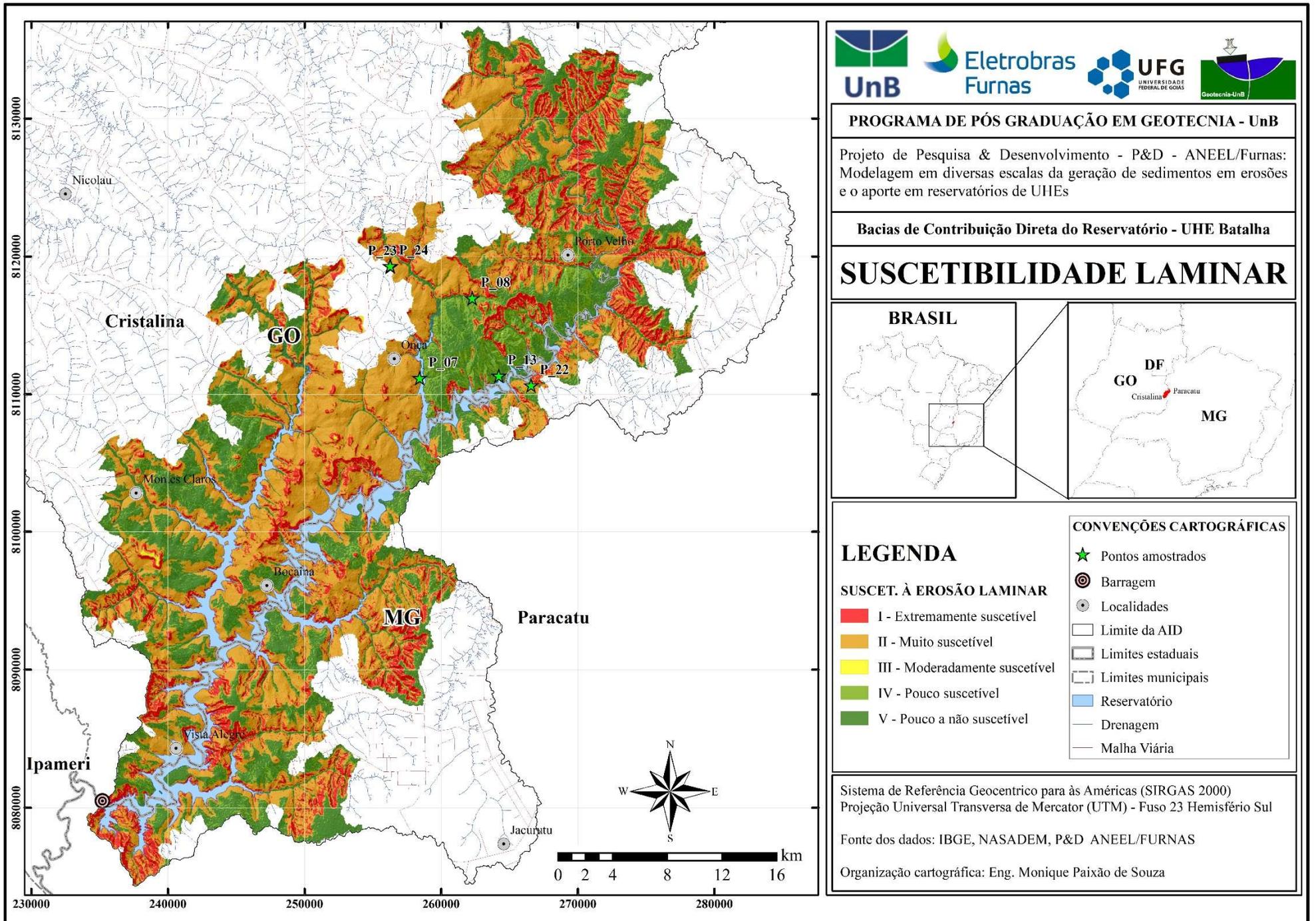


Figura 4.45: Mapa de suscetibilidade às erosões laminares da BCD da UHE Batalha

#### 4.3.3.16. MAPA DE SUSCETIBILIDADE ÀS EROSÕES LINEARES

Para execução do mapa de suscetibilidade linear, foi realizada a interseção dos mapas de Curvaturas, Tipos de solos, Declividades e HAND, com base nas regras constantes na Tabela 4.12. As áreas que não se enquadraram em nenhuma das regras foram analisadas caso a caso, e classificadas seguindo a tendência geral apontada nas regras da Tabela 4.12.

A Figura 4.46 apresenta o resultado final do mapa de suscetibilidade as erosões lineares da BCD e a Tabela 4.13 apresenta as respectivas classes de suscetibilidade linear mapeadas nas áreas da BCD.

Tabela 4.12: Regras para o geoprocessamento do mapa de suscetibilidade linear da BCD da UHE Batalha

<b>CURVATURAS</b>	<b>TIPOS DE SOLO</b>	<b>DECLIVIDADES</b>	<b>HAND</b>	<b>CLASSE ATRIBUÍDA</b>
convexo-convergente; retilíneo-convergente; côncavo-convergente.	Neossolo Flúvico	0-3%	Baixio e transição	Extremamente suscetível a erosões lineares
convexo-convergente; retilíneo-convergente; côncavo-convergente.	Neossolo Litólico; Cambissolo	12-45%	Encosta	Suscetível a sulcos e ravinas - Não suscetível a voçorocas
convexo-planar; convexo-divergente; retilíneo-planar; retilíneo-divergente; côncavo-planar; côncavo-divergente.	Cambissolo	6-12%	Topo de morro	Suscetível a sulcos e ravinas - Pouco suscetível a voçorocas
convexo-planar; convexo-divergente retilíneo-planar; retilíneo-divergente; côncavo-planar; côncavo-divergente.	Latossolo Vermelho-amarelo	3-6%	Encosta e Topo de morro	Moderadamente suscetível a erosões lineares
convexo-convergente; retilíneo-convergente; côncavo-convergente.	Gleissolo	3-6%	Transição e Baixio (alagadas)	Extremamente suscetível a erosões lineares
convexo-planar; convexo-divergente retilíneo-planar; retilíneo-divergente; côncavo-planar; côncavo-divergente.	Neossolo Litólico	3-6%	Topo de morro	Suscetível a sulcos e ravinas - Não suscetível a voçorocas
convexo-convergente; retilíneo-convergente; côncavo-convergente.	Neossolo Litólico	>45%	Encosta	Suscetível a sulcos e ravinas - Não suscetível a voçorocas
convexo-convergente; retilíneo-convergente; côncavo-convergente.	Latossolo Vermelho	3-6%	Encosta	Suscetível a sulcos e ravinas - Pouco suscetível a voçorocas
convexo-convergente; retilíneo-convergente; côncavo-convergente.	Neossolo Litólico; Cambissolo	3-12%	Encosta	Pouco suscetível a erosões lineares
convexo-convergente; retilíneo-convergente; côncavo-convergente.	Latossolo; Cambissolo	0-3%	Encosta	Pouco suscetível a erosões lineares

Tabela 4.13: Classes de suscetibilidade a erosões lineares identificadas na BCD da UHE Batalha

<b>CLASSE DE SUSCETIBILIDADE A EROSÕES LINEARES</b>	<b>ÁREA (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>% ACUMULADO</b>
Extremamente suscetível a erosões lineares	143,55	13,0%
Moderadamente suscetível a erosões lineares	648,37	58,7%
Pouco suscetível a erosões lineares	85,19	7,7%
Suscetível a sulcos e ravinas - Não suscetível a voçorocas	179,42	16,3%
Suscetível a sulcos e ravinas - Pouco suscetível a voçoroca	47,20	4,3%
<b>TOTAL</b>	<b>1103,72</b>	<b>100,0%</b>

Fica evidenciada a predominância de áreas classificadas como ‘Moderadamente suscetível a erosões lineares’ em 58,7% da área da BCD. Tal classe está relacionada aos solos do tipo Latossolo, Plintossolo Pétrico, Gleissolo e Neossolo Flúvico com declividades e HAND médios, com curvaturas predominantes do tipo Divergente-Retilíneo, Convergente-Retilíneo e Planar-Retilíneo. A segunda maior classe identificada é a ‘Suscetível a sulcos e ravinas - Não suscetível a voçorocas’, presente em cerca de 16,3% da área da BCD, principalmente em locais de predominância de solos rasos, como o do tipo Neossolo Litólico. A classe ‘Extremamente suscetível a erosões lineares’ foi identificada em 13% da área da BCD, predominantemente em solos do tipo Cambissolo, Neossolo Litólico e Flúvico e Gleissolo, sendo identificada, também em solos do tipo Latossolo para declividades e HAND elevados, principalmente para a curvatura convergente-convexa.

Não foram identificadas classes com classificação de ‘Não Suscetível a erosão linear’ em razão das análises dos mapas de Dissecação e de Modificações antrópicas indicarem grau elevado de antropização e, conseqüentemente, elevados potenciais de fragilidade ambiental.

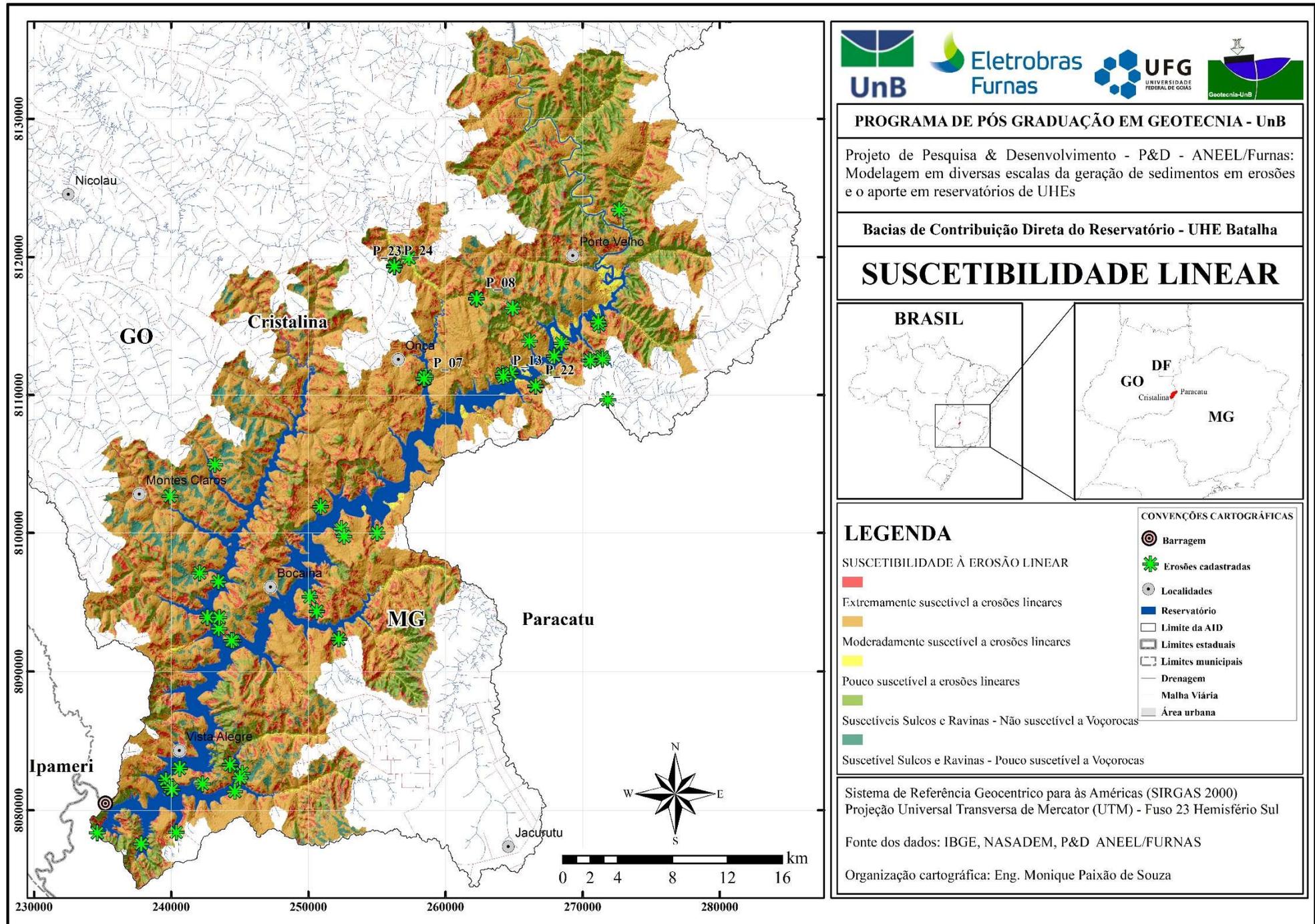


Figura 4.46: Mapa de suscetibilidade às erosões lineares da BCD da UHE Batalha

## 5. CONCLUSÕES

A análise geoespacial e os dados obtidos pelo P&D SEDIMENTOS forneceram a base necessária para iniciar e concretizar os estudos constantes no presente trabalho.

A delimitação da Bacia de Contribuição Direta (BCD) a partir da Área de Influência Direta (AID) permitiu que o presente trabalho obtivesse maior eficiência na caracterização da área de estudo. Foram estudados aspectos que, de fato, poderiam afetar a eficiência do reservatório da UHE Batalha. Foi constatado que a AID apresentava barramentos secundários que retiam sedimentos antes destes chegarem ao reservatório da UHE Batalha, de modo que a delimitação da BCD foi validada em campo como representativa. Na BCD foram identificados fatores que permitiram compreender a gênese e o desenvolvimento dos processos erosivos.

O trabalho de campo foi importante para validar e consolidar diversos dados e teorias. A classificação e caracterização dos solos coletados durante o trabalho de campo na área de estudo permitiu correlacionar as propriedades dos solos com os processos erosivos identificados em campo, reforçando os resultados obtidos durante o geoprocessamento dos mapas da BCD.

O geoprocessamento de mapas utilizando ferramentas de SIG demonstrou ser ferramenta eficiente para o mapeamento da suscetibilidade às erosões, de modo que seus resultados podem amparar medidas de prevenção e controle que visem garantir a manutenção da vida útil do reservatório da UHE Batalha.

Durante o trabalho de campo foram cadastrados 24 pontos pertencentes a área de estudos. Dentre tais pontos, foram coletadas amostras de 6 localidades distintas (P7, P8, P13, P22, P23 e P24). As amostras foram coletadas variando a profundidade, de modo que A1 corresponde a profundidade 0-20 cm, A2: 20-40 cm, A3: 40-60 cm e assim sucessivamente. Foram coletadas 38 amostras deformadas dos pontos P7, P8, P13, P22, P23 e P24, em profundidades que variam do A1, até A10 para alguns pontos; e 18 amostras indeformadas dos pontos P7, P22 e P24, nas profundidades A1 e A2. Os ensaios foram realizados com as amostras em condição de umidade natural (N) e higroscópica (H).

Os resultados laboratoriais confirmaram a predominância de solos do tipo lateríticos na Bacia de Contribuição (BCD) do reservatório de Batalha. As amostras que apresentaram comportamento não lateríticos são de origem antrópica, identificado como material de enchimento de obra de aterro, e/ou material que, devido sua profundidade e não exposição a agentes intempéricos, ainda não sofreu processo de laterização.

No geral, as amostras são classificadas pela metodologia MCT expedita como sendo Argilosa laterítica. Para a classificação segundo a ABNT NBR 6502/22, com base na análise granulométrica realizada com granulômetro a laser, as amostras sem ultrassom apresentam comportamento entre a Areia silto-argilosa e o Silte areno-argiloso. O uso do ultrassom, por sua vez, promoveu a desagregação das partículas de modo que elas tiveram um aumento nas frações argilosas e siltosas, bem como uma redução nas frações arenosas. Assim, as amostras de solo submetidas a ultrassom são classificadas como Siltes ou Siltes areno-argiloso.

O ensaio de perda de massa por imersão permitiu aferir os valores de erodibilidade específica ( $\pi$ ) das amostras indeformadas. Os dados obtidos são compatíveis com os resultados identificados em outros trabalhos. Deste modo, ficou evidenciado que as amostras em condição de umidade natural tendem a apresentar valor de erodibilidade específica menor do que as mesmas amostras ensaiadas em condição de umidade higroscópica. No geral, com exceção da amostra do Ponto 7, as amostras apresentam baixos percentuais de  $\pi$ , variando entre 0,1% e 4,7%, evidenciando valor médio de aproximadamente 2,02%. No Ponto 7, os valores de  $\pi$  para as umidades natural e higroscópica apresentam valores de 64,7% e 74,3%, respectivamente, denotando um valor expressivo de erodibilidade específica.

O ensaio de infiltrabilidade permitiu a identificação em todas as amostras indeformadas analisadas o comportamento típico da curva de infiltrabilidade (Leitura {cm} x Tempo<sup>1/2</sup> {minuto<sup>1/2</sup>}) de modo que foi possível calcular o coeficiente de sorção ( $s$ ) das amostras. Foi identificado um comportamento de saturação lenta com demorada estabilização, o que pode evidenciar um favorecimento para o desenvolvimento de processos erosivos, haja vista que a formação de lâminas d'água pode ser um deflagrador de processos erosivos. As amostras ensaiadas na condição de umidade higroscópica apresentam inclinação inicial da curva de infiltrabilidade mais acentuada, o que possibilita a obtenção do coeficiente de sorção com valores maiores, quando comparadas com as amostras ensaiadas na condição de umidade natural. Foi observado durante os ensaios que a infiltração nas amostras não saturadas ocorria de modo mais intenso e rápido. Na prática, isso pode significar que em campo, quando, no período de seca, começam a ocorrer as primeiras chuvas, o solo tenderá a infiltrar mais rapidamente a água, diminuindo o tempo de escoamento superficial, diminuindo a possibilidade de favorecimento de ocorrência dos processos erosivos.

Assim, ficaram estabelecidas as seguintes relações para as amostras indeformadas submetidas aos ensaios de Perda de massa por imersão e Infiltrabilidade:

- Amostras Indeformadas na condição de Umidade Natural: Valores de ‘pi’ e ‘s’ menores, quando comparadas com as mesmas amostras em condição de umidade higroscópica;
- Amostras Indeformadas na condição de Umidade Higroscópica: Valores de ‘pi’ e ‘s’ maiores, quando comparadas com as mesmas amostras em condição de umidade natural;

O cálculo da erodibilidade pelo método MCT evidenciou que 83,3% das amostras são classificadas como erodíveis ou tendencialmente erodíveis, são elas P7A1-N, P7A2-N, P22A1-N, P22A2-N, P24A1-N, P7A1-H, P7A2-H, P22A1-H, P22A2-H, P24A1-H. As amostras P24A2 não apresentaram resultados indicativos de solos erodíveis, motivo pelo qual são responsáveis pelo percentual de 16,7% de solos não erodíveis identificados na campanha amostral.

Foi identificado um comportamento de menor erodibilidade para os solos ensaiados em condição de umidade higroscópica (não saturados), evidenciando uma tendência de que a sucção atua como uma tensão que tende a estabilizar os solos. Este comportamento pode ser explicado pelo cálculo da erodibilidade MCT, uma vez que conforme maior for o valor do coeficiente de sorção, maior deverá ser o valor de ‘pi’ para que um solo seja classificado como erodível.

As amostras ensaiadas na condição de umidade higroscópica apresentaram, conforme esperado, curva de infiltração com inclinação mais intensa, devido às forças de sucção que agem nas amostras. Além disso, as amostras apresentam tempo de estabilização mais curtos, quando comparadas às mesmas amostras na umidade natural. Na prática, isso pode significar que em campo, quando no período de seca começam a ocorrer as primeiras chuvas, o solo tenderá a infiltrar mais rapidamente a água, diminuindo o tempo de escoamento superficial, diminuindo a possibilidade de favorecimento de ocorrência dos processos erosivos.

Como resultado dos produtos cartográficos elaborados, conjuntamente com as observações realizadas durante o trabalho de campo, foi possível chegar às seguintes conclusões:

As formações geológicas que constituem a BCD de Batalha são constituídas, principalmente, por coberturas detrito-lateríticas ferruginosas, rochas inconsolidadas correspondentes a depósitos aluvionares e especialmente filitos carbonosos da Formação Landim, que foram gerados a partir da exposição á intempéries, dando origem no local a fenômenos de empastilhamento. O empastilhamento faz com que os substratos apresentem

comportamento frágil, tornando boa parte da área muito suscetível a deflagração de processos erosivos.

A altimetria da BCD merece destaque pois, embora ocorra o predomínio de relevos planos e suave ondulados, estes ocorrem na parte central sudoeste, e são afetados pelas regiões do entorno que possuem altitude média de 877 m, com amplitude altimétrica de 212 m. Ocorrem também nas regiões do entorno a presença de relevos ondulados, forte ondulados e montanhosos que convergem os fluxos para o reservatório. Na planície central do Rio São Marcos, região sudoeste da BCD, próxima ao reservatório, é comum ocorrer a variação do nível do reservatório em decorrência de eventos pluviométricos mais intensos, podendo suceder inundações sazonais e favorecer erosões das bordas imediatas.

Ao comparar a declividade com a altimetria, é possível correlacionar os relevos mais planos às altitudes mais baixas, mais próximas ao reservatório, e os locais mais elevados observados se encontram associados aos relevos fortemente ondulados e montanhosos.

Nas regiões de relevos suave ondulado a ondulado, onde há domínio de colinas amplas e suaves, é observada a ocorrência de solos do tipo Cambissolo, que são constituídos por material mineral com horizonte B incipiente e pouco desenvolvidos. Tais regiões apresentam condições desfavoráveis ao uso agrícola, por causa das limitações do terreno que se configura como pedregoso. Em áreas com maiores altitudes, em relevos planos, de planaltos e chapadas, há a ocorrência expressiva de solos do tipo Latossolo, usualmente utilizados para fins agrícolas, sobretudo por serem bem desenvolvidos, profundos e bem drenados.

O uso do solo da BCD de Batalha indica que aproximadamente 50% está direcionado a agricultura e a pecuária (cerca de 39 e 11%, respectivamente) evidenciando possíveis conflitos no interesse de preservação dos biomas naturais. O uso de cerca de 11% do solo como área de pastagem pode favorecer a deflagração de erosões por pisoteamento de animais. Foi identificado que apenas 18% da BCD encontra-se com a vegetação nativa, não antropizada. O mapa de dissecação revelou que boa parte das áreas da BCD encontram-se predominantemente com nível de dissecação moderada a forte, indicando que estas áreas se encontram com fragilidade ambiental.

Os fatores deflagradores e condicionantes dos processos erosivos foram estudados e identificados durante o trabalho de campo. Foram conceituados os fatores deflagradores como sendo aqueles que atuam no solo provocando o gatilho essencial que conseqüentemente iniciará o processo erosivo. Por conseguinte, o fator condicionante atua como complementar ao fator

deflagrador, oportunizando meios que favoreçam o início e a evolução dos processos erosivos. Deste modo, embora a visita de campo reforce o conceito encontrado na maioria das literaturas, que estabelece que a água é o principal agente deflagrador, foi identificado também que outros agentes atuam fortemente na BCD Batalha provocando gatilhos que desencadeiam processos erosivos. Os mais preponderantes, além da água, foram a ação humana e o pisoteio de animais. Para os fatores condicionantes, durante o trabalho de campo foram identificados diversos, sendo influenciados pelas propriedades do solo (saturação, infiltração, resistência), pela cobertura vegetal, pela forma com que ocorre o escoamento superficial e pelo uso e ocupação do solo e a atuação antrópica.

A Suscetibilidade às Erosões Laminares e Lineares foi identificada e associada diretamente a propriedades do solo, a ocorrência de fatores como alterações antrópicas, e a declividades acentuadas. A condição ‘muito suscetível’ a ocorrência de erosões laminares predomina na maior parte da BCD, principalmente na região central.

Com relação a Suscetibilidade às Erosões Lineares foi identificado que a maior parte da BCD está submetida a condição ‘Moderadamente suscetível a erosões lineares’, sendo que não foram identificadas classes do tipo ‘Não Suscetível a erosão linear’ em razão dos mapas de Dissecação e de Modificações antrópicas indicarem grau elevado de antropização e potencial de fragilidade ambiental.

No geral, foi constatado que na BCD de Batalha ocorrem diversos processos erosivos de amplo grau caracterizando-se, na maioria dos casos, como voçorocas, e que estão dispostos ao longo de todo o curso do Rio São Marcos. Tais ocorrências estão relacionadas diretamente à formação geológica (Filito carbonoso e o processo de empastilhamento), às declividades que convergem para a planícies do Rio São Marcos, onde se localiza o reservatório e, preponderantemente, ao uso e ocupação do solo, principalmente pela ação antrópica que atua no desmatamento dos biomas nativos pra realização da agricultura e da pecuária.

## **5.1. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

Sugere-se para pesquisas futuras a ampliação da metodologia presente neste trabalho, de modo que sejam realizadas mais incursões a campo, bem como mais e diferentes tipos de ensaios laboratoriais, aplicando teorias distintas e comparando-as.

Sugere-se avaliar a erodibilidade das amostras variando a umidade para teores diferentes dos que foram apresentados no presente trabalho.

Sugere-se que seja estudada a influência da sucção em uma campanha amostral mais representativa.

Sugere-se que seja avaliada e comparada a erodibilidade de solos distintos, como por exemplo Cambissolos com Latossolos.

Sugere-se utilizar ferramentas de Inteligência Artificial para geração e análises de mapas em Sistemas de Informação Geográficas e compará-los com mapas gerados a partir da utilização de outras ferramentas.

Devido ao diagnóstico executado durante a presente a pesquisa que aponta números elevados de processos erosivos em estado avançado (voçorocas de grandes escalas), sugere-se que seja implantado um rigoroso programa de monitoramento e controle das erosões cadastradas, bem como das áreas com elevado grau de suscetibilidade à erosões identificadas neste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO, *American Association of State Highway and Transportation Officials* (1973). Sistema de Classificação Rodoviário: *Highway Research Board-HRB*.
- ABNT, NBR 6502 (2022). Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 6502 (2022). Solos e rocha – Terminologia. 18p.
- ABNT, NBR 6457 (2016). Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 6457: Amostras de Solo- Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização. 9p.
- ABNT, NBR 16867 (2020). Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 16867: Determinação da massa específica aparente de amostras indeformadas – método da balança hidrostática. ABNT.
- ALMEIDA, G.R.; Romão, P.A.; Mascarenha, M.M.A.; Sales, M.M. (2015). Erodibilidade de solos tropicais não saturados nos municípios de Senador Canedo e Bonfinópolis (GO). São Paulo, UNESP, Geociências, v. 34, n. 3, p.441-451.
- DNER 256/94 (1994). Departamento Nacional de Estradas e Rodagens/DrDTc (IPR)-ME 256-94 Solos compactados com equipamento miniatura - determinação da perda de massa por imersão, 6p.
- DNER-ME 194/88. (1988). Departamento Nacional de Estradas e Rodagens. M-3-81P Ensaio de Sucção Capilar d'água e Permeabilidade, 13p.
- ALMEIDA, W.S.; Diniz, M.S.; Silva, L.S.; Silva Júnior, E.E.A.; Souza, N.M.; Farias, R.J.C.; Camapum de Carvalho, J. (2017). Vulnerabilidade e modelagem ambiental em bacias hidrográficas. In: SALES, Maurício Martines [*et al.*]. Erosão em borda de reservatório – Goiânia: Gráfica UFG. Cap.14. p287 a 322.
- ANDERSON, E.K., Arnold, R. W., Barfield, B. J. *et al.*, (1986) In: Matamoros Sevilla, T.M. Estudo de Processos Erosivos: Análise Geotécnico de Áreas Degradadas no Entorno do Reservatório de Batalha GO/MG. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2016. 134 p.
- AQUINO, R.F.; Silva, M.L.N; Freitas, D.A.F; Curi, N; Avanzi, J.C (2012). *Soil losses from typic cambisols and red latosol as related to three erosive rainfall patterns*. Revista Brasileira Ciências do Solo, v.37, p. 213-220.

- ARCAYA, S. G. CH. (2007). Avaliação dos fatores condicionantes dos processos erosivos no Distrito Federal. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-156/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 189p.
- ARNALDS, O., Thorarinsdottir, E.F., Metusalemsson, S., *et al.* (2001) In: Matamoros Sevilla, T.M. Estudo de Processos Erosivos: Análise Geotécnico de Áreas Degradadas no Entorno do Reservatório de Batalha GO/MG. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2016. 134p.
- BASTOS, C.A.B. (1999). Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados. Porto Alegre/RS. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 269p
- BASTOS, CAB; Gitirana Júnior, G.F.N.; Kühn, V.O. (2017). Solos não saturados e os processos erosivos. In: SALES, Maurício Martines [*et al.*]. Erosão em borda de reservatório – Goiânia: Gráfica UFG. Cap.5 p.91-120.
- CAIQ – Central Analítica do Instituto de Química da UnB (2022). Procedimento Operacional Padrão: Espectrômetro de Fluorescência de Raios X por Energia Dispersiva EDX-720 Shimadzu. Acessado em 10/05/2022. Disponível em: [https://caiq.unb.br/images/POPs/POP\\_EDX.pdf](https://caiq.unb.br/images/POPs/POP_EDX.pdf). 3p.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J., Sales, M.M., Souza, N.M. & Melo, M.T. da S. (2006). Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro. Brasília.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J.; Sales, M. M.; Santos jr., O.F.; Marot, D.D.; Campos, L. E. (2014) “Um paralelo quanto aos mecanismos de surgimento e evolução de erosões continentais, fluviais, de bordo de reservatório e costeiras”. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 17 (2014) Goiânia.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J.; Carvalho, J.T.C.; Arroyo, C.B.S.; Leuzinger, M.D. (2017). Aspectos legais relacionados à preservação ambiental das margens dos reservatórios. In: SALES, Maurício Martines. Erosão em borda de reservatório / Maurício Martines Sales. [*et al.*]. – Goiânia: Gráfica UFG, 2017. Cap. 1, p.01-34.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J; Lelis, A.C.; Sales, M.M.; Mascarenha, M.M.A.; Angelim, R.R.; Luz, M.P. (2016). Cartilha: Erosão em borda de reservatório. Goiânia, gráfica da UFG/EECA. 55p.

- CÂMARA G. (2005). Representação computacional de dados geográficos. In: CASANOVA, M. A. *et al.* Banco de dados geográficos. Curitiba: Mundogeo. 29p.
- CAMARGO, L.G.B.C (2005). O setor elétrico brasileiro e sua normatização contemporânea. Santos, Unisantos, Centro de Ciências Jurídicas e Sociais Aplicadas – Curso de Direito.
- CAPUTO, Homero Pinto (1988). Mecânica dos solos e suas aplicações. V1, 6º ed. Editora LTC.
- CARDOSO, F.B.F. (2002). Propriedades e Comportamento Mecânico de Solos do Planalto Central Brasileiro. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-009A/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 357p.
- CARVALHO, N. O.; Fliliziola junior, N.P.; Santos, P.M.C. & Lima, J.E.F.W. (2000). Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios. Brasília: ANEEL. 140p.
- CARVALHO, N. O. (1994). In: CARVALHO, N.O.; Fliliziola Junior, N.P.; Santos, P.M.C. & Lima, J.E.F.W. Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios. Brasília: ANEEL. 140p.
- COUTINHO, R. Q.; Camapum de Carvalho, J.; Coelho Netto, A. L. (2013) “Erosão hídrica e diretrizes para medidas de intervenção”. In: Parâmetros para a Cartografia Geotécnica e Diretrizes para Medidas de Intervenção de Áreas Sujeitas a Desastres Naturais – Coutinho, R. Q. *et al.* Convênio MCidades / GEGEP / UFPE (2013) Cap. 4, p.192-252.
- DAS, B. M. (2007). Fundamentos de Engenharia Geotécnica, Tradução da 6 edição norte-americana, All Tasks. São Paulo: 2007.
- ELETROBRÁS (1982). O setor de eletricidade no Brasil e a criação da Eletrobrás: Levantamento cronológico. LIVRO – Monografia. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 1982.
- EMBRAPA (2018). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos / Humberto Gonçalves dos Santos ... [*et al.*]. – 5. ed. – Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356p.
- EPE (2021). Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). Balanço Energético Nacional 2021: Ano base 2020. Rio de Janeiro. 268p.
- FÁCIO, J.A. (1991). Proposição de uma metodologia de estudo da erodibilidade dos solos do Distrito Federal. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UnB, Brasília, DF. 122p.
- FARIAS, W.M.; Rolim, J.A.; Camapum de Carvalho, J.; Boaventura, G.R.; Santos Neto, P.M. (2010). Proposição de Metodologia Para Granulômetro à Laser em Solos Tropicais.

- Cobramseg 2010: engenharia geotécnica para o desenvolvimento, inovação e sustentabilidade. ABMS. 6p.
- FELL, R. *et al* (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*, v. 102, n. 3–4, p. 85–98.
- FERNANDES, C. T. C.; Bursztyn, M.A.A. (2008) “Usos múltiplos das águas de reservatórios de grandes hidrelétricas: perspectivas e contradições ao desenvolvimento regional sustentável”. In: Encontro Nacional da Associação Nacional De Pós-Graduação e Pesquisa Em Ambiente E Sociedade, 4., 2008, Brasília, DF. Anais: ANPPAS, 2008.
- FORTES, R.M.; NOGAMI, J.S. (1991) – “Método Expedito de identificação do grupo MCT de Solos Tropicais, utilizando-se anéis de PVC Rígido.”. Anais da 25ª Reunião Anual de Pavimentação – São Paulo, v.1, p.591-604.
- FORTES, R.M. (1997) - "Método das Pastilhas para Identificação Expedita do Grupo MCT – Miniatura, Compactada, Tropical” – 1ª Câmara Permanente de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Mackenzie, São Paulo, Brasil.
- FURNAS, PCE, SPEC, AGRAR & BIODINÂMICA. (2005a). Relatório de Impacto Ambiental- RIMA AHE PAULISTAS. Governo Federal, MG/ GO.
- FURNAS, PCE, SPEC, AGRAR & BIODINÂMICA. (2005b). Estudo de Impacto Ambiental- EIA AHE Paulistas Vol. 1. Governo Federal, MG/ GO.
- FURNAS (2021a) Relatório Técnico P&D Sedimentos. 07/2021 (R7). Modelagem em Diversas Escalas da Geração de Sedimentos em Erosões e o Aporte em Reservatórios de UHEs TC 8000011107 ANEEL PD-0394-1705/2017. 78p.
- FURNAS (2021b) Relatório Inicial de Atividades (RI). Modelagem em Diversas Escalas da Geração de Sedimentos em Erosões e o Aporte em Reservatórios de UHEs. TC 8000011107 ANEEL PD-0394-1705/2017. 133p.
- GUERRA, A.J.; Antonio S.S.; Rosangela, G.M.B. (2007). Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações/ - 3 ed.- Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007. 340p.
- HADER, P. R. P. (2021). Metodologia para avaliação de perigo de movimentos de massa considerando fatores socionaturais. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Bauru. 173p.

- INDERBITZEN, A.L. (1961). An erosion test for soils. *Materials Research & Standards*, 1 (7), p. 553-554.
- JESUS, A.S. (2013). *Investigação Multidisciplinar de Processos Erosivos Lineares: Estudo de Caso da Cidade de Anápolis - GO*. Tese de Doutorado, Publicação G.TD - 087/2013, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 340 p.
- JESUS, A. S, O. F.; Sousa, M.S.; Nascimento, D. T. F.; Romão, P. A.; Camapum de Carvalho, J.; (2017). “A influência de aspectos geomorfológicos, de cobertura do solo e climáticos no surgimento e evolução de processos erosivos no entorno de reservatório”. In: SALES, Maurício Martines [*et al.*]. *Erosão em borda de reservatório – Goiânia: Gráfica UFG*, 2017. Cap 8 p.171-192.
- LEÃO, M. F. (2018). *Fundamentos da mecânica dos solos/Marcio Fernandes Leão*. Londrina: Edit. e Distribuidora Educacional S.A. 216p. ISBN 978-85-522-0754-2
- LIMA, M. C.; Almeida, J. G. R.; Medeiros, G. F.; Mortari, D.; Romão, P. A.; Mascarenha, M. M. A. M.; Camapum de Carvalho, J. (2017). “Sulcos, ravinas e voçorocas”. In: SALES, Maurício Martines [*et al.*]. *Erosão em borda de reservatório – Goiânia: UFG*, 2017. Cap 4, p.65-90.
- MAGUIRE, D. J. (1991) - An Overview and Definition of GIS. In *Geographical Information Systems, Principles and Applications* - D. J. Maguire, M. F. Goodchild and D. W. Rhind (edits), Longman Scientific & Technical, U.K. 649 p. (Volume 1).
- MATAMOROS SEVILLA, T. M. (2016). *Estudo de Processos Erosivos: Análise Geotécnica de Áreas Degradadas no Entorno do Reservatório de Batalha GO/MG*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UnB, Brasília, DF, 134 p.
- MUNSELL soil color charts (1994). New Windsor: Kollmorgen Instruments-Macbeth Division, 1994.
- NOGAMI, J.S. e VILLIBOR, D.F. (1980) - “Caracterização e Classificação Gerais de Solos para a Pavimentação: Limitações do Método Tradicional, Apresentação de uma nova Sistemática”, In: 15ª Reunião Anual de Pavimentação, Belo Horizonte, Brasil.
- NOGAMI, J.S. e VILLIBOR, D.F. (1981) - “Uma Nova Classificação para Finalidades Rodoviárias”, In: Simpósio brasileiro de solos tropicais em engenharia. COPPE/ABMS, Rio de Janeiro, Brasil, p.30-40.

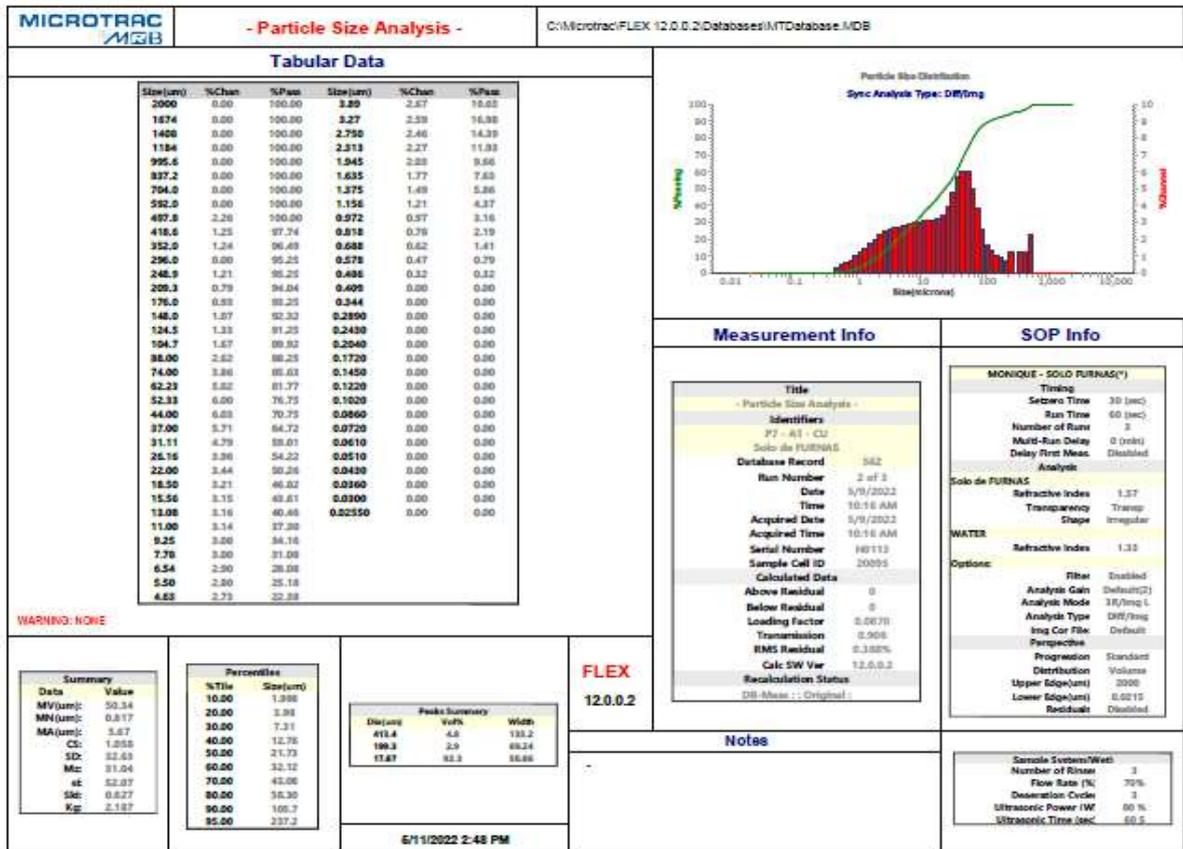
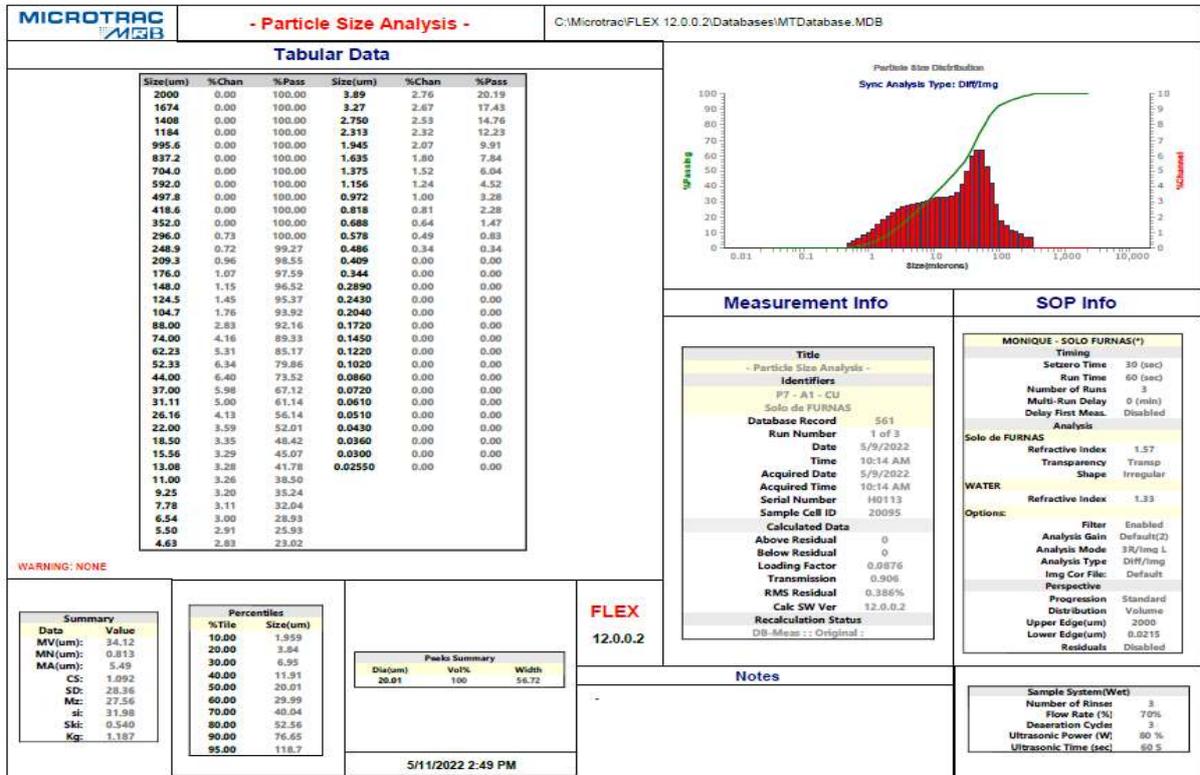
- NOGAMI, J.S. e VILLIBOR, D.F. (1985) -“*Additional Considerations about a New Geotechnical Classification for Tropical Soils*”, In: *First int. conference on geomechanics in tropical lateritic and saprolitic soils*, Brasília, Brasil. Anais...v1, p.165-174.
- NOGAMI, J.S. e VILLIBOR, D.F. (1995) - “Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos”. Parte 1. São Paulo: Villibor, Brasil. 213p.
- NOGAMI, J.S. & VILLIBOR, D.F. (1979). *Soil characterization of mapping units for highway purposes in a tropical area. Bull. Int. Assoc. Eng. Geol. - Bull. l'Association Int. Géologie l'Ingénieur*, 19(1): 196–199.
- PAIXÃO, M.N.N., e CAMAPUM DE CARVALHO, J. (1994). Influência da microestrutura no colapso de um solo de Brasília. 2º Simpósio sobre solos não saturados. ABMS/UFPE, Recife, PE, 105-110.
- PASTORE, E.L. e FONTES, R.M. (1998). Caracterização e classificação de solos. In: *Geologia de engenharia - ABGE*. Cap. 12 p197 a 210.
- PAULISTA, V. S. T.; Nascimento, D. T. F.; Romão, P. A.; Luz, M. P. (2021). Mapeamento da ocorrência de processos erosivos e da predisposição do relevo à suscetibilidade erosiva em bordas de reservatórios de usinas hidrelétricas. In: *Planejamento e Desenvolvimento Sustentável em Bacias Hidrográficas, Coletânea I. – Goiânia : C&A Alfa, UFG*. p 779-790.
- PINTO, C. S. (2006). *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas/ 3a edição*. Carlos Souza Pinto. São Paulo: Oficina de Texto, 2006.
- ROMÃO, P. A. SOUZA, N. M. de (2017). “Aspectos geológicos e hidrogeológicos na deflagração e evolução da erosão hídrica em margens de reservatórios”. In: SALES, Maurício Martines [*et al.*]. *Erosão em borda de reservatório – Goiânia: Gráfica UFG*, 2017. Cap 7, p.153-170.
- SALES, M. M.; Santos, E. C. G.; Angelim, R. R.; Palmeira, E. M. (2017). “Prevenção e controle de processos erosivos de borda de reservatório”. In: SALES, Maurício Martines [*et al.*]. *Erosão em borda de reservatório – Goiânia: Gráfica UFG*, 2017. Cap. 21, p.489-507.
- SANTOS, R. M. M. (1997). *Caracterização geotécnica e análise do processo evolutivo das erosões no município de Goiânia. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, FT, UnB, Brasília, DF*. 185p.

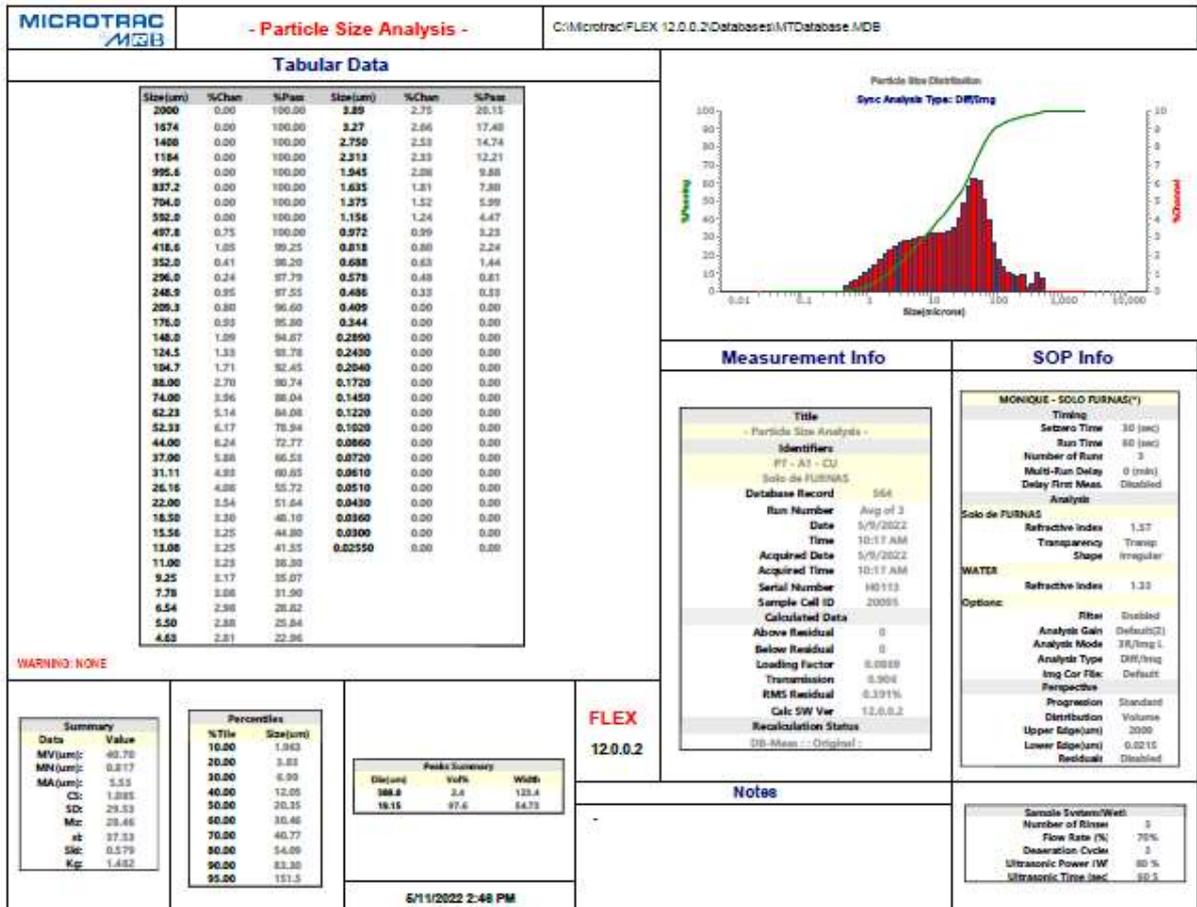
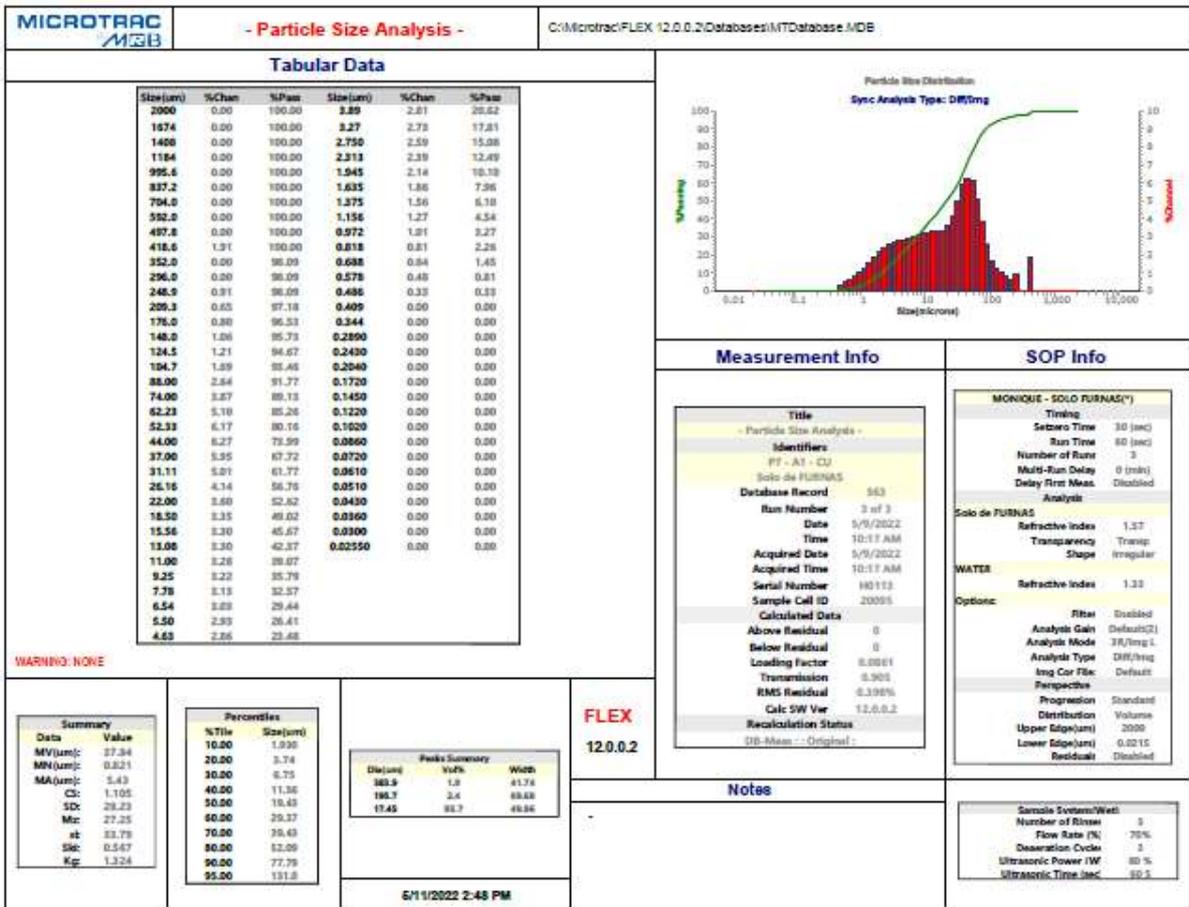
- SANTOS JR, O. F.; Freitas Neto, O.; Camapum de Carvalho, J.; *et al.* (2017). “Erosão continental, costeira e de bordas de reservatórios”. In: SALES, Maurício Martines [*et al.*]. Erosão em borda de reservatório – Goiânia: Gráfica UFG, 2017. Cap 16 p.345-367.
- SALOMÃO, F. X. T. e ANTUNES F. S. (1998). Solos. In.: Geologia de Engenharia, Oliveira S. A. & Brito S. A. (eds.), Associação Brasileira de Geologia de Engenharia - ABGE, São Paulo, Brasil. Cap. 6, pp. 87-99.
- SALOMÃO, F. X. T; CANIL, K; RODRIGUES, S.P. (2012). Exemplo de aplicação da geologia de engenharia no controle preventivo e corretivo dos processos erosivos. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, V.2 N. 02.
- SILVA, A. M.; Silva, M.L.N; Curi, N.; Avanzi, J.C; Ferreira, M.M. (2009). Erosividade da chuva e erodibilidade de cambissolo e latossolo na região de Lavras, sul de Minas Gerais. Revista Brasileira Ciências do Solo, v. 33, p. 1811- 1820, 2009
- SILVA, I.S.; Nascimento, D. T. F.; Romão, P. A.; Luz, M. P. (2021). Mapeamento e Caracterização dos Aspectos Físico-Ambientais das Áreas de Influência Direta dos Reservatórios das Usinas Hidrelétricas Batalha e Itumbiara. VIII Workshop Internacional Sobre Planejamento e Desenvolvimento Sustentável em Bacias Hidrográficas - Dinâmicas, Escalas e Processos: Novos e Velhos Desafios para o Século XX.
- SOETERS, R.; VAN WESTEN, C. J. Slope instability Recognition, analysis and zonation. Landslides: Investigation and Mitigation. Disponível em: <<https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr247/sr247-008.pdf>>49p.
- SONODA, K. C. L.; VIANA, T. C.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2017). “Erosão em borda de reservatório: alguns aspectos psicossociais”. In: SALES, Maurício Martines [*et al.*]. Erosão em borda de reservatório – Goiânia: Gráfica UFG, 2017. Cap 3, p.53-64.
- SOUZA, N. M. de; ROMÃO, P. A. (2017). “Cartografia geotécnica e a preservação ambiental das bordas dos reservatórios”. In: SALES, Maurício Martines [*et al.*]. Erosão em borda de reservatório – Goiânia: Gráfica UFG, 2017. Cap. 13, p.277-284.
- USGS. USA Geological Survey (2004). *Landslide Types and Processes*. Ficha informativa 2004-3072. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/fs-2004-3072.html>>
- ZACHAR, D. (1982). Soil Erosion. In: Matamoros Sevilla, T.M. Estudo de Processos Erosivos: Análise Geotécnica de Áreas Degradadas no Entorno do Reservatório de Batalha GO/MG. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2016. 134p.

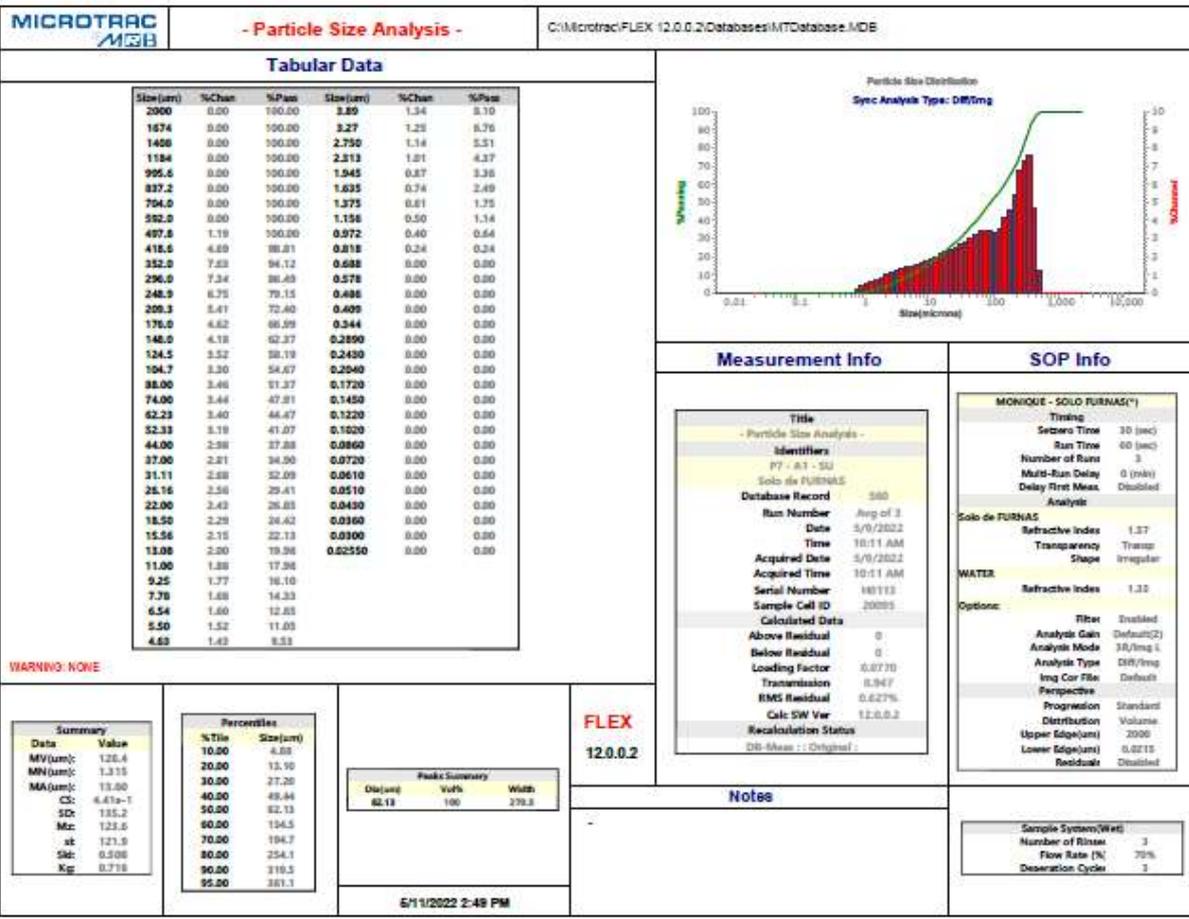
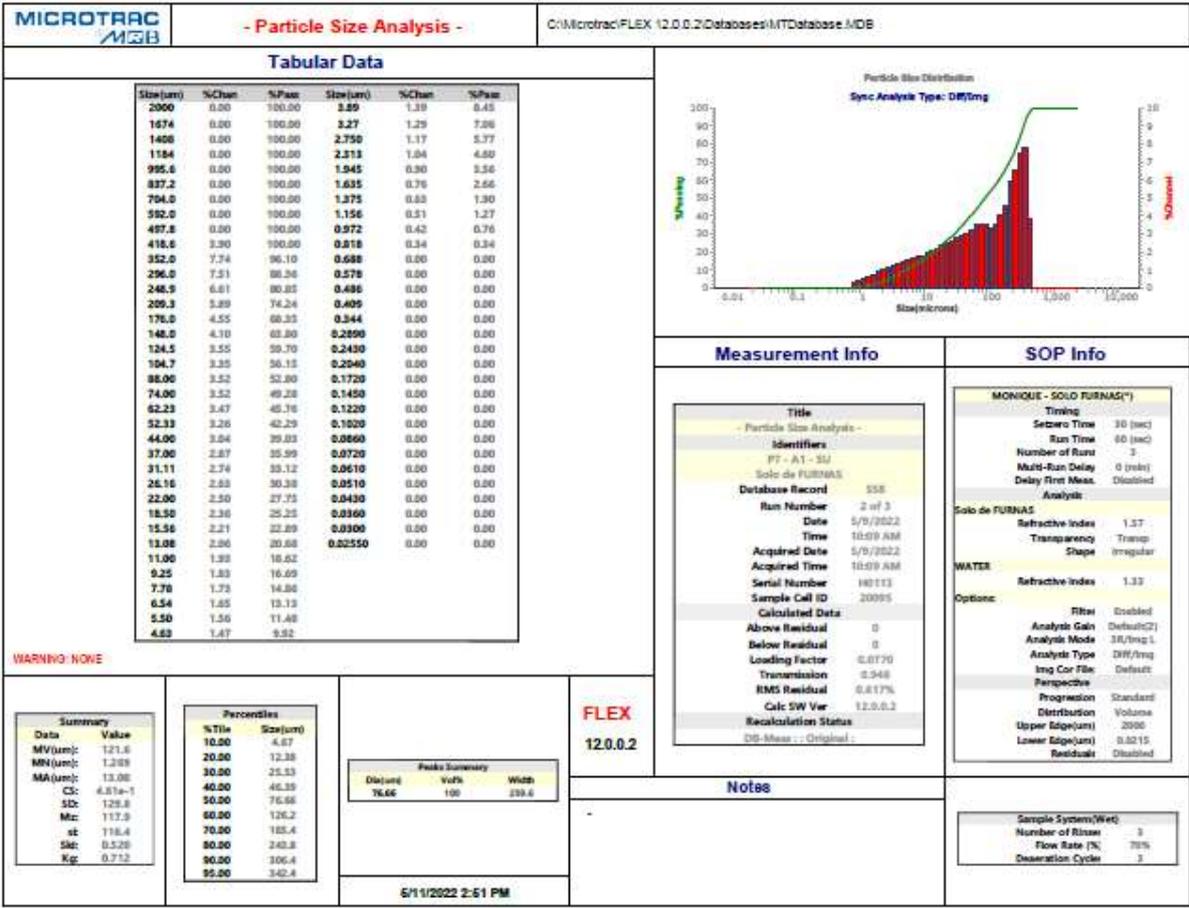
ZÊZERE, J. L. *et al.* (2005). Análise sensitiva na avaliação da susceptibilidade a deslizamentos na região norte de Lisboa. X Colóquio Ibérico de Geografia. Anais...Évora, Portugal. Disponível em:  
<[http://www.apgeo.pt/files/docs/CD\\_X\\_Coloquio\\_Iberico\\_Geografia/pdfs/075.pdf](http://www.apgeo.pt/files/docs/CD_X_Coloquio_Iberico_Geografia/pdfs/075.pdf)>

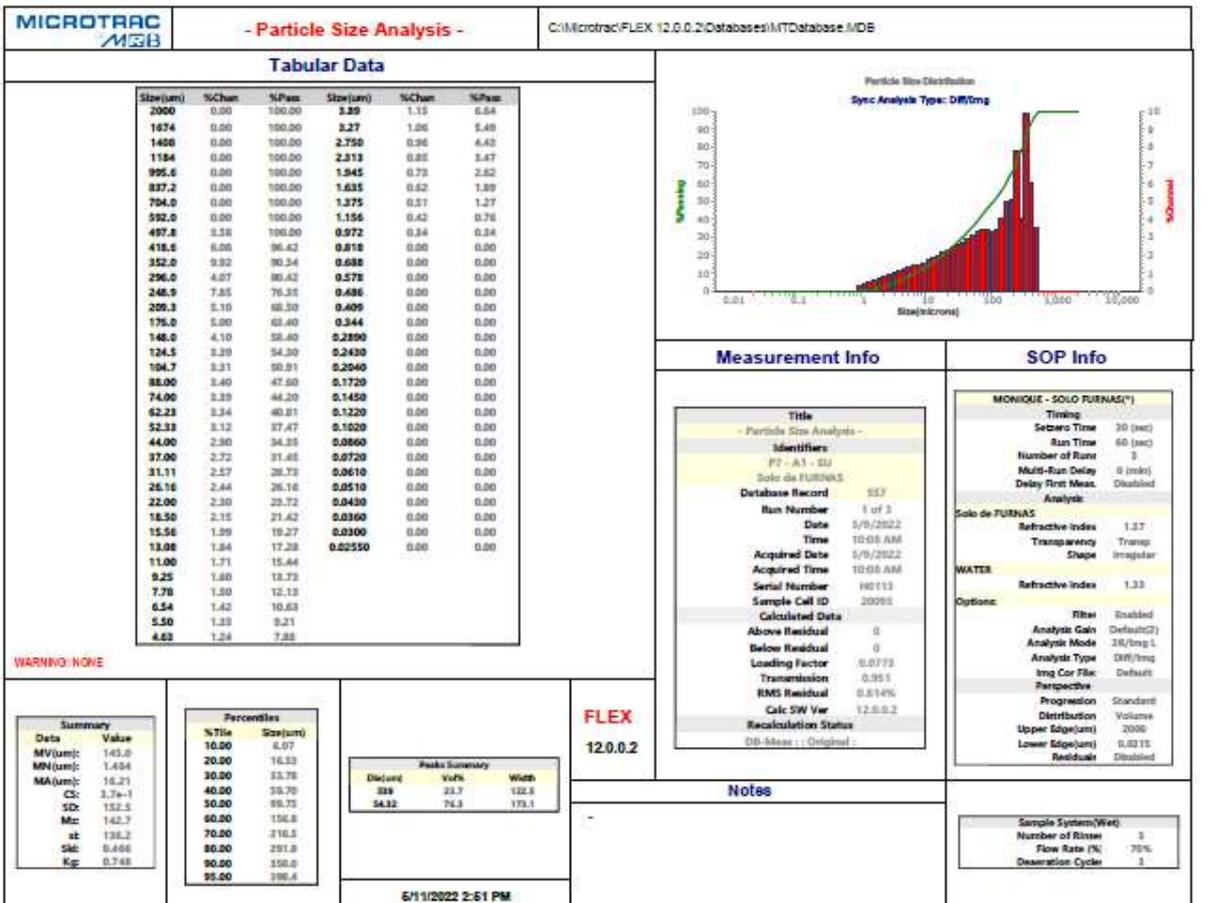
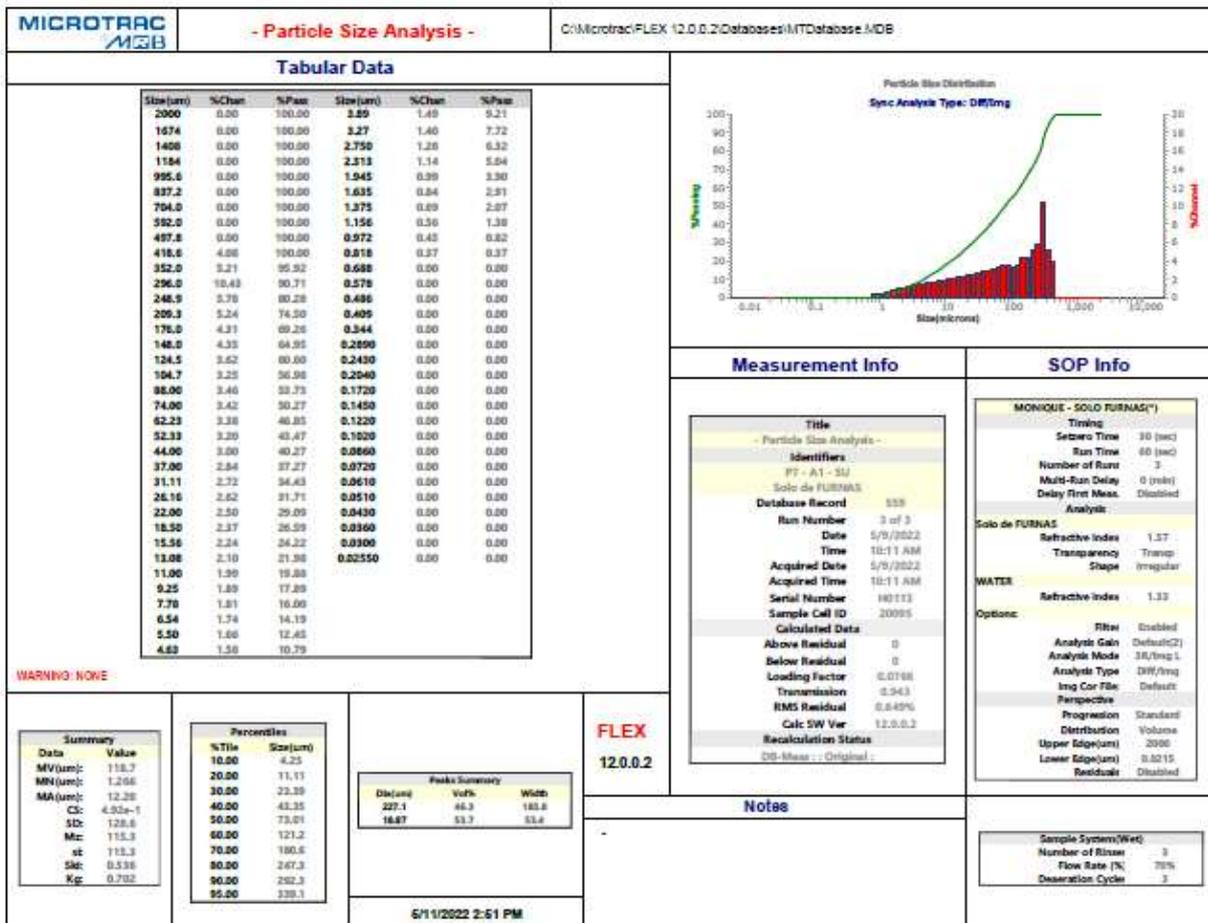
ZUQUETTE, L. V. (1993). Importância do mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meio físico: fundamentos e guia para elaboração. Livre Docência em Geotecnia - São Carlos: Universidade de São Paulo. 265p.

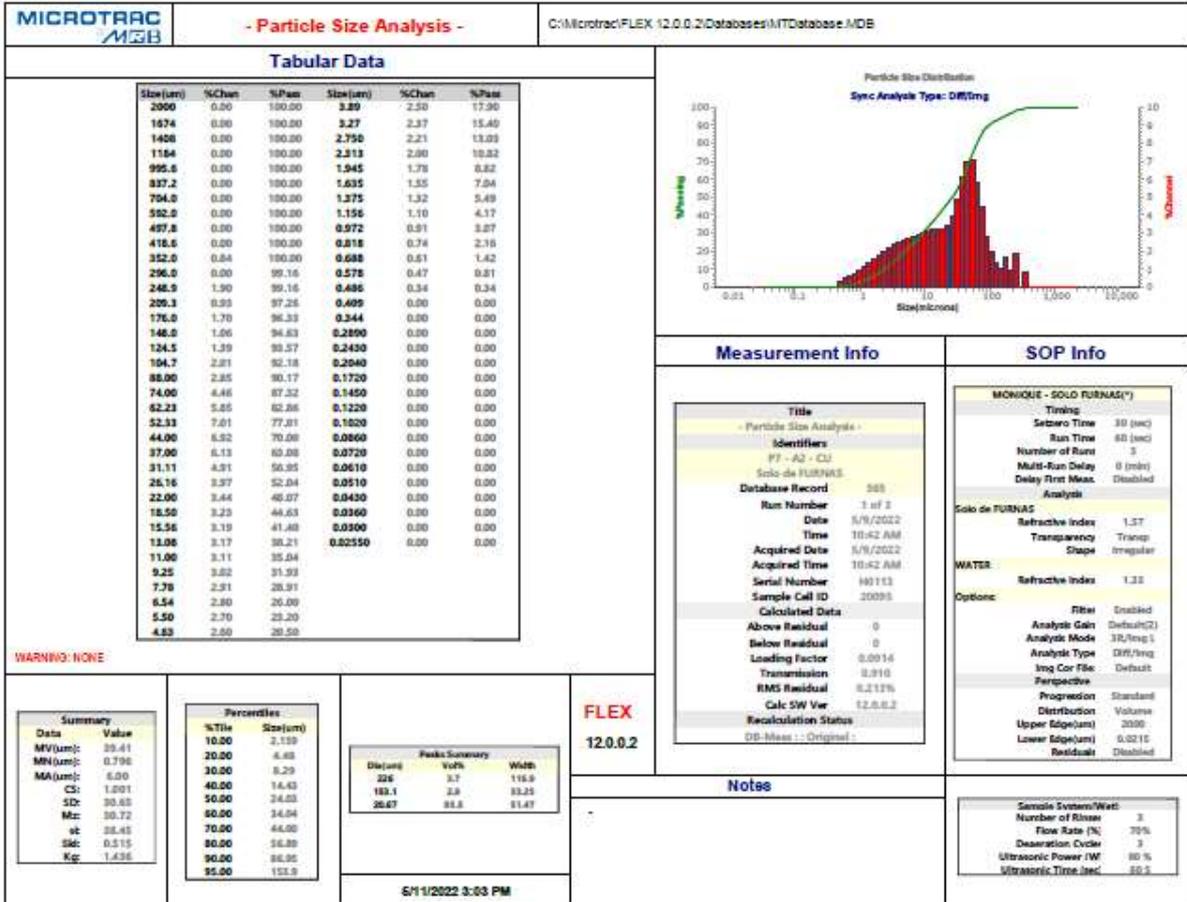
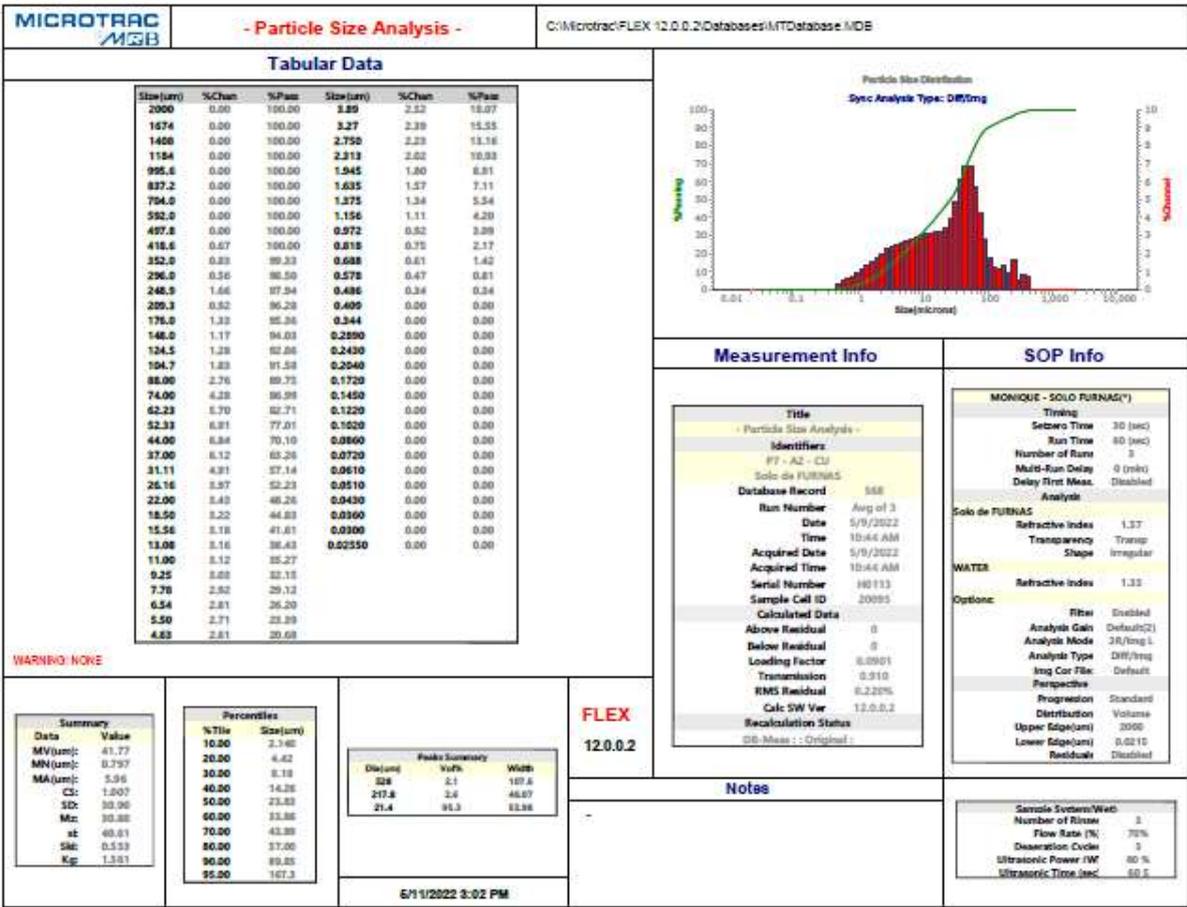
# ANEXO A: RELATÓRIO DOS ENSAIOS GRANULOMÉTRICOS UTILIZANDO O EQUIPAMENTO GRANULÔMETRO A LASER

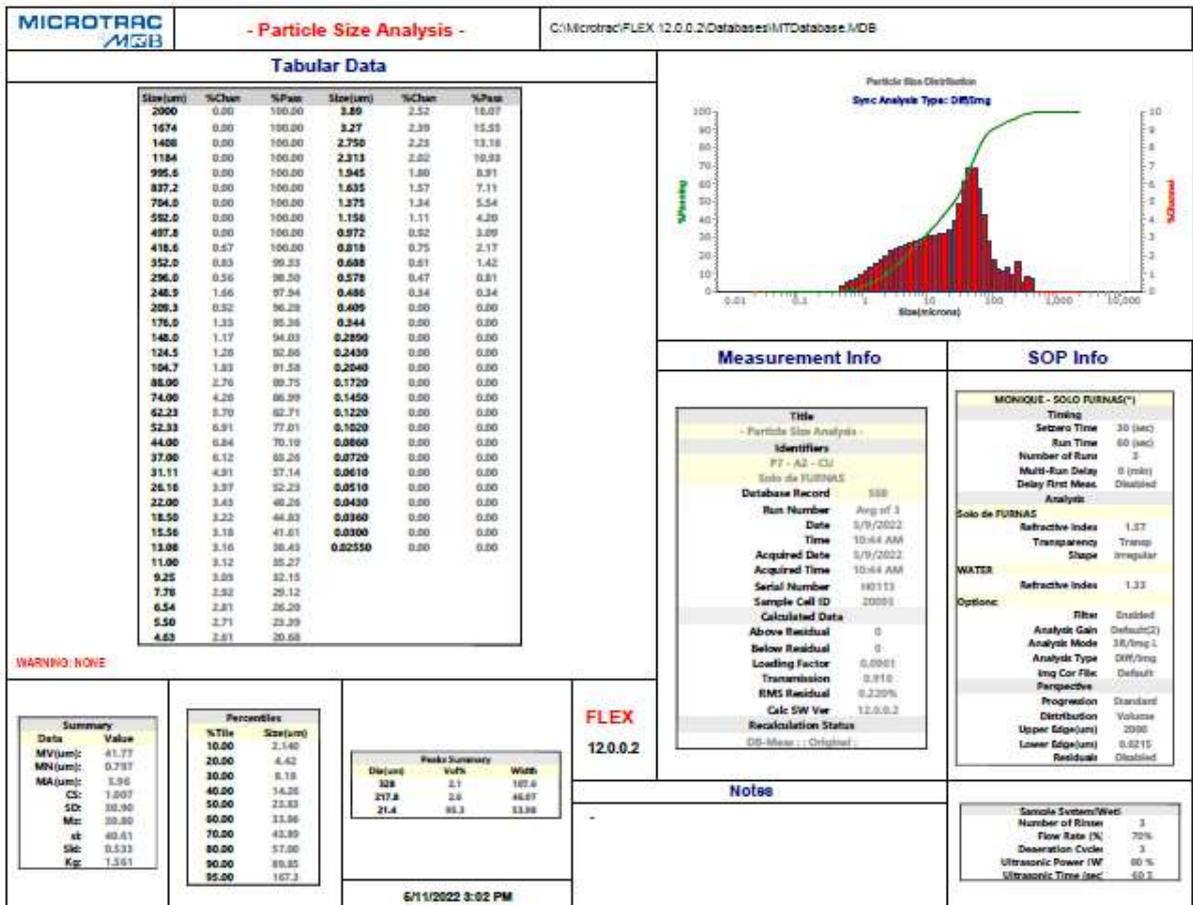
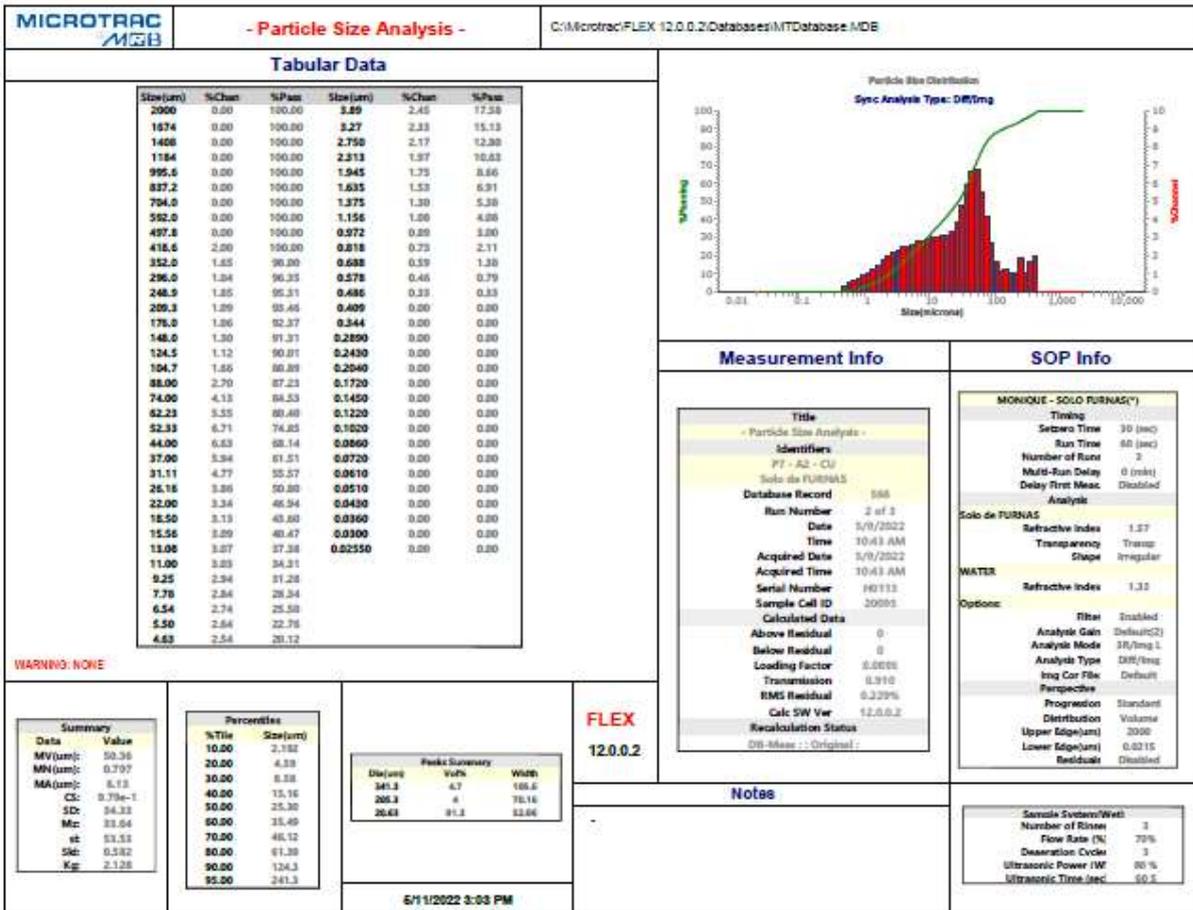


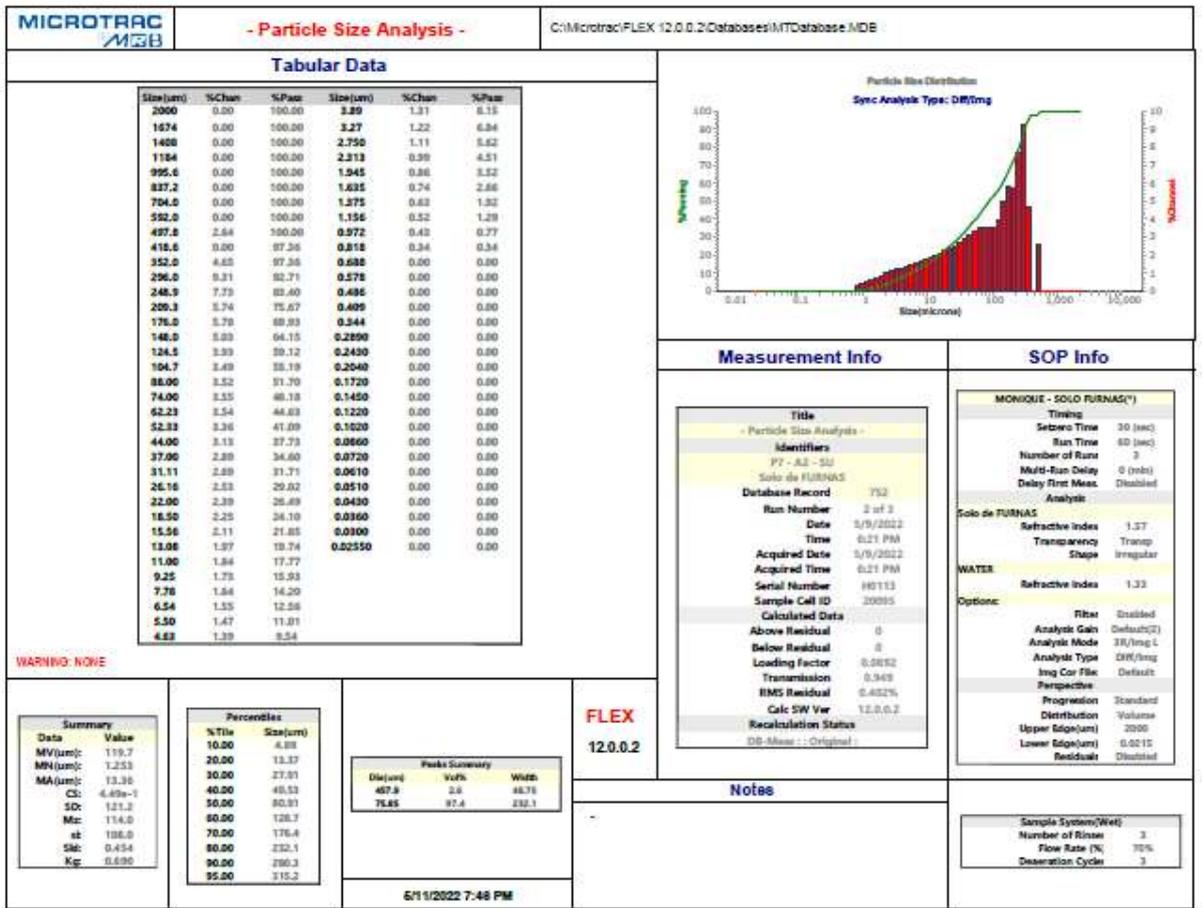
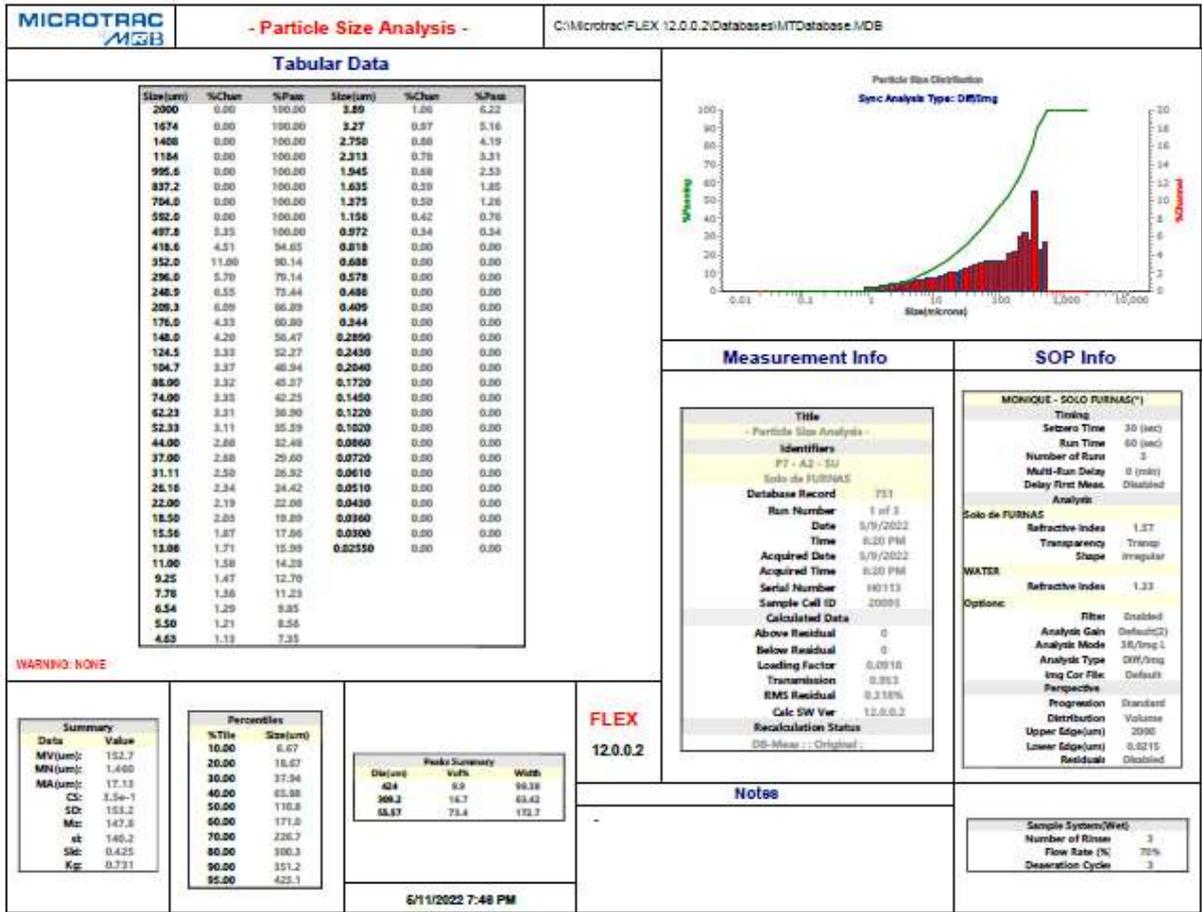


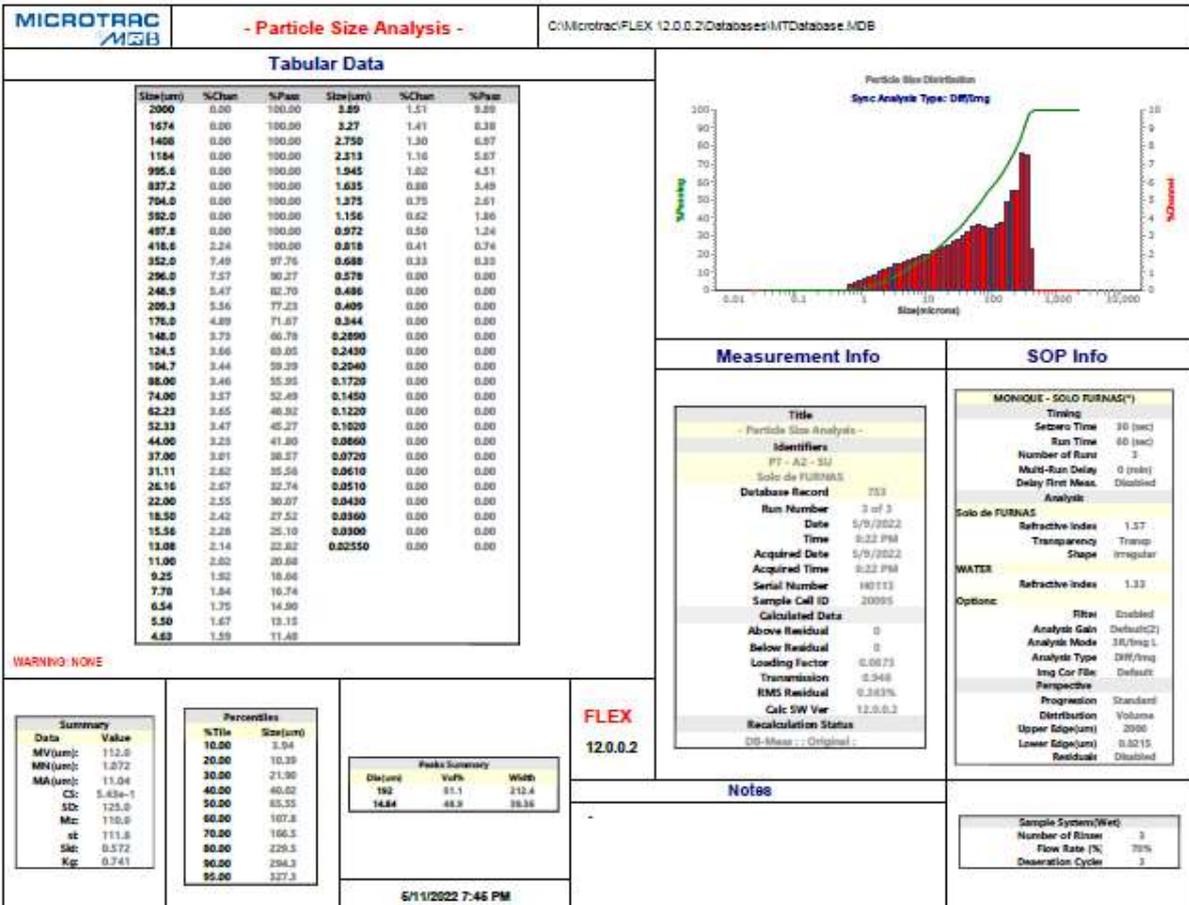
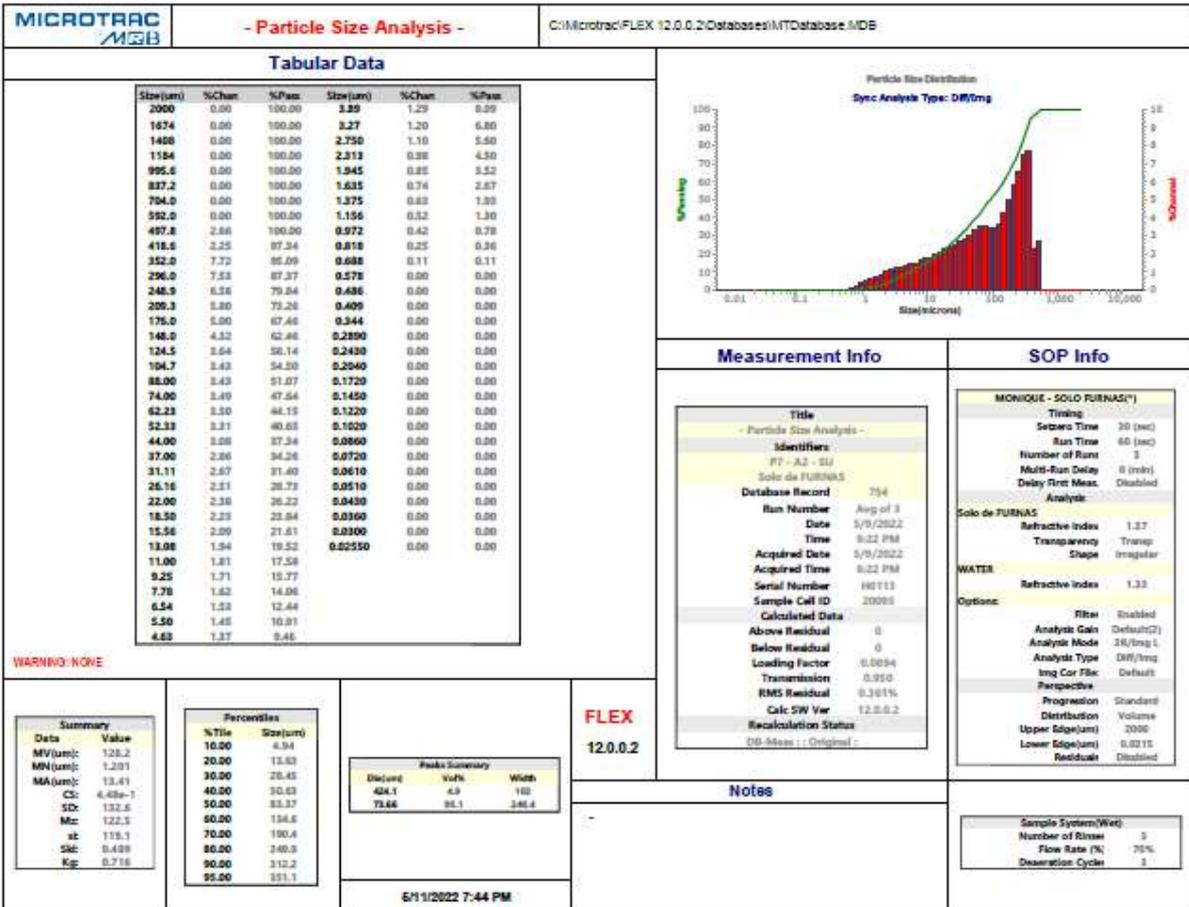


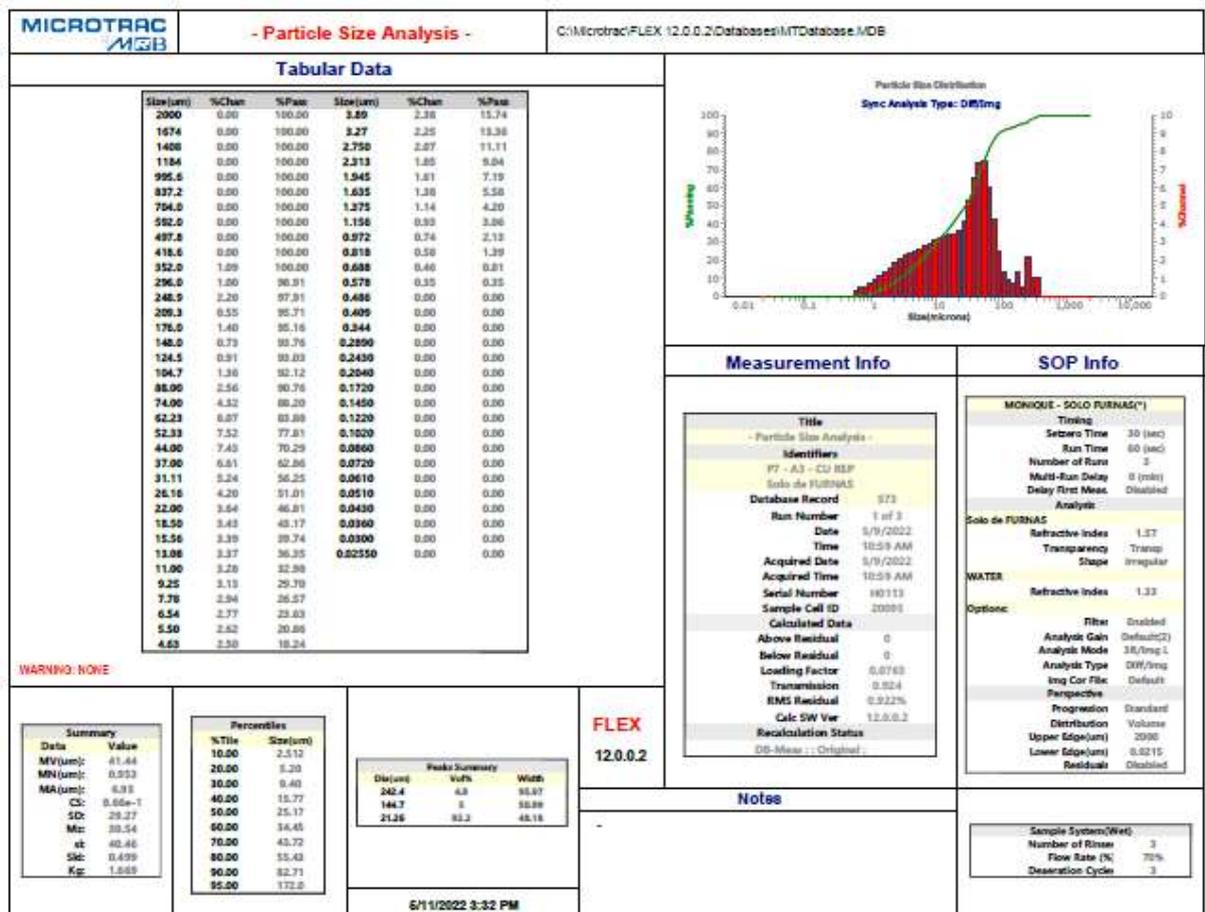
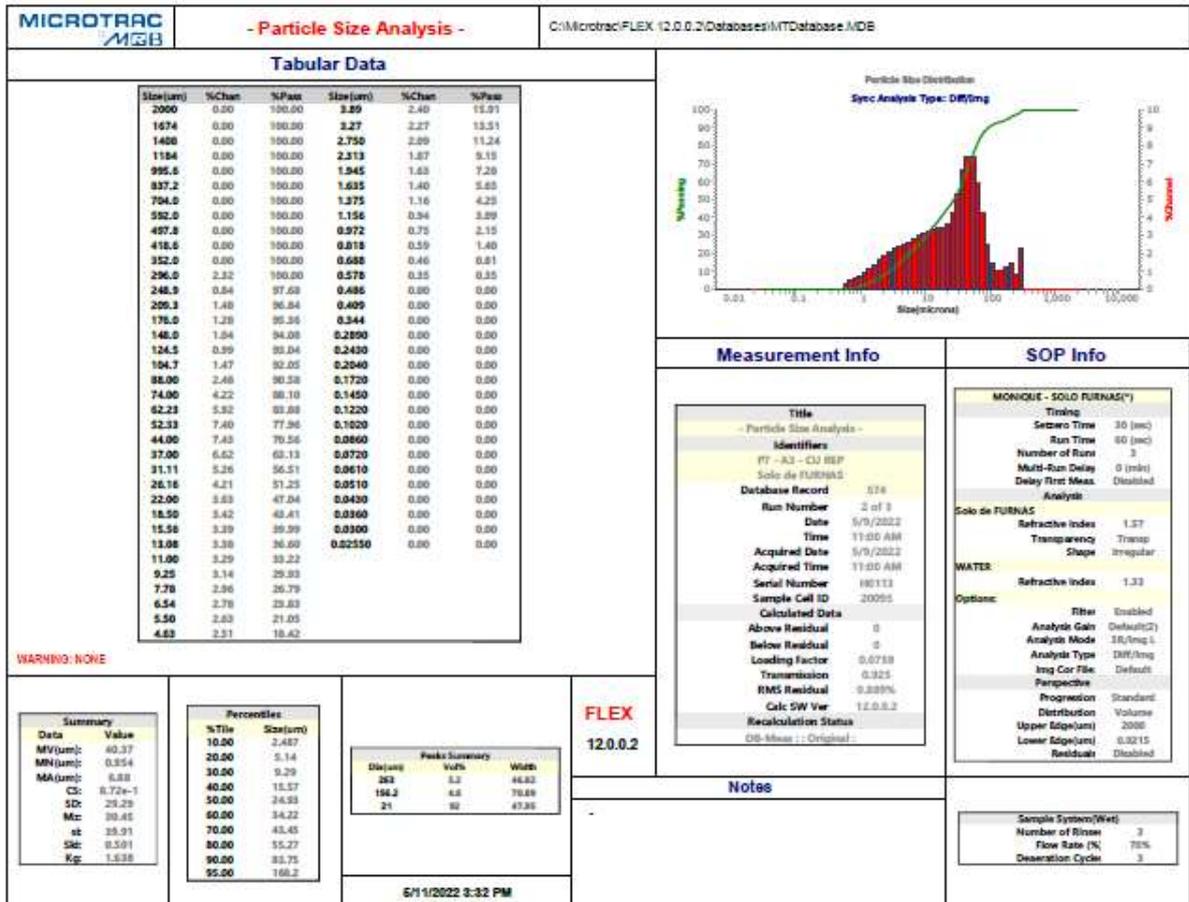


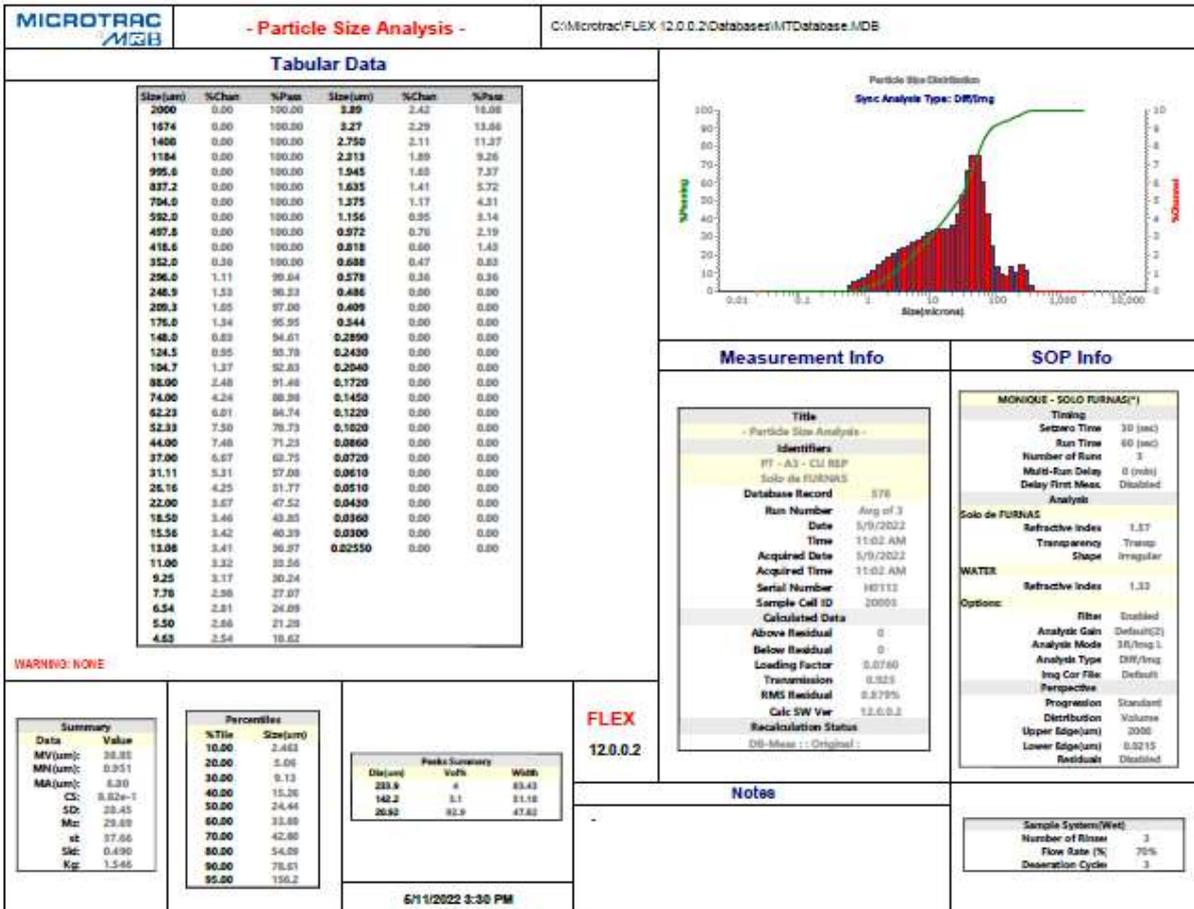
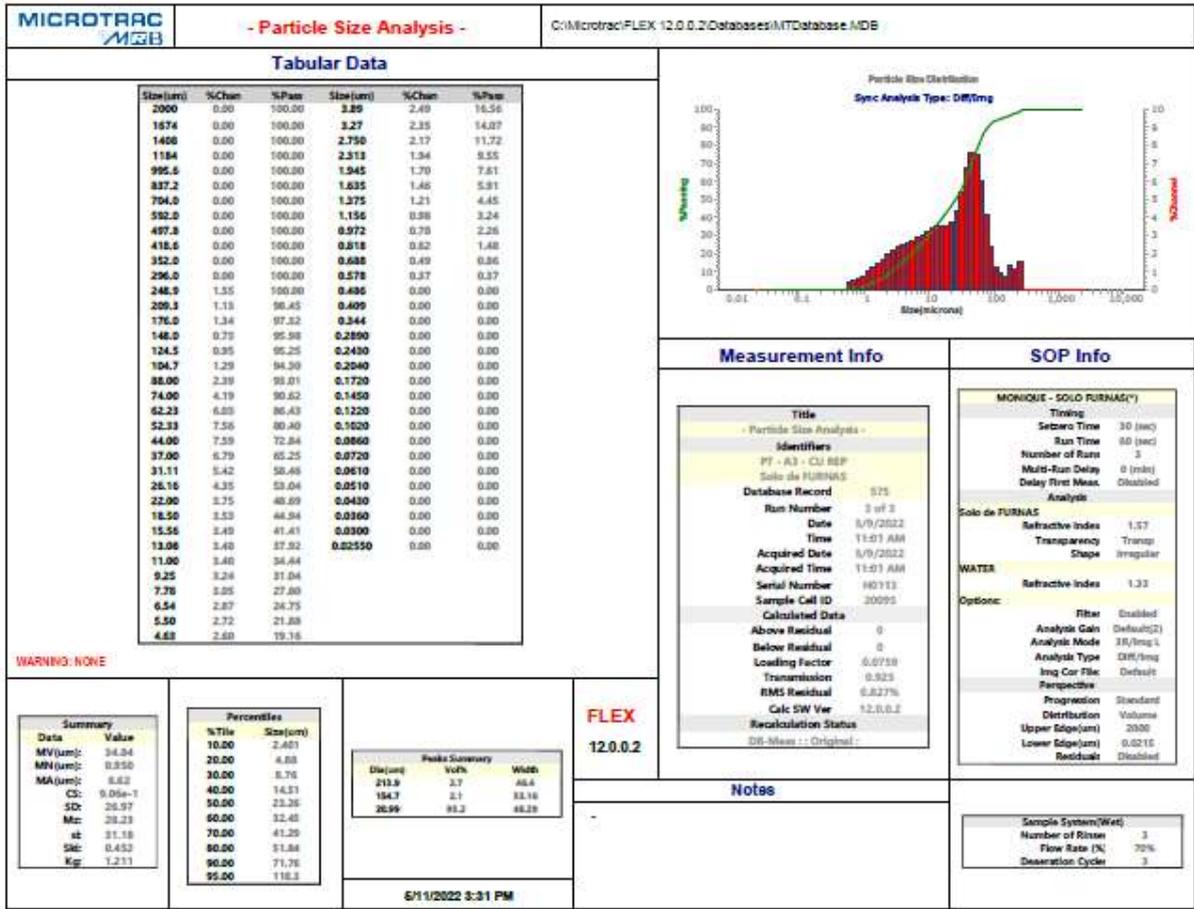


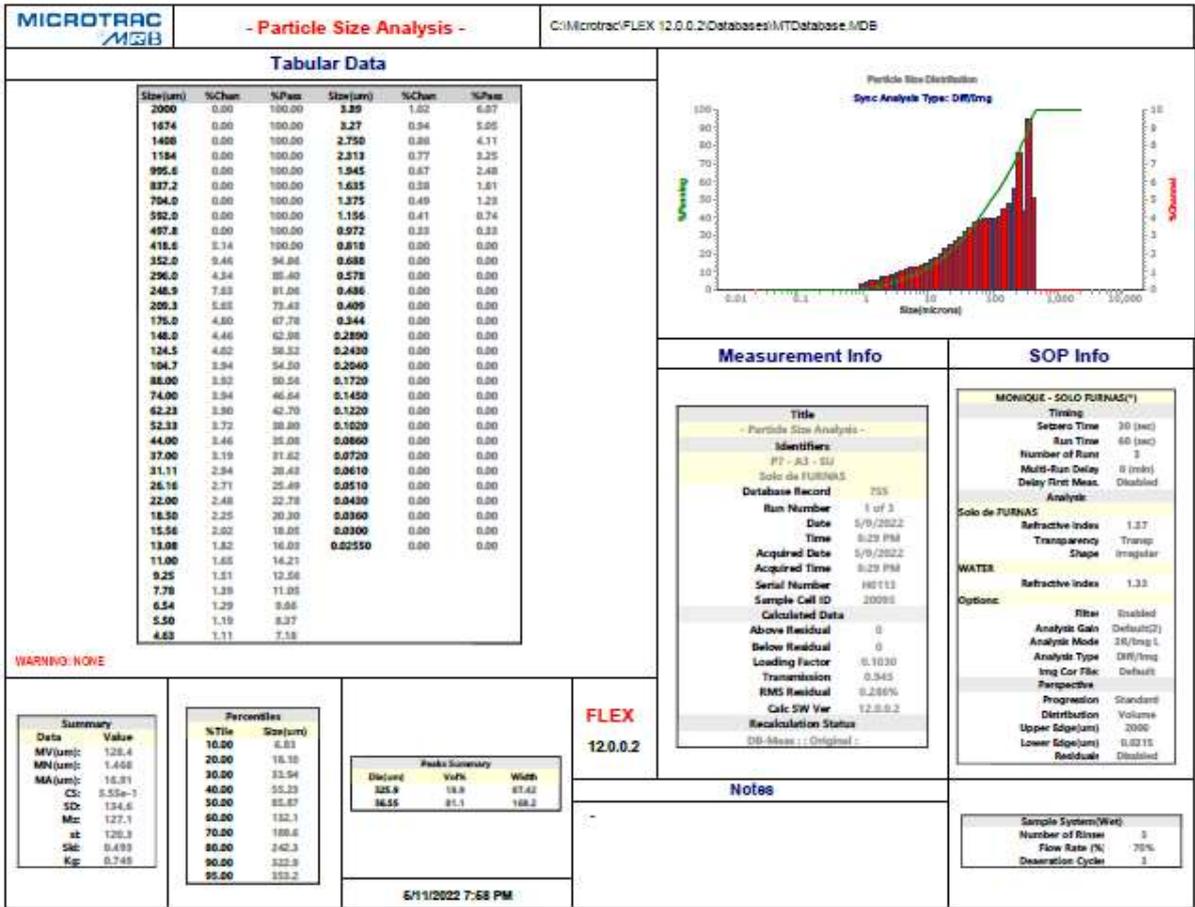
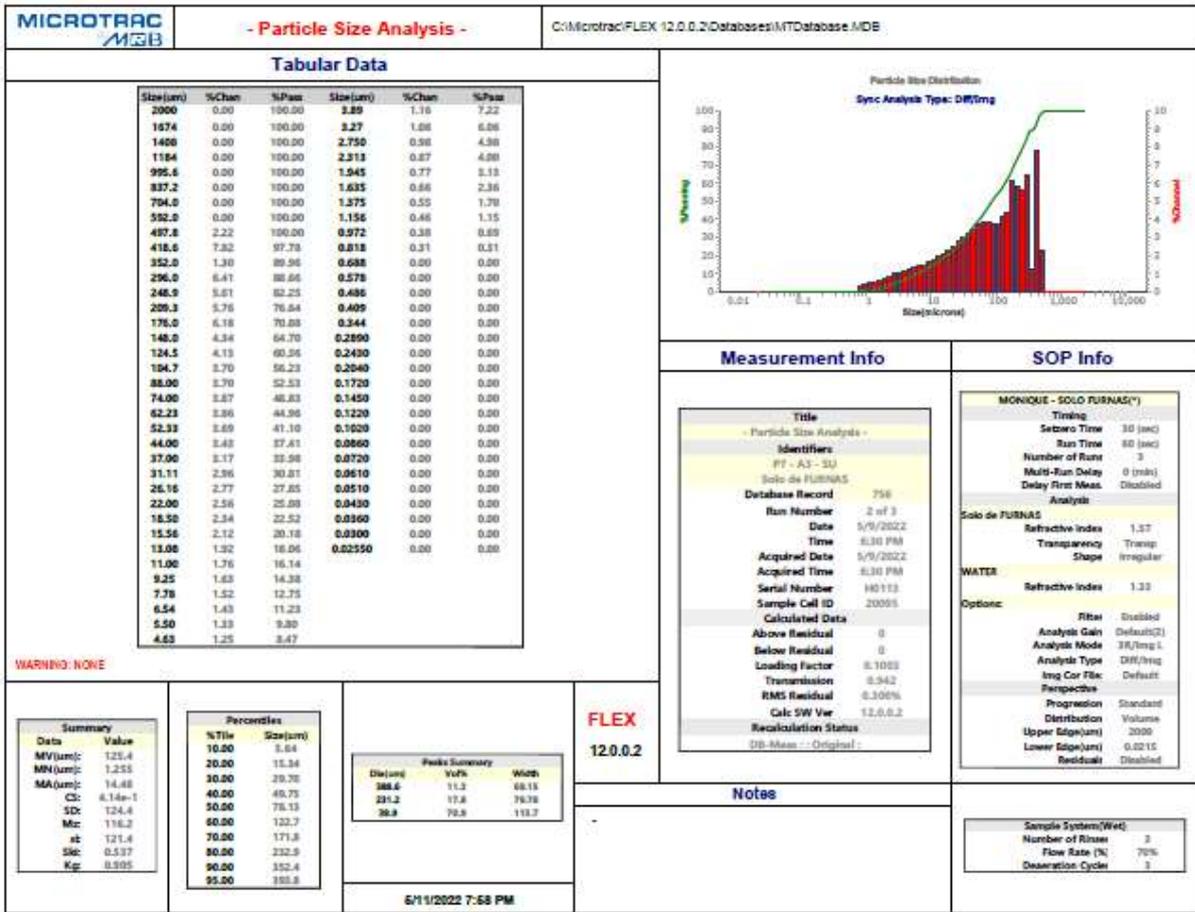


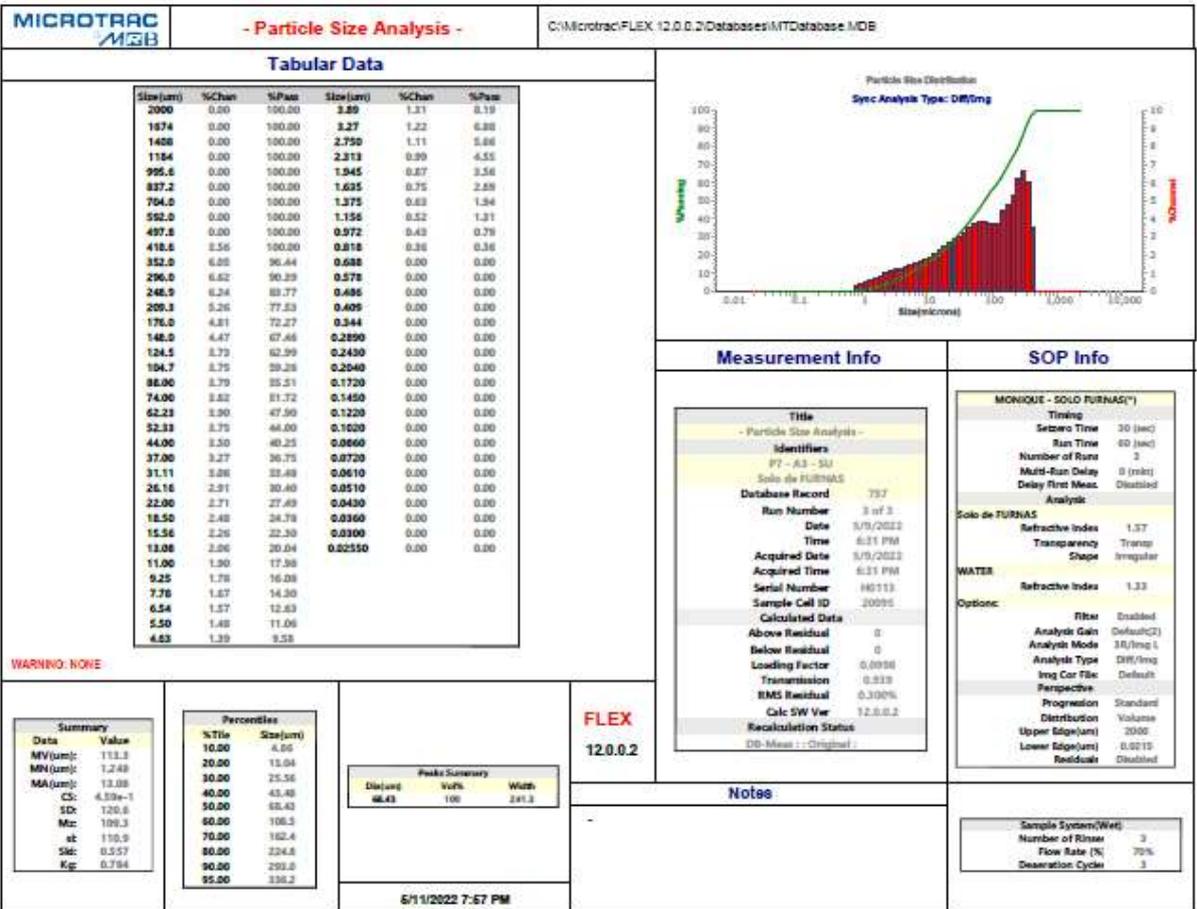
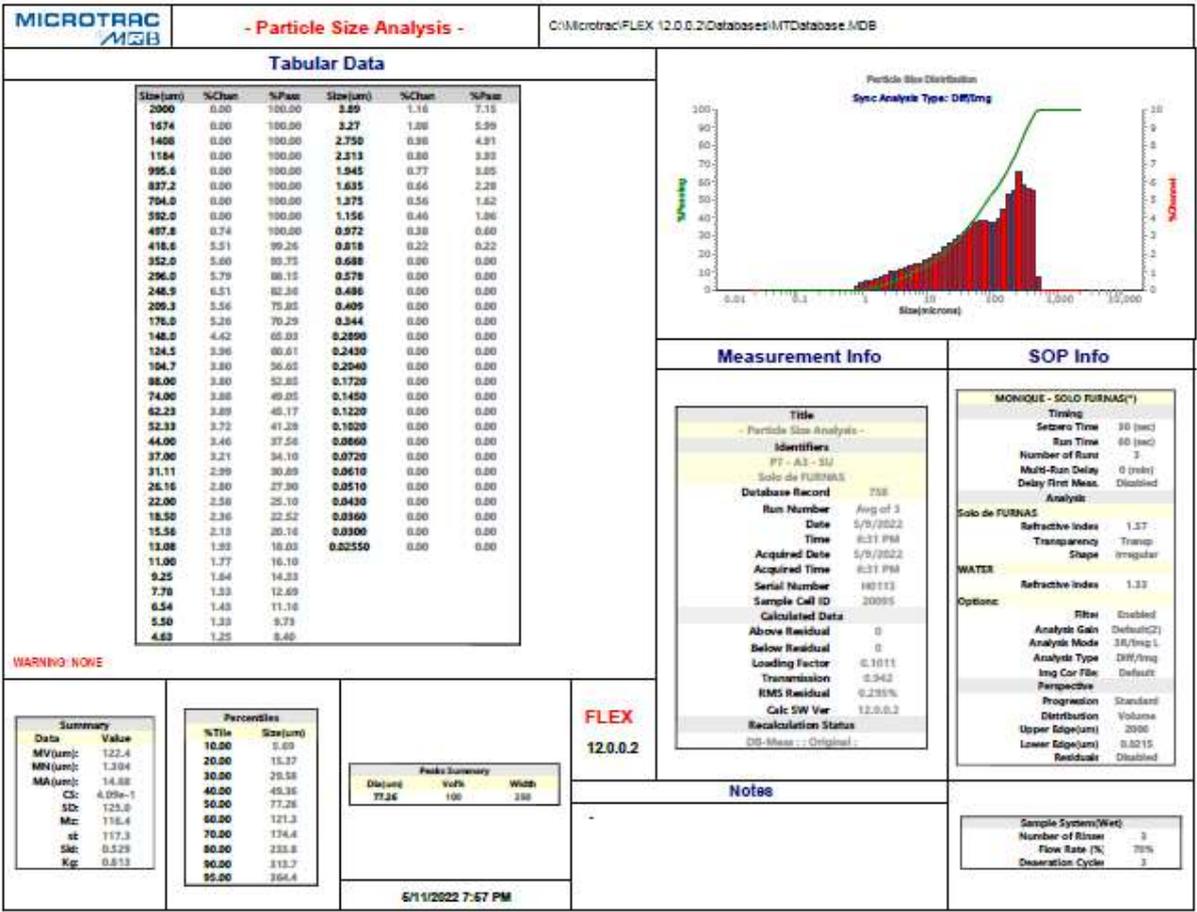


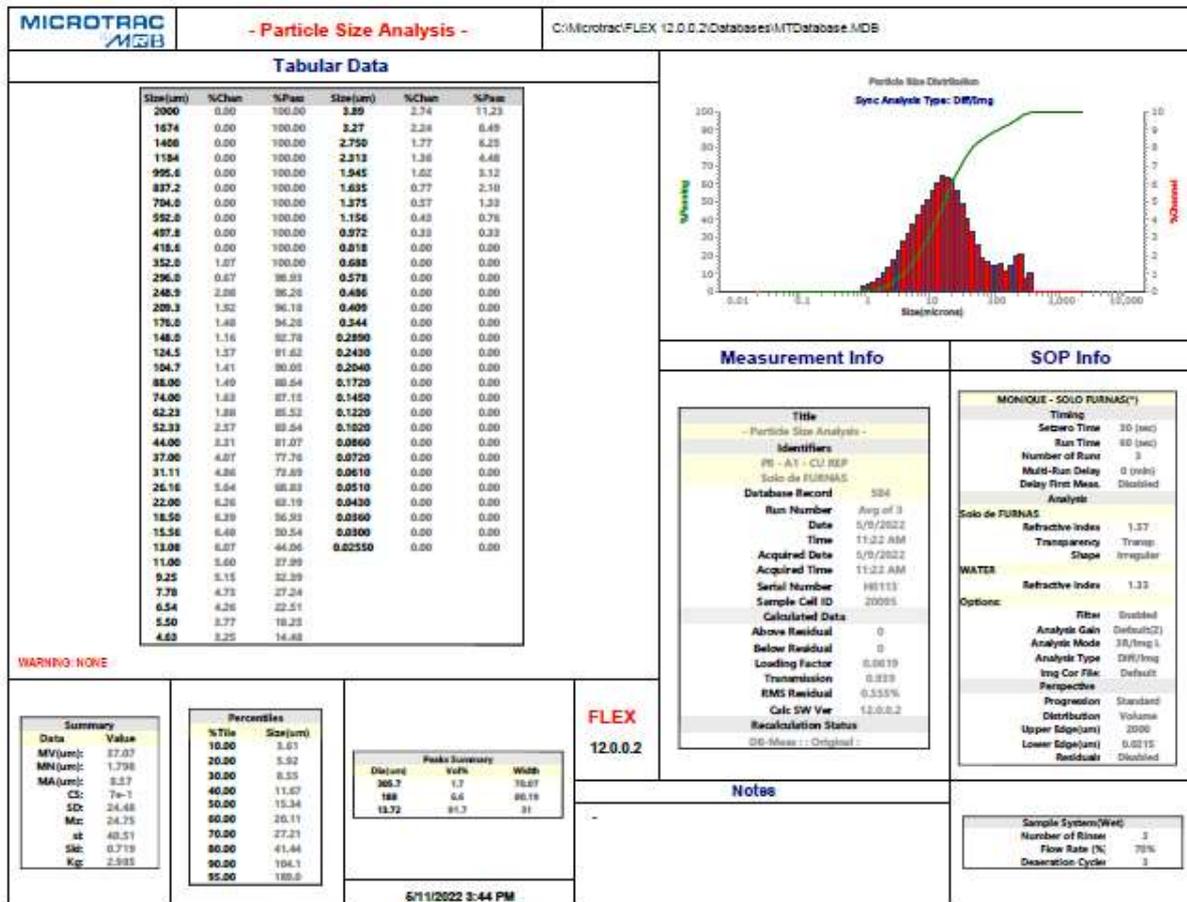
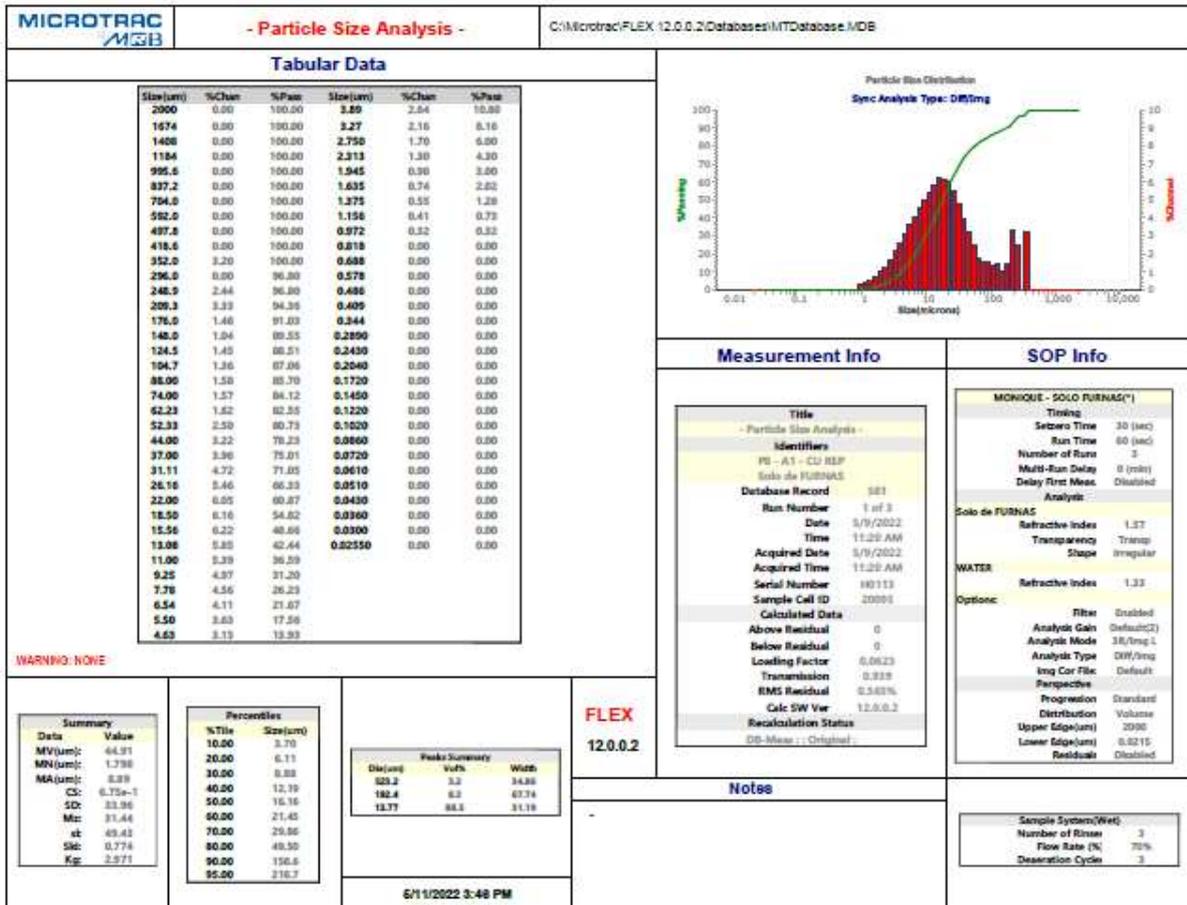












**MICROTRAC** **MGB** - Particle Size Analysis - C:\Microtrac\FLEX 12.0.0.2\Databases\MTDatabase.MDB

**Tabular Data**

Size(um)	%Chan	%Pass	Size(um)	%Chan	%Pass
2000	0.00	100.00	3.89	2.59	10.64
1674	0.00	100.00	3.27	2.11	8.05
1406	0.00	100.00	2.750	1.87	5.84
1184	0.00	100.00	2.313	1.28	4.27
995.6	0.00	100.00	1.945	0.87	2.99
837.2	0.00	100.00	1.635	0.73	2.62
704.0	0.00	100.00	1.375	0.55	1.29
592.0	0.00	100.00	1.156	0.42	0.74
497.8	0.00	100.00	0.972	0.32	0.32
418.6	0.00	100.00	0.818	0.00	0.00
352.0	2.26	100.00	0.688	0.00	0.00
296.0	1.37	97.54	0.578	0.00	0.00
248.0	2.44	96.27	0.498	0.00	0.00
209.3	2.91	94.13	0.409	0.00	0.00
176.0	1.32	91.22	0.344	0.00	0.00
148.0	1.28	89.90	0.2890	0.00	0.00
124.5	1.28	88.62	0.2430	0.00	0.00
104.7	1.58	87.54	0.2040	0.00	0.00
88.00	1.75	86.76	0.1720	0.00	0.00
74.00	1.79	84.01	0.1450	0.00	0.00
62.23	2.06	82.22	0.1220	0.00	0.00
52.33	2.66	80.16	0.1020	0.00	0.00
44.00	3.31	77.50	0.0860	0.00	0.00
37.00	4.01	74.19	0.0720	0.00	0.00
31.11	4.74	70.18	0.0610	0.00	0.00
26.16	5.45	65.64	0.0510	0.00	0.00
22.00	6.01	59.99	0.0430	0.00	0.00
18.50	6.16	53.59	0.0360	0.00	0.00
15.56	6.12	47.82	0.0300	0.00	0.00
13.06	5.74	41.70	0.02550	0.00	0.00
11.00	5.29	35.96			
9.25	4.88	30.67			
7.78	4.48	25.79			
6.54	4.04	21.31			
5.50	3.56	17.27			
4.63	3.07	13.71			

Particle Size Distribution  
Sync Analyze Type: DRI/Tmg

**Measurement Info**

**MONIQUE - SOLO FURNAS(\*)**

**Identifiers**

PE - A1 - CU

Solo de FURNAS

Database Record: 980

Run Number: Avg of 3

Date: 5/9/2022

Time: 11:17 AM

Acquired Date: 5/9/2022

Acquired Time: 11:17 AM

Serial Number: H0113

Sample Cell ID: 20095

Calculated Data

Above Residual: 0

Below Residual: 0

Loading Factor: 0.0089

Transmission: 0.930

RMS Residual: 0.035%

Calc SW Ver: 12.0.0.2

Recalculation Status: DB-Meas : Original

**SOP Info**

Timing

Setback Time: 30 (sec)

Run Time: 60 (sec)

Number of Runs: 3

Multi-Run Delay: 0 (min)

Delay First Meas: Disabled

Analysis

Solo de FURNAS

Refractive Index: 1.57

Transparency: 1

Shape: Irregular

WATER

Refractive Index: 1.33

Options:

Filter: Enabled

Analysis Gain: Default(2)

Analysis Mode: DR/Tmg L

Analysis Type: DRI/Tmg

Img Cor File: Default

Perspective: Standard

Progression: Standard

Distribution: Volume

Upper Edge(um): 2000

Lower Edge(um): 0.0215

Residual: Disabled

Sample System(Wet)

Number of Rinses: 3

Flow Rate (%): 70%

Desertion Cycle: 3

Ultrasonic Power (%): 80%

Ultrasonic Time (sec): 60.5

**Summary**

Data Value

MV(um): 44.70

MN(um): 1.787

MA(um): 6.59

CS: 6.67e-1

SD: 34.37

Mc: 31.89

st: 30.38

Sk: 0.771

Kg: 2.886

**Percentiles**

%Tile	Size(um)
10.00	3.73
20.00	6.19
30.00	6.04
40.00	12.49
50.00	16.54
60.00	22.01
70.00	30.00
80.00	51.74
90.00	150.4
95.00	221.1

**Peak Summary**

Dia(um)	Vol%	Width
304.4	3.4	68.89
185	6.2	94.8
13.65	87.4	36.82

FLEX 12.0.0.2

6/1/2022 3:28 PM

**Notes**

**MICROTRAC** **MGB** - Particle Size Analysis - C:\Microtrac\FLEX 12.0.0.2\Databases\MTDatabase.MDB

**Tabular Data**

Size(um)	%Chan	%Pass	Size(um)	%Chan	%Pass
2000	0.00	100.00	3.89	2.85	11.68
1674	0.00	100.00	3.27	2.33	8.83
1406	0.00	100.00	2.750	1.84	6.50
1184	0.00	100.00	2.313	1.61	4.66
995.6	0.00	100.00	1.945	1.06	3.25
837.2	0.00	100.00	1.635	0.80	2.19
704.0	0.00	100.00	1.375	0.60	1.39
592.0	0.00	100.00	1.156	0.45	0.79
497.8	0.00	100.00	0.972	0.34	0.34
418.6	0.00	100.00	0.818	0.00	0.00
352.0	0.00	100.00	0.688	0.00	0.00
296.0	0.00	100.00	0.578	0.00	0.00
248.0	2.64	100.00	0.498	0.00	0.00
209.3	0.00	97.36	0.409	0.00	0.00
176.0	1.09	97.36	0.344	0.00	0.00
148.0	1.46	96.27	0.2890	0.00	0.00
124.5	1.67	94.81	0.2430	0.00	0.00
104.7	1.80	93.14	0.2040	0.00	0.00
88.00	1.39	91.54	0.1720	0.00	0.00
74.00	1.67	90.15	0.1450	0.00	0.00
62.23	1.94	88.49	0.1220	0.00	0.00
52.33	2.64	86.54	0.1020	0.00	0.00
44.00	3.40	83.90	0.0860	0.00	0.00
37.00	4.18	80.50	0.0720	0.00	0.00
31.11	5.00	76.22	0.0610	0.00	0.00
26.16	5.81	71.32	0.0510	0.00	0.00
22.00	6.46	65.51	0.0430	0.00	0.00
18.50	6.83	59.05	0.0360	0.00	0.00
15.56	6.89	52.42	0.0300	0.00	0.00
13.06	6.30	45.73	0.02550	0.00	0.00
11.00	5.81	39.43			
9.25	5.34	33.62			
7.78	4.90	28.28			
6.54	4.42	23.39			
5.50	3.91	18.96			
4.63	3.27	15.05			

Particle Size Distribution  
Sync Analyze Type: DRI/Tmg

**Measurement Info**

**MONIQUE - SOLO FURNAS(\*)**

**Identifiers**

PE - A1 - CU REP

Solo de FURNAS

Database Record: 983

Run Number: 3 of 3

Date: 5/9/2022

Time: 11:22 AM

Acquired Date: 5/9/2022

Acquired Time: 11:22 AM

Serial Number: H0113

Sample Cell ID: 20095

Calculated Data

Above Residual: 0

Below Residual: 0

Loading Factor: 0.0117

Transmission: 0.939

RMS Residual: 0.347%

Calc SW Ver: 12.0.0.2

Recalculation Status: DB-Meas : Original

**SOP Info**

Timing

Setback Time: 30 (sec)

Run Time: 60 (sec)

Number of Runs: 3

Multi-Run Delay: 0 (min)

Delay First Meas: Disabled

Analysis

Solo de FURNAS

Refractive Index: 1.57

Transparency: 1

Shape: Irregular

WATER

Refractive Index: 1.33

Options:

Filter: Enabled

Analysis Gain: Default(2)

Analysis Mode: DR/Tmg L

Analysis Type: DRI/Tmg

Img Cor File: Default

Perspective: Standard

Progression: Standard

Distribution: Volume

Upper Edge(um): 2000

Lower Edge(um): 0.0215

Residual: Disabled

Sample System(Wet)

Number of Rinses: 3

Flow Rate (%): 70%

Desertion Cycle: 3

**Summary**

Data Value

MV(um): 29.86

MN(um): 1.797

MA(um): 6.27

CS: 7.25e-1

SD: 19.72

Mc: 31.24

st: 39.78

Sk: 0.654

Kg: 2.253

**Percentiles**

%Tile	Size(um)
10.00	3.33
20.00	6.74
30.00	6.24
40.00	11.81
50.00	14.62
60.00	18.07
70.00	25.10
80.00	36.19
90.00	72.79
95.00	127.2

**Peak Summary**

Dia(um)	Vol%	Width
228.4	2.6	24.73
111.3	7.3	61.33
12.86	88.3	25.88

FLEX 12.0.0.2

6/1/2022 3:45 PM

**Notes**

## ANEXO B: RELATÓRIO DOS ENSAIOS DE ESPECTRÔMETRO DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X POR ENERGIA DISPERSIVA (XRF/EDX)

AMOSTRA		P7A1			
METAL	(%)	Std.Dev.	Proc.-Calc.	Line	Int.(cps/uA)
Al	35,414	0,105	Quan FP	AlKa	3
Fe	32,162	0,03	Quan FP	FeKa	187
Si	23,712	0,062	Quan FP	SiKa	3
K	4,978	0,019	Quan FP	K Ka	2
Ti	2,468	0,013	Quan FP	TiKa	6
Mg	0,52	0,082	Quan FP	MgKa	0,0116
Zr	0,164	0,001	Quan FP	ZrKa	3
Mn	0,157	0,004	Quan FP	MnKa	0,7507
V	0,096	0,005	Quan FP	V Ka	0,339
Rb	0,09	0,001	Quan FP	RbKa	1
S	0,088	0,004	Quan FP	S Ka	0,0431
Cu	0,062	0,002	Quan FP	CuKa	0,3776
Cr	0,062	0,003	Quan FP	CrKa	0,2836
Y	0,028	0,001	Quan FP	Y Ka	0,5195

AMOSTRA		P7A2			
METAL	(%)	Std.Dev.	Proc.-Calc.	Line	Int.(cps/uA)
Al	36,09	0,105	Quan FP	AlKa	3
Fe	31,35	0,028	Quan FP	FeKa	189
Si	23,70	0,062	Quan FP	SiKa	3
K	5,15	0,019	Quan FP	K Ka	2
Ti	2,48	0,013	Quan FP	TiKa	7
Mg	0,57	0,083	Quan FP	MgKa	0,0132
Mn	0,15	0,003	Quan FP	MnKa	0,7329
Zr	0,15	0,001	Quan FP	ZrKa	3
V	0,11	0,005	Quan FP	V Ka	0,3863
Rb	0,08	0,001	Quan FP	RbKa	1
S	0,06	0,003	Quan FP	S Ka	0,0322
Cr	0,06	0,003	Quan FP	CrKa	0,263
Cu	0,05	0,002	Quan FP	CuKa	0,3155
Y	0,02	0,001	Quan FP	Y Ka	0,4083

AMOSTRA		P7A3			
METAL	(%)	Std.Dev.	Proc.-Calc.	Line	Int.(cps/uA)
Al	36,47	0,106	Quan FP	AlKa	2,7777
Fe	31,84	0,027	Quan FP	FeKa	190,4018
Si	22,94	0,061	Quan FP	SiKa	3,287
K	5,02	0,019	Quan FP	K Ka	1,7473
Ti	2,53	0,012	Quan FP	TiKa	6,6435
Mg	0,67	0,083	Quan FP	MgKa	0,0154
Mn	0,17	0,003	Quan FP	MnKa	0,819
Zr	0,12	0,001	Quan FP	ZrKa	2,427
V	0,10	0,005	Quan FP	V Ka	0,3718
Cu	0,06	0,002	Quan FP	CuKa	0,3743
Cr	0,06	0,003	Quan FP	CrKa	0,2596
Y	0,03	0,001	Quan FP	Y Ka	0,505

AMOSTRA		P8A1			
METAL	(%)	Std.Dev.	Proc.-Calc.	Line	Int.(cps/uA)
Si	46,878	0,071	Quan FP	SiKa	8,0245
Al	22,896	0,072	Quan FP	AlKa	1,935
Fe	20,564	0,021	Quan FP	FeKa	116,1472
K	7,023	0,021	Quan FP	K Ka	2,1154
Ti	1,467	0,01	Quan FP	TiKa	3,193
Ba	0,72	0,032	Quan FP	BaLa	0,5095
Zr	0,144	0,001	Quan FP	ZrKa	3,4846
S	0,102	0,004	Quan FP	S Ka	0,0453
Mn	0,085	0,003	Quan FP	MnKa	0,3807
Rb	0,078	0,001	Quan FP	RbKa	1,4782
Zn	0,024	0,001	Quan FP	ZnKa	0,2089
Y	0,019	0,001	Quan FP	Y Ka	0,4307

AMOSTRA		P8A2			
METAL	(%)	Std.Dev.	Proc.-Calc.	Line	Int.(cps/uA)
Si	47,12	0,071	Quan FP	SiKa	8,4053
Al	22,51	0,072	Quan FP	AlKa	1,9726
Fe	20,77	0,021	Quan FP	FeKa	125,3648
K	6,63	0,021	Quan FP	K Ka	2,0797
Ti	1,60	0,01	Quan FP	TiKa	3,6751
Mg	0,92	0,055	Quan FP	MgKa	0,025
Zr	0,14	0,001	Quan FP	ZrKa	3,4395
S	0,12	0,004	Quan FP	S Ka	0,0531
Mn	0,08	0,003	Quan FP	MnKa	0,3745
Rb	0,07	0,001	Quan FP	RbKa	1,3484
Zn	0,02	0,001	Quan FP	ZnKa	0,1924
Y	0,02	0,001	Quan FP	Y Ka	0,4178

AMOSTRA		P8A5			
METAL	(%)	Std.Dev.	Proc.-Calc.	Line	Int.(cps/uA)
Si	48,57	0,07	Quan FP	SiKa	7,7784
Al	26,26	0,071	Quan FP	AlKa	2,259
Fe	15,07	0,016	Quan FP	FeKa	82,8006
K	6,98	0,021	Quan FP	K Ka	1,9361
Ti	2,06	0,011	Quan FP	TiKa	4,1052
Mg	0,61	0,058	Quan FP	MgKa	0,0163
Zr	0,12	0,001	Quan FP	ZrKa	3,217
S	0,09	0,004	Quan FP	S Ka	0,037
Rb	0,08	0,001	Quan FP	RbKa	1,5673
V	0,08	0,004	Quan FP	V Ka	0,2078
Mn	0,04	0,002	Quan FP	MnKa	0,1665
Cr	0,03	0,002	Quan FP	CrKa	0,1108
Zn	0,02	0,001	Quan FP	ZnKa	0,1895
Y	0,02	0,001	Quan FP	Y Ka	0,4189

AMOSTRA		P13A1			
METAL	(%)	Std.Dev.	Proc.-Calc.	Line	Int.(cps/uA)
Al	34,787	0,093	Quan FP	AlKa	2,6237
Si	33,417	0,068	Quan FP	SiKa	4,5563
Fe	24,726	0,024	Quan FP	FeKa	135,4266
K	3,255	0,015	Quan FP	K Ka	0,9593
Ti	3,16	0,014	Quan FP	TiKa	7,167
Zr	0,266	0,002	Quan FP	ZrKa	5,6621
S	0,105	0,004	Quan FP	S Ka	0,0446
V	0,08	0,005	Quan FP	V Ka	0,2531
Rb	0,061	0,001	Quan FP	RbKa	1,0178
Mn	0,046	0,003	Quan FP	MnKa	0,203
Cr	0,045	0,003	Quan FP	CrKa	0,1794
Y	0,037	0,001	Quan FP	Y Ka	0,7349
Nb	0,015	0,001	Quan FP	NbKa	0,3429

AMOSTRA		P13A2			
METAL	(%)	Std.Dev.	Proc.-Calc.	Line	Int.(cps/uA)
Al	35,5	0,093	Quan FP	AlKa	2,7483
Si	34,313	0,068	Quan FP	SiKa	4,6952
Fe	22,43	0,024	Quan FP	FeKa	122,4747
K	3,65	0,016	Quan FP	K Ka	1,0642
Ti	3,496	0,015	Quan FP	TiKa	7,7521
Zr	0,328	0,002	Quan FP	ZrKa	7,2802
Cr	0,066	0,003	Quan FP	CrKa	0,2576
Rb	0,065	0,001	Quan FP	RbKa	1,1313
S	0,059	0,003	Quan FP	S Ka	0,0249
Y	0,034	0,001	Quan FP	Y Ka	0,6944
Ga	0,024	0,001	Quan FP	GaKa	0,2264
Mn	0,018	0,003	Quan FP	MnKa	0,0789
Nb	0,017	0,001	Quan FP	NbKa	0,4029

AMOSTRA		P13A6			
METAL	(%)	Std.Dev.	Proc.-Calc.	Line	Int.(cps/uA)
Si	38,547	0,069	Quan FP	SiKa	5,5706
Al	32,643	0,086	Quan FP	AlKa	2,6172
Fe	21,313	0,022	Quan FP	FeKa	118,7622
K	3,793	0,016	Quan FP	K Ka	1,1071
Ti	3,125	0,013	Quan FP	TiKa	6,9263
Zr	0,233	0,001	Quan FP	ZrKa	5,3849
Ta	0,118	0,005	Quan FP	TaLa	0,2885
S	0,077	0,003	Quan FP	S Ka	0,0324
Cr	0,054	0,003	Quan FP	CrKa	0,2112
Rb	0,048	0,001	Quan FP	RbKa	0,8726
Y	0,022	0,001	Quan FP	Y Ka	0,4794
Ir	0,014	0,003	Quan FP	IrLa	0,0557
Nb	0,013	0,001	Quan FP	NbKa	0,3029

AMOSTRA		P22A1				
METAL	(%)	Std.Dev.	Proc.-Calc.	Line	Int.(cps/uA)	
Al	33,064	0,096	Quan FP	AlKa	2,5667	
Si	29,409	0,065	Quan FP	SiKa	4,3403	
Fe	28,041	0,026	Quan FP	FeKa	162,3755	
K	5,756	0,02	Quan FP	K Ka	1,8905	
Ti	2,596	0,013	Quan FP	TiKa	6,3178	
Mg	0,525	0,077	Quan FP	MgKa	0,0124	
Zr	0,134	0,001	Quan FP	ZrKa	2,8626	
V	0,096	0,005	Quan FP	V Ka	0,3259	
Rb	0,091	0,001	Quan FP	RbKa	1,5205	
S	0,072	0,004	Quan FP	S Ka	0,0344	
Mn	0,06	0,003	Quan FP	MnKa	0,281	
Cu	0,057	0,002	Quan FP	CuKa	0,3734	
Cr	0,051	0,003	Quan FP	CrKa	0,2216	
Ga	0,026	0,001	Quan FP	GaKa	0,2376	
Y	0,023	0,001	Quan FP	Y Ka	0,451	

AMOSTRA		P22A2				
METAL	(%)	Std.Dev.	Proc.-Calc.	Line	Int.(cps/uA)	
Al	33,091	0,095	Quan FP	AlKa	2,5084	
Fe	29,439	0,026	Quan FP	FeKa	168,9897	
Si	28,047	0,063	Quan FP	SiKa	4,0796	
K	5,684	0,019	Quan FP	K Ka	1,8715	
Ti	2,601	0,013	Quan FP	TiKa	6,365	
Mg	0,57	0,076	Quan FP	MgKa	0,0131	
Zr	0,147	0,001	Quan FP	ZrKa	3,0369	
Rb	0,096	0,001	Quan FP	RbKa	1,544	
V	0,093	0,005	Quan FP	V Ka	0,3141	
Mn	0,071	0,003	Quan FP	MnKa	0,3337	
Cu	0,054	0,002	Quan FP	CuKa	0,3434	
Cr	0,049	0,003	Quan FP	CrKa	0,2136	
Zn	0,025	0,002	Quan FP	ZnKa	0,186	
Y	0,023	0,001	Quan FP	Y Ka	0,4496	
Nb	0,011	0,001	Quan FP	NbKa	0,2424	

AMOSTRA		P22A10				
METAL	(%)	Std.Dev.	Proc.-Calc.	Line	Int.(cps/uA)	
Si	32,778	0,066	Quan FP	SiKa	5,5163	
Al	28,709	0,087	Quan FP	AlKa	2,4468	
Fe	25,881	0,025	Quan FP	FeKa	155,4787	
K	9,505	0,025	Quan FP	K Ka	3,3026	
Ti	2,085	0,012	Quan FP	TiKa	5,034	
Mg	0,492	0,064	Quan FP	MgKa	0,0126	
Zr	0,105	0,001	Quan FP	ZrKa	2,4543	
Rb	0,103	0,001	Quan FP	RbKa	1,8719	
Mn	0,087	0,003	Quan FP	MnKa	0,4234	
S	0,08	0,003	Quan FP	S Ka	0,0413	
V	0,074	0,005	Quan FP	V Ka	0,2466	
Cr	0,047	0,003	Quan FP	CrKa	0,2061	
Zn	0,021	0,001	Quan FP	ZnKa	0,1754	
Y	0,018	0,001	Quan FP	Y Ka	0,388	
Sr	0,017	0,001	Quan FP	SrKa	0,3454	

AMOSTRA		P23A1				
METAL	(%)	Std.Dev.	Proc.-Calc.	Line	Int.(cps/uA)	
Si	41,1	0,066	Quan FP	SiKa	6,8684	
Al	27,574	0,076	Quan FP	AlKa	2,4223	
Fe	18,587	0,019	Quan FP	FeKa	107,4277	
K	9,493	0,024	Quan FP	K Ka	2,9565	
Ti	1,869	0,011	Quan FP	TiKa	4,0257	
Mg	0,819	0,056	Quan FP	MgKa	0,0223	
Zr	0,121	0,001	Quan FP	ZrKa	3,1044	
S	0,096	0,003	Quan FP	S Ka	0,0446	
V	0,094	0,004	Quan FP	V Ka	0,2828	
Rb	0,082	0,001	Quan FP	RbKa	1,6515	
Mn	0,061	0,003	Quan FP	MnKa	0,2786	
Zn	0,032	0,001	Quan FP	ZnKa	0,298	
Cr	0,029	0,003	Quan FP	CrKa	0,1133	
Y	0,016	0,001	Quan FP	Y Ka	0,3809	
Ga	0,016	0,001	Quan FP	GaKa	0,1731	
Sr	0,011	0,001	Quan FP	SrKa	0,2438	

AMOSTRA		P23A2				
METAL	(%)	Std.Dev.	Proc.-Calc.	Line	Int.(cps/uA)	
Si	42,014	0,065	Quan FP	SiKa	7,1869	
Al	26,487	0,073	Quan FP	AlKa	2,3685	
Fe	17,21	0,018	Quan FP	FeKa	98,4628	
K	11,367	0,026	Quan FP	K Ka	3,5201	
Ti	1,479	0,01	Quan FP	TiKa	3,0748	
Mg	0,906	0,055	Quan FP	MgKa	0,0251	
S	0,124	0,003	Quan FP	S Ka	0,0579	
Zr	0,095	0,001	Quan FP	ZrKa	2,5005	
Rb	0,094	0,001	Quan FP	RbKa	1,9303	
V	0,083	0,004	Quan FP	V Ka	0,2387	
Mn	0,056	0,003	Quan FP	MnKa	0,2507	
Cr	0,034	0,003	Quan FP	CrKa	0,1327	
Zn	0,024	0,001	Quan FP	ZnKa	0,2207	
Y	0,017	0,001	Quan FP	Y Ka	0,4222	
Sr	0,012	0,001	Quan FP	SrKa	0,2695	

AMOSTRA		P23A4				
METAL	(%)	Std.Dev.	Proc.-Calc.	Line	Int.(cps/uA)	
Si	40,963	0,067	Quan FP	SiKa	6,9956	
Al	26,635	0,076	Quan FP	AlKa	2,356	
Fe	18,986	0,019	Quan FP	FeKa	110,21	
K	10,563	0,025	Quan FP	K Ka	3,3347	
Ti	1,528	0,01	Quan FP	TiKa	3,2865	
Mg	0,855	0,056	Quan FP	MgKa	0,0233	
S	0,113	0,004	Quan FP	S Ka	0,0537	
Zr	0,1	0,001	Quan FP	ZrKa	2,5824	
Rb	0,09	0,001	Quan FP	RbKa	1,7943	
V	0,088	0,004	Quan FP	V Ka	0,2635	
Zn	0,028	0,001	Quan FP	ZnKa	0,2537	
Mn	0,022	0,002	Quan FP	MnKa	0,1015	
Cr	0,019	0,002	Quan FP	CrKa	0,0744	
Sr	0,011	0,001	Quan FP	SrKa	0,2466	

AMOSTRA		P24A1				
METAL	(%)	Std.Dev.	Proc.-Calc.	Line	Int.(cps/uA)	
Si	38,206	0,069	Quan FP	SiKa	5,6949	
Al	31,633	0,086	Quan FP	AlKa	2,5766	
Fe	20,604	0,023	Quan FP	FeKa	116,2044	
K	5,858	0,02	Quan FP	K Ka	1,7442	
Ti	2,504	0,013	Quan FP	TiKa	5,4774	
Mg	0,653	0,068	Quan FP	MgKa	0,0165	
Zr	0,217	0,001	Quan FP	ZrKa	5,1672	
Rb	0,09	0,001	Quan FP	RbKa	1,6701	
S	0,085	0,004	Quan FP	S Ka	0,0371	
Cu	0,048	0,002	Quan FP	CuKa	0,3456	
Cr	0,039	0,003	Quan FP	CrKa	0,1538	
Mn	0,036	0,003	Quan FP	MnKa	0,1629	
Y	0,027	0,001	Quan FP	Y Ka	0,6047	

AMOSTRA		P24A2				
METAL	(%)	Std.Dev.	Proc.-Calc.	Line	Int.(cps/uA)	
Si	37,431	0,069	Quan FP	SiKa	5,3763	
Al	31,81	0,087	Quan FP	AlKa	2,4919	
Fe	21,144	0,024	Quan FP	FeKa	114,9869	
K	5,948	0,02	Quan FP	K Ka	1,7211	
Ti	2,443	0,013	Quan FP	TiKa	5,1864	
Mg	0,602	0,069	Quan FP	MgKa	0,0146	
Zr	0,237	0,001	Quan FP	ZrKa	5,3913	
V	0,101	0,005	Quan FP	V Ka	0,2986	
Rb	0,096	0,001	Quan FP	RbKa	1,7127	
S	0,063	0,003	Quan FP	S Ka	0,0268	
Mn	0,053	0,003	Quan FP	MnKa	0,2303	
Cr	0,041	0,003	Quan FP	CrKa	0,1588	
Y	0,029	0,001	Quan FP	Y Ka	0,6194	

AMOSTRA		P24A10				
METAL	(%)	Std.Dev.	Proc.-Calc.	Line	Int.(cps/uA)	
Si	34,046	0,065	Quan FP	SiKa	5,1172	
Al	32,865	0,087	Quan FP	AlKa	2,6766	
Fe	23,455	0,023	Quan FP	FeKa	136,433	
K	6,053	0,019	Quan FP	K Ka	1,9119	
Ti	2,35	0,012	Quan FP	TiKa	5,4535	
Mg	0,67	0,061	Quan FP	MgKa	0,0168	
Zr	0,22	0,001	Quan FP	ZrKa	5,1123	
V	0,095	0,005	Quan FP	V Ka	0,3053	
Rb	0,09	0,001	Quan FP	RbKa	1,6394	
Mn	0,055	0,003	Quan FP	MnKa	0,2562	
Cr	0,047	0,003	Quan FP	CrKa	0,1993	
Y	0,023	0,001	Quan FP	Y Ka	0,4906	
Ga	0,021	0,001	Quan FP	GaKa	0,2081	
Nb	0,011	0,001	Quan FP	NbKa	0,2554	

## ANEXO C: RELATÓRIO FOTOGRÁFICO



**Figura C 1: Ponto 1**



**Figura C 2: Ponto 3**



**Figura C 4: Ponto 2**



**Figura C 3: Ponto 5**



**Figura C 5: Ponto 7**



**Figura C 7: Ponto 4**



**Figura C 6: Ponto 6**



**Figura C 9: Ponto 8**



**Figura C 8: Ponto 9**



**Figura C 11: Ponto 10**



**Figura C 10: Ponto 11**



**Figura C 13: Ponto 12**



**Figura C 12: Ponto 13**



**Figura C 15: Ponto 14**



**Figura C 14: Ponto 15**



**Figura C 18: Ponto 16**



**Figura C 17: Ponto 17**



**Figura C 19: Ponto 18**



**Figura C 22: Ponto 19**



**Figura C 23: Ponto 20**



**Figura C 20: Ponto 21**



**Figura C 21: Ponto 22**



**Figura C 16: Ponto 23**



**Figura C 24: Ponto 24**



**Figura C 25: Seixo rolado em processo de laterização**



**Figura C 26: Concreção laterítica**



**Figura C 27: Erosão em estrada próximo ao Ponto 1.**



**Figura C 28: Cobertura pedregulhosa superficial: “Couraça laterítica”**



Figura C 29: Amostras após 24h de hidratação

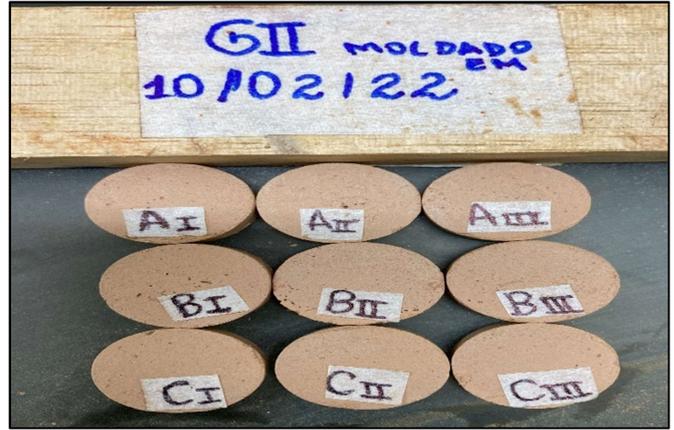


Figura C 30: Ensaio das pastilhas - Amostras após secagem ao ar



Figura C 31: Amostra deformada P13A6 (H100-120 cm)



Figura C 32: Amostra deformada P23A1 (H0-20 cm)

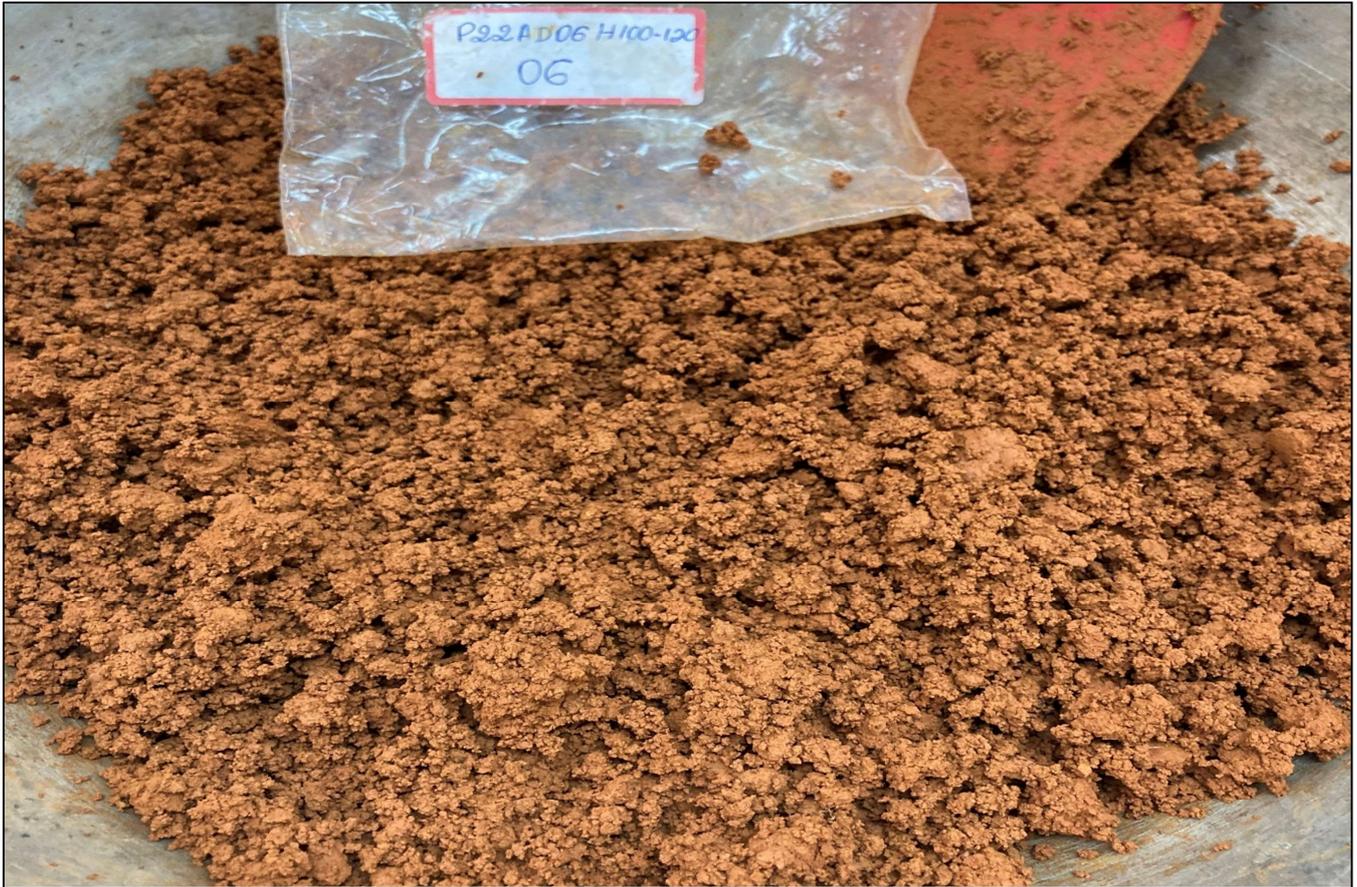


Figura C 33: Amostra deformada P22A6 (H100-120 cm)



Figura C 34: Amostra deformada P22A3 (H40-60 cm)

EM BRANCO