



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE BARRAGEM E GESTÃO
AMBIENTAL

GLAYCE WIVYANNE OLIVEIRA COSTA

**CRITÉRIOS OPERACIONAIS PARA REDUÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO DE
SEDIMENTOS GERADOS EM PILHAS DE ESTÉRIL**

Tucuruí-PA

2018

GLAYCE WIVYANNE OLIVEIRA COSTA

**CRITÉRIOS OPERACIONAIS PARA REDUÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO DE
SEDIMENTOS GERADOS EM PILHAS DE ESTÉRIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Segurança de Barragem e Gestão Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita

Tucuruí-PA

2018

GLAYCE WIVYANNE OLIVEIRA COSTA

**CRITÉRIOS OPERACIONAIS PARA REDUÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO DE
SEDIMENTOS GERADOS EM PILHAS DE ESTÉRIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Segurança de Barragem e Gestão Ambiental.

Aprovada em 14 de novembro de 2018.

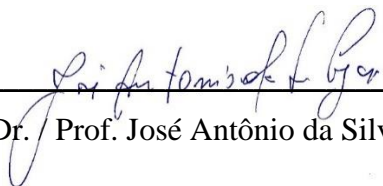
BANCA EXAMINADORA:



Dr. / Prof. André Luiz Amarante Mesquita- NDADE/UFPA - Orientador



Dr. / Prof. Denilson José Ribeiro Sodré- FEC/ITEC/UFPA



Dr. / Prof. José Antônio da Silva Souza - FEQ/ITEC/UFPA

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

- C837c Costa, Glayce Wivyanne Oliveira.
CRITÉRIOS OPERACIONAIS PARA REDUÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO DE SEDIMENTOS
GERADOS EM PILHAS DE ESTÉRI / Glayce Wivyanne Oliveira Costa, . — 2018.
88 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental,
Campus Universitário de Tucuruí, Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2018.
1. Pilha de estéril. 2. Produção de sedimento. 3. Critérios Operacionais. 4. Processos de Mineração. I.
Título.

CDD 620

A Deus, meu único Senhor e Salvador. Ao meu amado esposo Hugo, pelo carinho, compreensão e apoio nesse período de grande desafio. E aos meus filhos Gianluca e Giorgio, a quem tento transmitir valores de honestidade, justiça e caráter.

AGRADECIMENTOS

“De todo coração, Senhor meu Deus, presto homenagens por Suas maravilhas! Direi bem alto e em bom som! Estou feliz e agradeço ao Senhor. Sempre celebrarei Seu nome Altíssimo”(Salmos 9: 1-2)

À minha maravilhosa família, meus pais João e Neves, por todo amor e orgulho que cultivam por mim, meu amado esposo Hugo com quem sou casada para sempre e mãe para toda vida dos meus lindo filhos Gianluca e Giorgio.

À toda equipe de professores do PEBGA, mas principalmente ao professor Dr. André Luiz Amarante Mesquita por ter me orientado com muita gentileza e propriedade, e à professora Dra. Karyme Vilhena pela paciência e disponibilidade com que me esclarecia as dúvidas.

Aos meus amigos André Thiago e Deni Otávio pela parceria formada durante o curso.

E ao querido Mardon Mendes, profissional de grande conhecimento e colega de trabalho, pelas excelentes contribuições para o sucesso deste trabalho e conclusão de mais uma etapa em minha vida profissional.

RESUMO

A falha na construção e/ou operação de pilhas de estéril pode acarretar em impactos ambientais significativos por conta da gestão de sedimentos provenientes de processos erosivos, principalmente no período chuvoso, tornando-se necessária a elaboração de planos de mitigação que levem em consideração o comportamento morfodinâmico dos terrenos, bem como o ritmo de assoreamento ou da carga de sedimentos que podem ser incorporadas aos cursos d'água durante as diferentes etapas construtivas das estruturas, a fim de garantir a integridade da flora no entorno do empreendimento, bem como otimizar a destinação dos rejeitos e sedimentos dentro do espaço definido para as atividades de mineração. Nesse sentido, este estudo objetiva analisar o processo de disposição de estéril e de geração de sólidos, em pilhas de disposição de estéril de minério de ferro, provenientes de minas a céu aberto, e com isso indicar critérios operacionais que subsidiem a redução da contribuição de sedimentos gerados nas pilhas para o meio ambiente. Para a execução deste trabalho foi escolhida uma pilha de estéril da Vale instalada na Província Mineral de Carajás, denominada PDE NW II, para a qual foi realizada uma pesquisa documental e análises crítica dos principais fatores envolvidos na dinâmica erosiva da estrutura. Neste contexto estão inclusos os históricos de chuvas, classificação de cobertura do solo, tamanho e morfologia da bacia de contribuição, bem como a quantificação de sedimento carregado pela estrutura para porções a jusante. A metodologia utilizada se mostrou eficiente, principalmente porque conseguiu correlacionar causa e efeito, na avaliação das rotinas de implantação e operação das pilhas, de forma a tornar intuitiva as ações de ordem preventiva, no sentido de minimizar o transporte de sedimento para o meio ambiente.

Palavras-chave: Pilha de estéril. Produção de sedimento. Critérios Operacionais. Processos de Mineração.

ABSTRACT

Failure to construct and / or operate sterile piles can lead to significant environmental impacts due to the management of sediments from erosion processes, especially in the rainy season, making it necessary to prepare mitigation plans that take into account the behavior morphodynamic characteristics of the land, as well as the rate of sedimentation or the sediment load that can be incorporated into the watercourses during the different constructive stages of the structures, in order to guarantee the integrity of the flora around the enterprise, as well as to optimize the destination of the tailings and sediments within the space defined for the mining activities. In this sense, this study aims to analyze the process of sterile disposal and solids generation in iron ore sterile disposal cells from open pit mines, thus indicating operational criteria that subsidize the reduction of the contribution of sediment generated in batteries for the environment. In order to carry out this work, a Vale sterile stack was installed in the Mineral Province of Carajás, called PDE NW II, for which a documentary research and critical analysis of the main factors involved in the erosive dynamics of the structure was carried out. In this context, rainfall histories, soil cover classification, size and morphology of the contribution basin are included, as well as the quantification of sediment carried by the structure to downstream portions. The methodology used was efficient, mainly because it was able to correlate cause and effect, in the evaluation of the routines of implantation and operation of the piles, in order to make preventive actions intuitive, in order to minimize the contribution of sediment to the environment.

Keywords: Stack of sterile. Production of sediment. Operational Criteria. Mining Processes.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Arranjo em perfil dos principais elementos de uma pilha de estéril.	10
Figura 2 Modelos geométricos básicos de pilhas de estéril.	11
Figura 3 Seção esquemática de dreno de fundo.	13
Figura 4 Arranjo geral e seção-tipo de uma bacia de contenção e decantação de sedimentos.	13
Figura 5 Construção de pilha pelo método descendente.	14
Figura 6 Construção de pilha pelo método ascendente em camadas, por empilhamento.	15
Figura 7 Construção de pilha pelo método ascendente, por ponta de aterro.	15
Figura 8 Arranjo geral típico de canal periférico.	16
Figura 9 Execução do rebatimento do talude de uma pilha.	17
Figura 10 Fases do processo de erosão.	20
Figura 11 Variação da capacidade de infiltração real de um solo e distribuição de chuva.	24
Figura 12 Diagrama dos principais componentes do ciclo hidrológico.	25
Figura 13 Mapa de localização da PDE NW II.	33
Figura 14 Mapa de localização do Complexo Minerador de Carajás.	34
Figura 15 Identificação dos corpos mineralizados do Complexo Minerador de Carajás.	35
Figura 16 Geometria típica das Pilhas de Disposição de Estéril (Taludes Finais).	36
Figura 17 Geometria típica de uma PDE (Taludes Operacionais).	37
Figura 18 Arranjo final do projeto executivo da pilha.	37
Figura 19 Quantificação do volume de estéril depositado na PDE NW II até o ano de 2016.	38
Figura 20 Arranjo final do projeto de drenagem superficial da pilha.	39
Figura 21 Detalhe Típico de leira de proteção.	39
Figura 22 Seção Típica da Descida de Água em Degraus em Seção Retangular.	40
Figura 23 Perfil longitudinal de trecho do CP 02.	42
Figura 24 Descida de água em gabião construída na ombreira direita da PDE NW II.	43
Figura 25 Descida de água em gabião construída na ombreira esquerda da PDE NW II.	43
Figura 26 Prolongamento do canal periférico.	44
Figura 27 Seção típica do dreno de fundo da pilha.	44
Figura 28 Arranjo esquemático de instalação do dreno de fundo.	45
Figura 29 Fases do processo construtivo do dreno interno da pilha.	46
Figura 30 Execução de leitura da medição do dreno de fundo da pilha NW II.	46
Figura 31 Localização da Barragem do Gelado.	47
Figura 32 Seção esquemática das 3 primeiras etapas de implantação da pilha.	48

Figura 33 Mapa de localização do cordão drenante e da barragem do Gelado.	48
Figura 34 Visão aérea e do material de enrocamento do cordão drenante.	49
Figura 35 Bacias de contenção de sedimento construídas no corpo da pilha.	50
Figura 36 Tipos de solos do grupo Grão Pará presentes na pilha de estéril.	52
Figura 37 (a) DEM que contém a área de estudo. (b) Identificação da área de estudo no DEM. (c) DEM recortado. (d) DEM reprojetoado para UTM.	53
Figura 38 (a) Rede de fluxos da bacia total. (b) Identificação das sub bacias. (c) delimitação automática da bacia da PDE NW II. (d) Mapa visual do relevo, rede de fluxo e delimitação da bacia da PDE NW II.	54
Figura 39 Mapa da Bacia de contribuição das Barragens do Complexo Minerador de Carajás com indicação do tipo de solo predominante na região.	55
Figura 40 Pontos de coleta das amostras deformadas na região de interesse.	59
Figura 41 Coleta de amostra deformada.	59
Figura 42 a) Ilustração da pilha e Braço 3 da barragem do Gelado. b) Ilustração em planta da área disponível e assoreada do Braço 3.	60
Figura 43 Identificação dos bancos operacionais e finalizados da PDE NW II.	63
Figura 44 Geometria de bancos com talude rebatido e operacional.	64
Figura 45 Transporte de sedimento pela drenagem superficial da estrutura.	65
Figura 46 Desaguamento de água sem presença de sedimento no canal periférico da pilha. ..	65
Figura 47 (a) Área de contribuição total da PDE NW II. (b) Área de contribuição efetiva da PDE NW II.	67
Figura 48 Bacia de contribuição da pilha e tipo de cobertura de solo.	68
Figura 49 Pontos de coleta das amostras deformadas na PDE SUL.	69
Figura 50 Ponto de deságue do cordão drenante sem presença de sedimento.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Influência da presença de sedimento na velocidade crítica de erosão.....	20
Tabela 2 Valores de coeficiente de escoamento superficial.	28
Tabela 3 Classificação da erosividade em relação à intensidade.	31
Tabela 4 Classificação dos solos em função do fator de erodibilidade (K).	32
Tabela 5 Resumo das características geométricas de projeto para a fase final da PDE.	36
Tabela 6 Resumo das características geométricas na fase operacional da PDE.....	36
Tabela 7 Tabela Resumo para as Descidas de Água em Degraus.	41
Tabela 8 Tabela Resumo para os Canais Periféricos.....	41
Tabela 9 Estação Mirante N4-E - Série histórica consistida de precipitação mensal considerada no estudo hidrológico do projeto (mm).	56
Tabela 10 Informações dos furos de sondagem.....	58
Tabela 11 Vazões medidas na calha do dreno de fundo da pilha em 2017.	66
Tabela 12 Valores de coeficiente de escoamento superficial.	68
Tabela 13 Valores adotados do fator erodibilidade de cada tipo de solo.	69
Tabela 14 Precipitações Média Mensal e Anual na bacia hidrográfica da PDE NW II.	70
Tabela 15 Erosividade anual (em MJ mm ha-1 h-1 ano-1) nas sub-bacias do Rio Samambaia, do Ribeirão Moreira e do Córrego Arrasta-burro.	70

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 Classificação da erosão pelos fatores ativos.....	19
Quadro 2 Descrição resumida das classes suscetíveis à erosão laminar.	21
Quadro 3 Definições dos tipos de sedimento.	22

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Variação Mensal da Precipitação – Estação Mirante N4-E.	57
Gráfico 2 Número Médio de Dias Chuvosos – Estação Mirante N4-E.....	57
Gráfico 3 Representação gráfica das vazões medidas no dreno de fundo da pilha em 2017. ..	66
Gráfico 4 Resultado do ensaio de granulometria conjunta.....	71

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ADME – Área de disposição de material excedente.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.

Et al – e outros.

EUPS – Equação Universal de Perda de Solo.

ha - hectares.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia.

Km – quilômetros.

m/s – metros por segundo.

mm – milímetros

NBR – Norma Brasileira

PDE – Pilha de Disposição de Estéril.

SCS – Soil Conservation Service.

SUDAM - Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia

USLE – Universal Soil Loss Equation.

UTM - Universal Transversa de Mercator

% - porcentagem.

& - ampersand

Δ - Delta.

> - Maior

< - Menor ou igual

© - copyright

® - Registrado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	OBJETIVOS	9
2.1	GERAL.....	9
2.2	ESPECÍFICOS	9
3	PILHA DE DISPOSIÇÃO DE ESTÉRIL (PDE)	10
3.1	CONCEITUAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO.....	10
3.1.1	Classificação geométrica das pilhas de estéril.....	11
3.2	ESTUDOS DE ALTERNATIVAS E PROJETO.....	11
3.2.1	Métodos construtivos de pilhas	14
3.2.2	Drenagem superficial.....	15
3.2.3	Desativação de pilhas	16
3.3	PROCESSOS EROSIVOS	17
3.3.1	Classificação das erosões.....	18
3.4	HIDROSEDIMENTOLOGIA.....	21
3.4.1	Transporte de sedimento.....	22
3.5	MODELAGEM HIDROLÓGICA	23
3.5.1	Tipos de modelos hidrológicos.....	25
4	ÁREA DE ESTUDO	33
4.1	PESQUISA DOCUMENTAL	35
4.1.1	Geometria da pilha.....	35
4.1.2	Drenagem Superficial da PDE NW II	38
4.1.3	Drenagem Interna da PDE NW II.....	44
4.1.4	Estruturas de controle de sedimentos da PDE NW II.....	47
4.2	ASPECTOS GEOLÓGICOS.....	50
4.3	ESTUDOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS	52
4.3.1	Mapa de Elevação Digital - DEM	52
4.3.2	Bacia de contribuição da PDE NW II.....	53
4.3.3	Cobertura e uso do solo	54
4.3.4	Caracterização climatológica.....	55
4.3.5	Caracterização pluviométrica	56
4.4	AVALIAÇÃO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTO	57
4.4.1	Análises laboratoriais	57

4.4.2 Produção de Sedimento	60
4.5 INSPEÇÕES GEOTÉCNICAS	60
4.6 PROGRAMAS COMPUTACIONAIS UTILIZADOS.....	61
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
5.1.1 Pesquisa Documental.....	63
5.1.2 Estudos hidrossedimentológicos	67
5.1.3 Avaliação do transporte de sedimento.....	70
6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	72
REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

As pilhas de disposição de estéril são estruturas geotécnicas de grande porte constituídas pelos materiais provenientes do decapeamento de jazidas, cuja função principal é permitir o acesso aos corpos de minério. Sua implantação é passível de autorização de órgãos ambiental e reguladores, e requer um planejamento prévio, afim de detalhar todas as etapas construtivas da estrutura, incluindo os estudos geotécnicos e ambientais, necessários para a sua execução.

A falha na construção e/ou operação de pilhas de estéril pode acarretar em impactos ambientais significativos, principalmente por conta da gestão de sedimentos provenientes de processos erosivos, principalmente no período chuvoso. Os principais impactos associados ao aumento da erosão são em primeiro lugar o comportamento geomecânico do solo, com perda de propriedades essenciais, e conseqüentemente o aumento do assoreamento. Isto faz com que ocorra uma alteração da qualidade da água e alteração nos ecossistemas aquáticos, em decorrência do carreamento de partículas sólidas pela erosão. A taxa de assoreamento quando muito elevada, pode afetar a drenagem superficial, gerando obstrução do fluxo natural. Em virtude disso, os processos erosivos em muito se revestem de importância para a gestão de sedimentos, a fim de garantir a integridade dos cursos de água no entorno do empreendimento, bem como o confinamento do material mobilizado dentro do espaço definido das atividades de mineração.

Desta forma, a gestão das pilhas de disposição de estéril é necessária para garantir a segurança física e ambiental e promover o bom desenvolvimento e a eficiência da atividade extrativa, pois segundo Aragão (2011) a gestão do estéril representa apenas custos para a lavra. Essa gestão inicia-se no processo de licenciamento, tendo sua continuidade na fase operacional e culmina na fase de fechamento. De acordo com Camapum de Carvalho e colaboradores (2006), a legislação ambiental considera dois enfoques, o que objetiva evitar o dano e o que visa recuperar a área degradada, sendo que evitar o dano apresenta sempre o menor custo e é, sem dúvida, a melhor prática de preservação ambiental. A definição de medidas preventivas e corretivas dos processos erosivos assume grande importância para a preservação de recursos hídricos e ambientais (FARIA et al., 2013).

Este trabalho trata da necessidade de elaboração de planos de mitigação que levem em consideração o comportamento morfodinâmico dos terrenos, bem como a carga de assoreamento ou da carga de sedimentos que podem ser incorporadas aos cursos d'água durante as diferentes etapas construtivas dessas estruturas, a fim de garantir a integridade da flora no entorno do empreendimento, bem como restringir os sedimentos dentro do espaço licenciado.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

O objetivo geral deste estudo é analisar o processo de disposição de estéril e de geração de sólidos visando reduzir o transporte de sedimentos para jusante da estrutura principalmente no período de chuvas.

Propor ações para reduzir a perda de solo em pilhas de estéril e reduzir a geração de sedimentos para o meio ambiente

2.2 ESPECÍFICOS

A partir do objetivo geral, foram estabelecidos os objetivos específicos deste trabalho:

- a) Escolher uma pilha de disposição de estéril para o estudo;
- b) Realizar pesquisa documental de projetos e procedimento associados à pilha em estudo;
- c) Fazer o balanço hídrico da área de estudo;
- d) Inspeccionar visualmente a área selecionada para identificação de possíveis anomalias geotécnicas, ambientais e operacionais;
- e) Coletar amostras de solo para análise e ensaios experimentais;
- f) Desenvolver o levantamento topográfico da área estudada;
- g) Investigar modelos de perdas de solo;
- h) Identificar falhas advindas da implantação e operação da área selecionada para o estudo;
- i) Propor melhorias nas condições de drenagem de pilhas de disposição de estéril com base nas possíveis anomalias identificadas;
- j) Publicar os resultados em eventos científicos e em periódicos indexados.

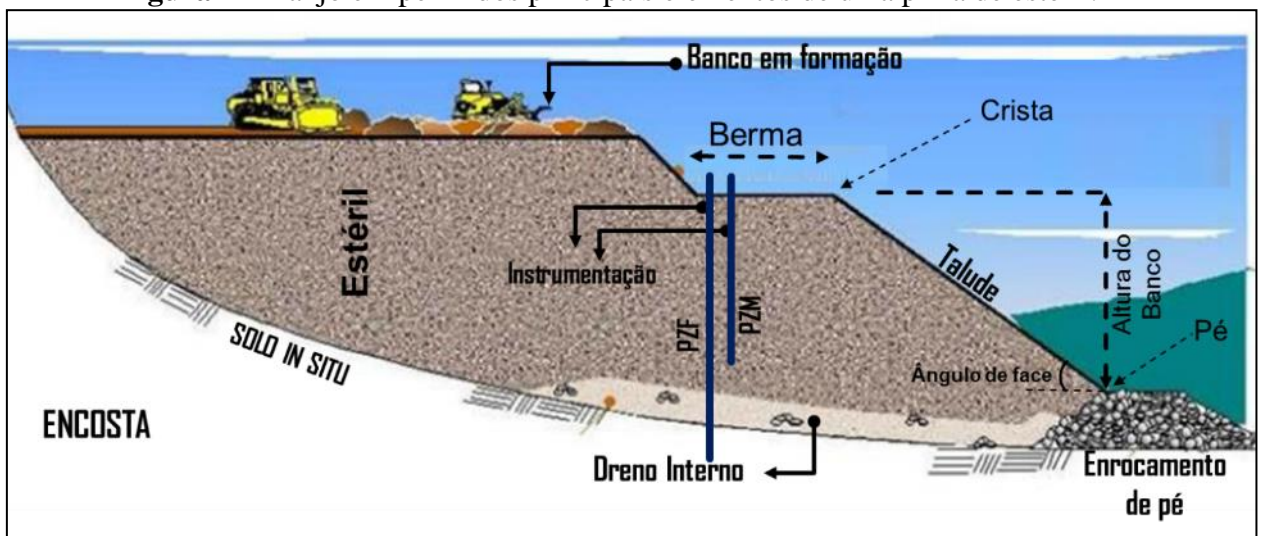
3 PILHA DE DISPOSIÇÃO DE ESTÉRIL (PDE)

3.1 CONCEITUAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO

As atividades de mineração são subdivididas basicamente nos processos de lavra, que correspondem às operações diretas de exploração da jazida de minério e nos processos de tratamento ou beneficiamento, caracterizados pelas operações físicas e/ou químicas destinadas a modificar os bens minerais em termos de forma e/ou composição, visando adequá-los às aplicações industriais pertinentes.

As Pilhas de Disposição de Estéril (PDE) são estruturas geotécnicas constituídas pelos materiais provenientes do decapeamento de jazidas, cujo solo é escavado e removido, de forma a permitir o acesso aos corpos de minério. Tipicamente, são representados por solos e rochas de naturezas diversas, com diferentes granulometrias, densidades e resistências. (GOMES, 2012). A Figura 1 apresenta um perfil de um arranjo em perfil dos principais elementos de uma pilha de estéril.

Figura 1 Arranjo em perfil dos principais elementos de uma pilha de estéril.



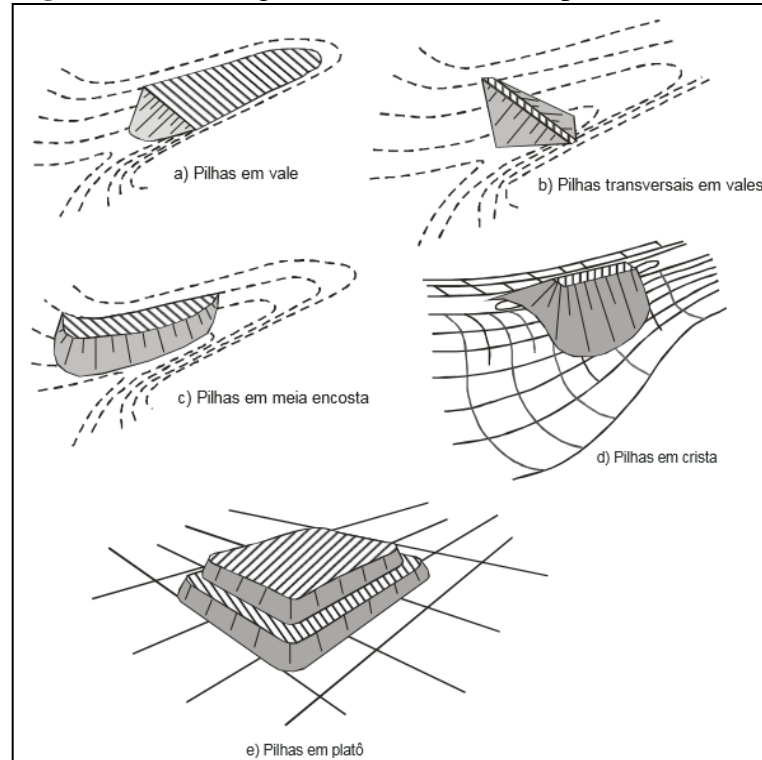
Fonte: Adaptado de Nunes, 2014.

A disposição do estéril representa um custo alto para os gastos envolvidos com exploração mineral, e se não for realizada de forma planejada pode afetar diretamente na lavra do minério. (ARAGÃO, 2008)

3.1.1 Classificação geométrica das pilhas de estéril

As pilhas de estéril podem ser classificadas de acordo com a conformação geométrica, essa classificação pode ser, basicamente, composta por cinco modelos, associados, ou não, entre si, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2 Modelos geométricos básicos de pilhas de estéril.



Fonte: MEMPR (2005).

3.2 ESTUDOS DE ALTERNATIVAS E PROJETO

A fase de planejamento é constituída das seguintes etapas: (ARAGÃO, 2008)

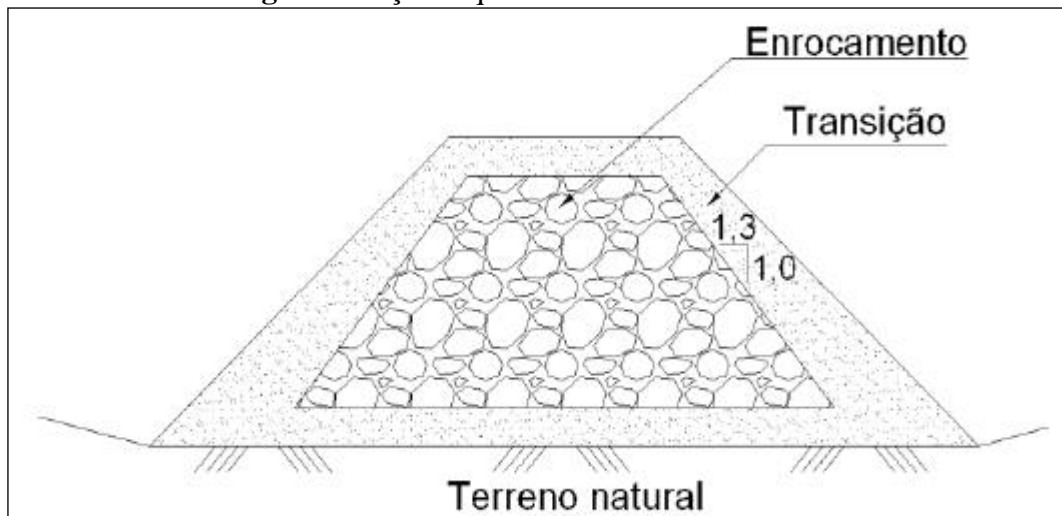
- a) **Exploração**: etapa de coleta das informações;
- b) **Pré-viabilidade**: etapa de aquisição de informações específicas sobre locais prováveis para a disposição de estéril, incluindo geologia, topografia, vegetação, hidrologia, clima, arqueologia e/ou outras informações relevantes passíveis de autorizações de órgãos ambientais. É nesta etapa que são determinados os dados básicos sobre a disposição de estéril, como a quantidade, o tipo do material, a origem e os métodos propostos para manejo e disposição. Além disso, é feita a descrição e classificação dos possíveis impactos ambientais causados pela implantação da estrutura.
- c) **Viabilidade**: etapa em que são conduzidos os estudos para o projeto preliminar, além de

tratar de questões específicas esboçadas no estágio anterior, submetidas ao órgão ambiental. É na fase da viabilidade que são realizadas as investigações de campo, afim de se implementar uma melhor avaliação da realidade do local e sua adequabilidade, além de fazer a caracterização do material que compõe a fundação (resistência ao cisalhamento, durabilidade, composição química) e também dos materiais que a pilha será constituída (EATON et al., 2005).

- d) **Projeto preliminar:** Esta etapa deve conter informações detalhadas como planos preliminares para a disposição de estéril, avaliações das condicionantes ambientais, impactos potenciais, estratégias de mitigação destes impactos e parâmetros de projeto para que possa ser submetido à avaliação dos órgãos competentes, inclusive ao órgão ambiental para concessão da licença.
- e) **Desenvolvimento do projeto executivo:** Nesta etapa é feito o detalhamento de todas as características da pilha, a saber geometria, drenagens interna e superficial, proteção final das bermas e o acabamento paisagístico (ABNT, 2006). Um outro aspecto que deve ser assegurado durante todas as fases de uma pilha é a análise da estabilidade da mesma, onde são avaliadas várias hipóteses de ruptura para as diversas situações das pilhas, sob diferentes condições hidrogeológicas.

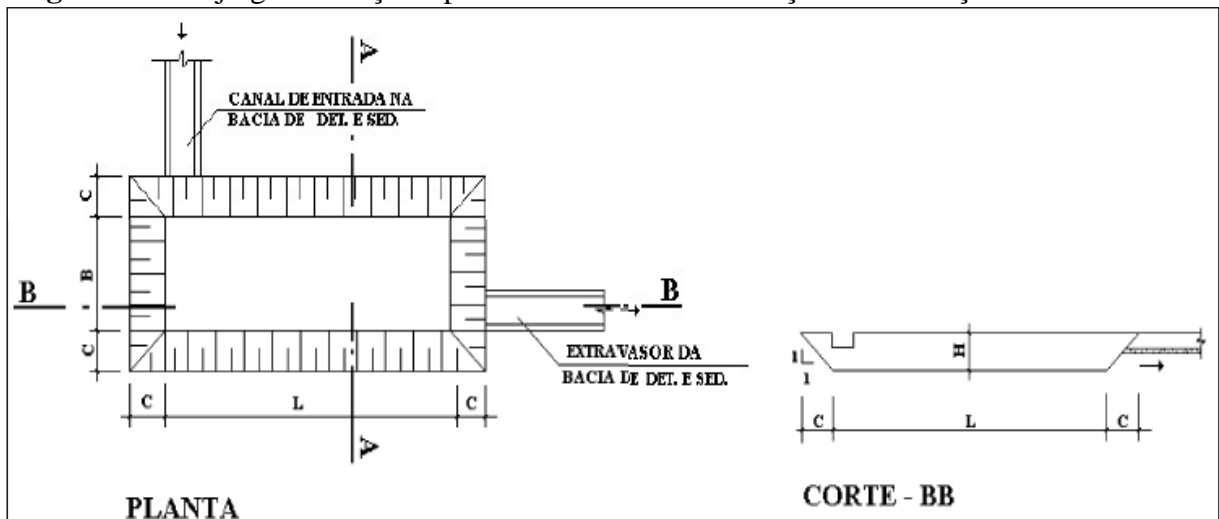
Após a fase de planejamento, passa-se à fase de implantação da Pilha de Estéril, conforme informado ao órgão ambiental, onde inicialmente é feita a preparação da fundação da estrutura, através da limpeza de cobertura vegetal (supressão vegetal), desvio de cursos d'água, construção de drenos de fundo, no caso de áreas com surgências ou de pilhas construídas em vale, e construção de estruturas de contenção de sedimento.

Os drenos de fundo são colchões ou valas preenchidas com transições de material, entre areias, britas e pedregulhos, por onde se esperam grandes vazões. Mesmo na implantação, torna-se necessária a disposição de camadas de estéril sobre o dreno de fundo, com a finalidade de proteção do referido dreno, assim como para dar início à fase operacional da pilha. A Figura 3 apresenta uma seção típica de composição do dreno.

Figura 3 Seção esquemática de dreno de fundo.

Fonte: Saliba e colaboradores, 2010.

Ainda no período de implantação da pilha, deve-se ter estruturas de contenção de sedimentos conforme projeto executivo, que podem ser cavas, bacias escavadas, diques ou qualquer outra forma de barramento, de forma a impedir o arraste de sólidos para porção à jusante da pilha. A Figura 4 apresenta um arranjo esquemático para a contenção de sedimentos de uma pilha de estéril.

Figura 4 Arranjo geral e seção-tipo de uma bacia de contenção e decantação de sedimentos.

Fonte: Sete, 2010.

Após implantação das obras de infraestrutura e com a licença de operação (LO) emitida pelo órgão ambiental inicia-se a formação da pilha com a disposição do estéril atendendo à geometria e às premissas definidas no Projeto Executivo.

3.2.1 Métodos construtivos de pilhas

A pilha pode ser construída de forma descendente ou ascendente, sendo esta última a mais indicada por garantir uma operação sistemática, agilidade operacional, elevação da produtividade com possibilidade de trabalho em diversas frentes (praças de descargas), aumento da segurança operacional, melhoria na estabilidade com eficiência na compactação, espalhamento e homogeneidade, evitando o retrabalho. (PETRONILHO,2010). A Figura 5 apresenta a ilustração da construção de uma pilha pelo método descendente.

Figura 5 Construção de pilha pelo método descendente.



Fonte: Nunes, 2014.

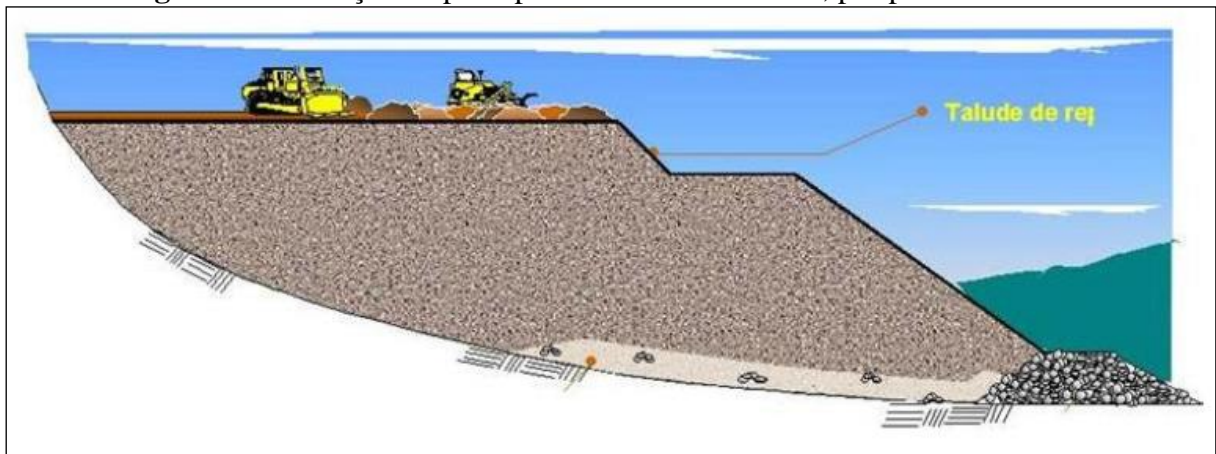
A construção de pilha pelo método ascendente, dependendo da situação, pode ser executada por duas metodologias de lançamento, a saber: empilhamento ou ponta de aterro. A primeira proposta é iniciar a disposição do estéril em montes enfileirados, e depois espalhar (e compactar) estes montes com trator de esteira até que se conclua o banco. Outra proposta é executar os bancos em ponta de aterro e com lançamento do material feito da parte interna para a externa da pilha, de modo a evitar represamento de chuva entre a pilha e o terreno natural (encosta). Os bancos são construídos conforme os parâmetros geométricos especificados no projeto executivo, como altura do banco, ângulo de repouso e largura de bermas, quando essa estrutura é formada por várias bancadas. (PETRONILHO,2010). As Figuras 6 e 7 apresentam a ilustração da construção de uma pilha pelo método ascendente por empilhamento e por ponta de aterro, respectivamente.

Figura 6 Construção de pilha pelo método ascendente em camadas, por empilhamento.



Fonte: Nunes, 2014.

Figura 7 Construção de pilha pelo método ascendente, por ponta de aterro.



Fonte: Nunes, 2014.

3.2.2 Drenagem superficial

A medida que a pilha vai se desenvolvendo torna-se necessário o controle de água superficial proveniente da precipitação ou de outra fonte, de modo a impedir a saturação dos taludes expostos, prevenindo o desenvolvimento de superfície freática dentro da pilha, protegendo a estrutura contra a perda de finos por erosão interna, além de minimizar erosões superficiais ou o desenvolvimento de rupturas por fluxo de água na superfície do talude. (PETRONILHO, 2010)

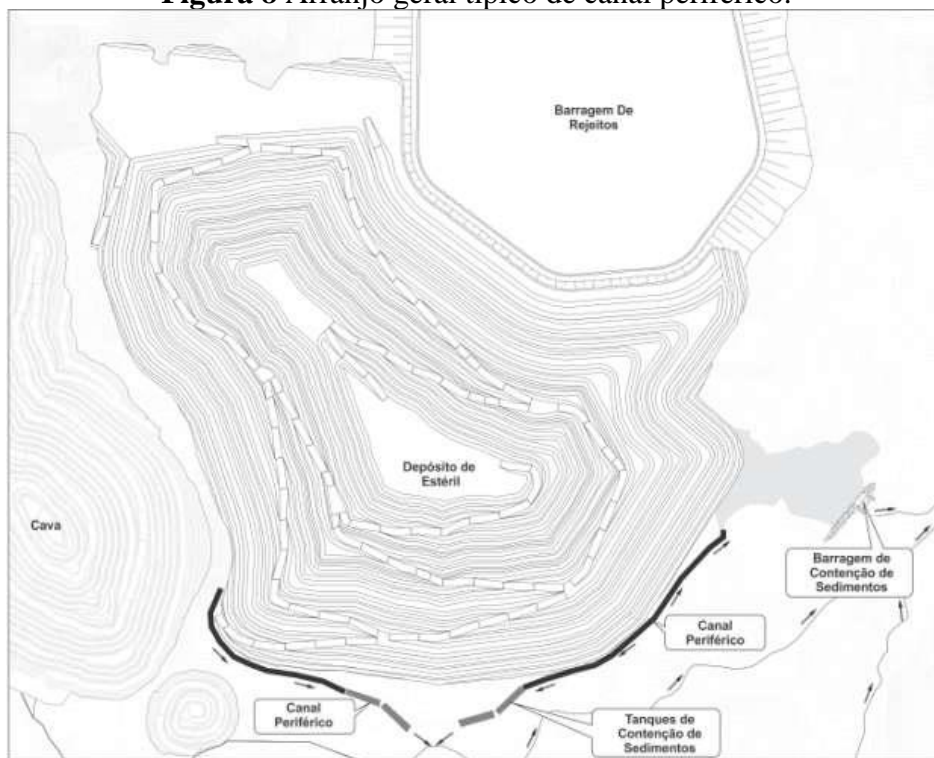
O controle do fluxo dessas águas é feito por meio de um sistema de drenagem superficial que capta e conduz os volumes de precipitação de maneira segura até a base, a fim de garantir sua integridade, reduzindo o desenvolvimento de processos erosivos, tanto na pilha quanto na

área a jusante.

Na concepção do sistema de drenagem superficial em minas a céu aberto, são adotados canais de escoamento ao redor da estrutura, e as bermas funcionam como canais, interceptando a chuva e conduzindo o escoamento superficial para descidas de água construídas em locais estratégicos conforme estipulado em projeto. (PETRONILHO, 2010)

Na borda das bermas são previstas leiras de proteção que permitem uma pequena sobre-elevação do nível de água, propiciando um incremento na capacidade de escoamento na seção da berma, e com isso evitar o seu vertimento sobre os taludes. A Figura 8 apresenta um arranjo geral típico de canal periférico construído em pilha.

Figura 8 Arranjo geral típico de canal periférico.



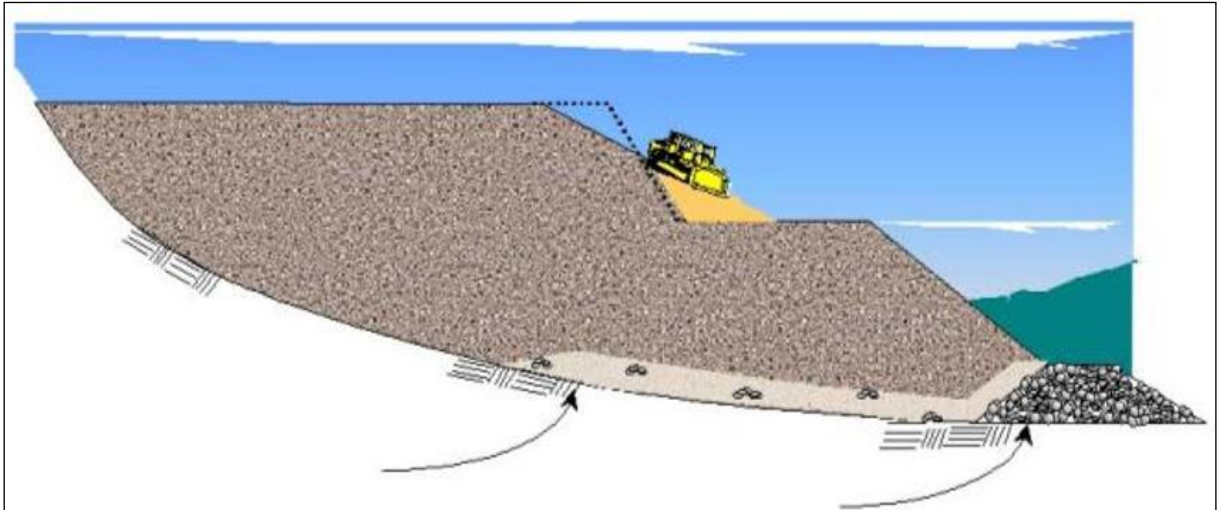
Fonte: Pinheiro, 2011.

3.2.3 Desativação de pilhas

Quando o avanço da disposição atingir o limite externo da pilha indicado no Projeto, dar-se-á sequência no projeto de desativação da estrutura, devendo-se providenciar o rebatimento do talude e sua recuperação vegetal. O rebatimento, que é a suavização do talude, aumenta a estabilidade e compacta o solo solto na superfície, reduzindo efeitos erosivos, e também facilita o plantio, melhora a condição de fixação da vegetação e possibilita o tráfego de equipamentos (rampas mais suaves). A Figura 9 apresenta a ilustração da execução de

rebatimento em talude de pilha.

Figura 9 Execução do rebatimento do talude de uma pilha.



Fonte: Nunes, 2014.

3.3 PROCESSOS EROSIVOS

O solo é a parte superficial da litosfera onde as plantas podem encontrar os nutrientes necessários para germinar. É constituído de três fases, sendo elas sólida – matéria orgânica e minerais -, líquida – solução do solo – e gasosa – ar. (LAL et al.,2004)

As propriedades do solo são usualmente classificadas como – físicas (textura, estrutura, permeabilidade, densidade, porosidade, peso específico, dentre outras), químicas e biológicas. Estas propriedades são fatores determinantes da sua resistência à erosão, que é um processo usualmente decorrente das atividades minerárias.

O termo erosão provém do latim *erodere* e significa “corroer”. A formação da erosão compreende num processo de desgaste da superfície terrestre (solo ou rocha), sendo os principais agentes dessa transformação o clima, a água, o vento, o relevo, os organismos vivos (plantas e animais), além da ação antrópica (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2006).

Em empreendimentos minerários, a erosão é um efeito de operações de remoção da cobertura vegetal e exposição das camadas superficiais, que ocorre nas atividades de decapeamento, implantação de barragens e pilhas de estéril/rejeito, abertura de acessos, etc.

A exposição ou remoção das camadas superficiais do solo durante as operações de mineração, através da remoção da vegetação, geram uma desestabilização quanto à ação das águas pluviais, fazendo com que os processos erosivos se acelerem.

As erosões, podem provocar perdas de um recurso natural, além de conduzir à degradação dos recursos hídricos, por conta de assoreamento, bem como a redução do gradiente hidráulico (FARIA et al., 2013).

O potencial da chuva, as condições de infiltração, o escoamento superficial, assim como a declividade e comprimento do talude ou encostas, são os fatores externos que provocam o processo erosivo. Já o gradiente crítico, a desagregabilidade e a erodibilidade do solo, compreendem os fatores internos, sendo que a erosividade da chuva e a erodibilidade do solo, são dois importantes fatores físicos que afetam a grandeza dos processos erosivos, pois mesmo que a chuva, a declividade do terreno e a cobertura vegetal sejam as mesmas, alguns solos são mais susceptíveis ao desagregamento e ao carreamento que outros, ou seja são mais erodíveis (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2006).

3.3.1 **Classificação das erosões**

As erosões se classificam em erosão natural ou geológica e em erosão acelerada ou antrópica, sendo que esta última se origina quando há interferência do homem e não é permitida ao solo a recuperação natural. (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2006)

Os processos erosivos acelerados é um dos processos do meio físico, predominante na dinâmica externa, que acontecem com mais frequência e provocam mais impacto. (FARIA et al., 2013)

Zachar (1982) propõe uma terminologia para a classificação dos principais tipos de erosão, enfatizando o caráter combinado entre os agentes erosivos e a ação da gravidade. O Quadro 1 mostra esta classificação definida por Zachar.

Quadro 1 Classificação da erosão pelos fatores ativos.

FATOR	TERMO
água	<i>erosão hídrica</i>
chuva	<i>erosão pluvial</i>
fluxo superficial	<i>erosão laminar</i>
fluxo concentrado	<i>erosão linear (sulco, ravina e voçoroca)</i>
rio	<i>erosão fluvial</i>
lago, reservatório	<i>erosão lacustrina ou límica</i>
mar	<i>erosão marinha</i>
geleira	<i>erosão glacial</i>
neve	<i>erosão nival</i>
vento	<i>erosão eólica</i>
terra, detritos	<i>erosão soligênica</i>
organismos	<i>erosão organogênica</i>
plantas	<i>erosão fitogênica</i>
animais	<i>erosão zoogênica</i>
homem	<i>erosão antropogênica</i>

Fonte: Adaptado de Zachar, 1982.

Camapum de Carvalho e colaboradores (2006), afirmam que o mais comum é classificar a erosão em quatro grupos, que são: erosão hídrica, erosão eólica, erosão glacial e erosão organogênica. As erosões hídricas, por sua vez são classificadas, segundo o seu estágio de evolução, em erosão superficial, interna e linear (sulco, ravina, voçoroca). O escoamento da água que não infiltra caracteriza a erosão superficial, também denominada de laminar, este tipo de erosão está associado ao transporte de sólidos pelo impacto das gotas de chuva, cuja dinâmica depende da densidade e da velocidade de escoamento, bem como da espessura da lâmina d'água e, principalmente, da inclinação da vertente ou relevo.

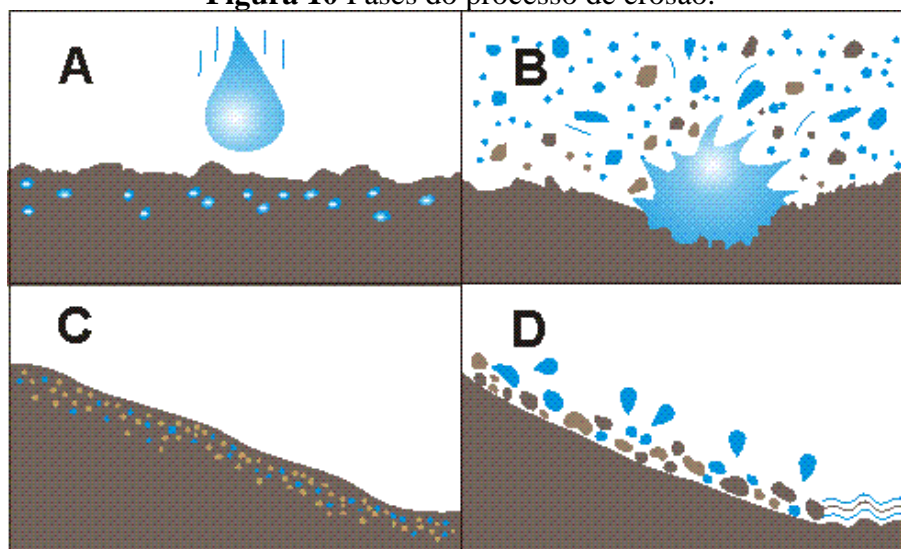
A Figura 10, demonstra as fases do processo de erosão, a partir do impacto da gota de chuva sobre o solo sem proteção vegetal, onde:

A – O impacto da gota de chuva sobre o solo sem proteção vegetal

B - Causa a fragmentação e formação de pequenas partículas

C - Que bloqueia os poros e formam uma superfície selada

D - A água que escorre carrega partículas de solo que são depositadas nas partes baixas onde a velocidade da água é reduzida. (Derpsch et al.,1990)

Figura 10 Fases do processo de erosão.

Fonte: Derpsch e colaboradores, 1990.

Os dois principais causadores da erosão pluvial são o escoamento superficial e o processo de desagregação da estrutura do solo, cuja causa tem relação com a precipitação pluviométrica de determinado local, sendo essa o elemento do clima mais importante no processo erosivo (EMBRAPA, 2004).

A variação da erosividade da água com o nível de sedimento que ela possui é outro aspecto relevante no processo erosivo, já que o fluido tem a tendência de diminuir sua capacidade de transporte quando ele tem ampliada a quantidade de partículas suspensas (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2006).

De acordo com Diaz (1992), a velocidade crítica para que a erosão ocorra tem a tendência de aumentar, à medida que a água passa da condição de limpa para com sedimento. A Tabela 1 apresenta esta relação.

Tabela 1 Influência da presença de sedimento na velocidade crítica de erosão.

Solo	V (água limpa) m/seg	V (água com sedimentos) m/seg
<i>Areia fina</i>	0,45	0,76
<i>Solo arenoso</i>	0,53	0,76
<i>Silte aluvial</i>	0,60	1,06
<i>Cinza vulcânica</i>	0,76	1,06
<i>Argila dura</i>	1,14	1,52
<i>Lutitas</i>	1,82	1,82
<i>Pedregulho fino</i>	0,76	1,52
<i>Pedregulho grosso</i>	1,22	1,82
<i>Cantos</i>	1,52	1,67

Fonte: Diaz, 1992.

Para Salomão (2010), as classes suscetíveis à erosão laminar são determinadas, principalmente a partir da erodibilidade dos solos e de declividades das encostas. O Quadro 2 apresenta essas classes de suscetibilidade de forma resumida.

Quadro 2 Descrição resumida das classes suscetíveis à erosão laminar.

Classes de suscetibilidade	Descrição
Classe I Extremamente suscetível	Corresponde às classes VII e VIII de capacidade de uso das terras, onde os terrenos apresentam problemas complexos de conservação, indicados para preservação ou para reflorestamento.
Classe II Muito suscetível	Corresponde à classe VI de capacidade de uso das terras, onde os terrenos apresentam problemas complexos de conservação, parcialmente favoráveis à ocupação por pastagens, sendo mais apropriados para reflorestamento.
Classe III Moderadamente suscetível	Corresponde à classe IV de capacidade de uso das terras, onde os terrenos apresentam problemas complexos de conservação, sendo mais indicados a pastagens e culturas perenes.
Classe IV Pouco suscetível	Corresponde à classe III de capacidade de uso das terras, onde os terrenos apresentam problemas complexos de conservação, sendo mais indicados a pastagens e culturas perenes e, eventualmente, a culturas anuais, porém exigindo práticas intensivas mecanizadas de controle de erosão.
Classe V Pouco a não suscetível	Corresponde às classes I, II e V de capacidade de uso das terras. A classe I de capacidade de uso corresponde a terrenos sem problemas especiais de conservação, podendo ser utilizados com qualquer tipo de cultura; a classe II corresponde a terrenos com problemas simples de conservação, podendo também ser utilizados com qualquer tipo de cultura, porém exigindo práticas não mecanizadas de controle de erosão; a classe V corresponde a terrenos sem problemas de conservação, mas exigindo técnicas especiais de cultivo, por se constituírem de solos encharcados.

Fonte: Salomão, 2010.

3.4 HIDROSEDIMENTOLOGIA

A hidrossedimentologia consiste no estudo dos processos relacionados à dinâmica da água e dos sedimentos associados a ela na fase terrestre do ciclo hidrológico. O termo sedimento se refere à partícula depositada, quando se fala no seu sentido semântico. Sedimentologia é a disciplina que estuda os sedimentos, levando em conta os processos hidroclimatológicos, enfatizando a relação água-sedimento, ou mesmo outros aspectos como aqueles tratados em Geologia, Agronomia e Mecânica dos Solos. Sedimentação se refere aos processos derivados do sedimento, abrangendo erosão, transporte nos cursos d'água e deposição do sedimento. É comum se referir à sedimentação somente aos aspectos de assoreamento nos reservatórios. (CARVALHO, 2008, p3).

3.4.1 Transporte de sedimento

O transporte de sedimentos se processa nos cursos d'água, e Carvalho (2008) verificou que o transporte de sedimento no período de chuvas é em torno de 70% a 90%, ainda mais quando as precipitações são fortes.

As formas de transporte de sólido são discutidas separadamente porque o fenômeno não está suficientemente entendido para permitir uma explicação completa e inter-relacionada. Enquanto o transporte em suspensão é uma função predominante da velocidade da corrente, o transporte do leito é muito influenciado pelo atrito que atua no seu deslocamento (CARVALHO, 2008).

O Quadro 3 apresenta as definições mais usadas para os tipos de sedimentos transportados.

Quadro 3 Definições dos tipos de sedimento.

Tipo de Sedimento	Definição
Carga sólida de arrasto	São as partículas de sedimento que rolam ou escorregam longitudinalmente no curso d'água. As partículas estão em contato com o leito praticamente todo o tempo
Carga sólida saltante	São as partículas que pulam ao longo do curso d'água por efeito da correnteza ou devido ao impacto de outras partículas. O impulso inicial que arremessa uma partícula na correnteza pode ser devido ao impacto de uma na outra, o rolamento de uma por cima da outra ou o fluxo de água sobre a superfície curva de uma partícula, criando assim uma pressão negativa
Carga sólida em suspensão	São as partículas que estão suportadas pelas componentes verticais das velocidades do fluxo turbulento, enquanto estão sendo transportadas pelas componentes horizontais dessas velocidades, sendo pequenas suficientemente para permanecerem em suspensão, subindo e descendo na corrente acima do leito. O movimento da partícula em suspensão é mais complexo do que a do leito

Fonte: Subcommittee on Sedimentation, 1963.

Os sedimentos que chegam ao curso d'água têm diversas granulometrias e sofrem um processo de transporte variado de acordo com as condições locais e do escoamento, por isso é de fundamental importância conhecer as características do sedimento transportado, como o comportamento, a qualidade e a quantidade, afim de subsidiar estudos na bacia, seja para

projetos de obras hidráulicas, estudos ambientais e usos de recursos hídricos. (CARVALHO, 2008).

De acordo com Glysson (1987), uma onda é formada no curso d'água, dependendo da quantidade de sedimento transportado, e essa onda acompanha a enchente de formas diferentes:

- O pico com a carga sólida se atrasa em relação à vazão;
- O pico com a carga sólida se iguala no movimento;
- O pico segue na frente da maior vazão, porém o mais comum é o pico de sedimentos se antecipar ao pico de enchente.

3.5 MODELAGEM HIDROLÓGICA

Os estudos hidrológicos de bacias hidrográficas são necessários para que haja compreensão do funcionamento do balanço hídrico nessas bacias, os processos que regulam os movimentos da água e os impactos provocados no uso da terra, na quantidade e qualidade da água. (WHITEHEAD E ROBINSON, 1993).

Segundo Zakia (1998):

- a) A quantidade de água produzida em uma bacia hidrográfica é diretamente influenciada pelo tamanho da bacia;
- b) A taxa ou o regime da produção de água e a taxa de sedimentação são influenciados pela forma e o relevo da bacia;
- c) A quantidade de sedimento e a taxa de formação do deflúvio são influenciados pelo padrão de drenagem.

O balanço hídrico é caracterizado pela diferença entre a quantidade de água que entra no sistema, pela quantidade de água que sai do mesmo, de forma controlada. Segundo Fagundes (2005), as variáveis envolvidas no balanço hídrico são:

a) **Precipitação** – é a principal entrada hídrica dentro do ciclo hidrológico, pode ser em forma de chuva, granizo, geada, entre outras. No Brasil a chuva é a forma mais comum de precipitação. Para se caracterizar a precipitação algumas grandezas devem ser levadas em consideração, como: altura pluviométrica, duração das chuvas, intensidade e frequência, ao longo de uma série histórica.

b) **Evapotranspiração** – Representada pelos fenômenos de evaporação e transpiração. A evaporação consiste no processo físico de transformação da água em estado líquido para vapor. A transpiração, por sua vez, corresponde à perda de água para a atmosfera em forma de

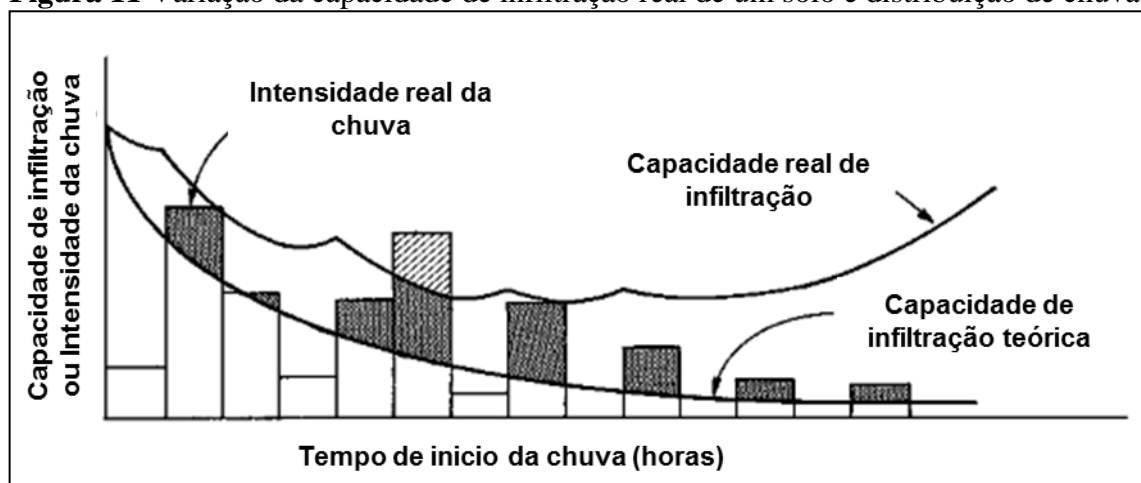
vapor devido às necessidades fisiológicas das plantas. Como são dois fenômenos complexos e de difícil distinção entre eles, são considerados no ciclo como um único processo, a evapotranspiração.

c) **Infiltração** – é a capacidade do solo de absorver água, influenciada, por fatores como declividade do terreno e tipo de solo existentes.

d) **Escoamento superficial** – quando o solo perde sua capacidade de infiltração, seja pelo tipo de solo ou por saturação do mesmo, o volume excedente de água passa a escoar pela superfície, caracterizando o escoamento superficial.

Na Figura 11 é mostrada a curva de capacidade de infiltração real de um solo dado um certo padrão de chuva. Nota-se que a área marcada representa a água que excedeu a capacidade de infiltração deste solo, resultando, portanto, em escoamento superficial.

Figura 11 Variação da capacidade de infiltração real de um solo e distribuição de chuva.

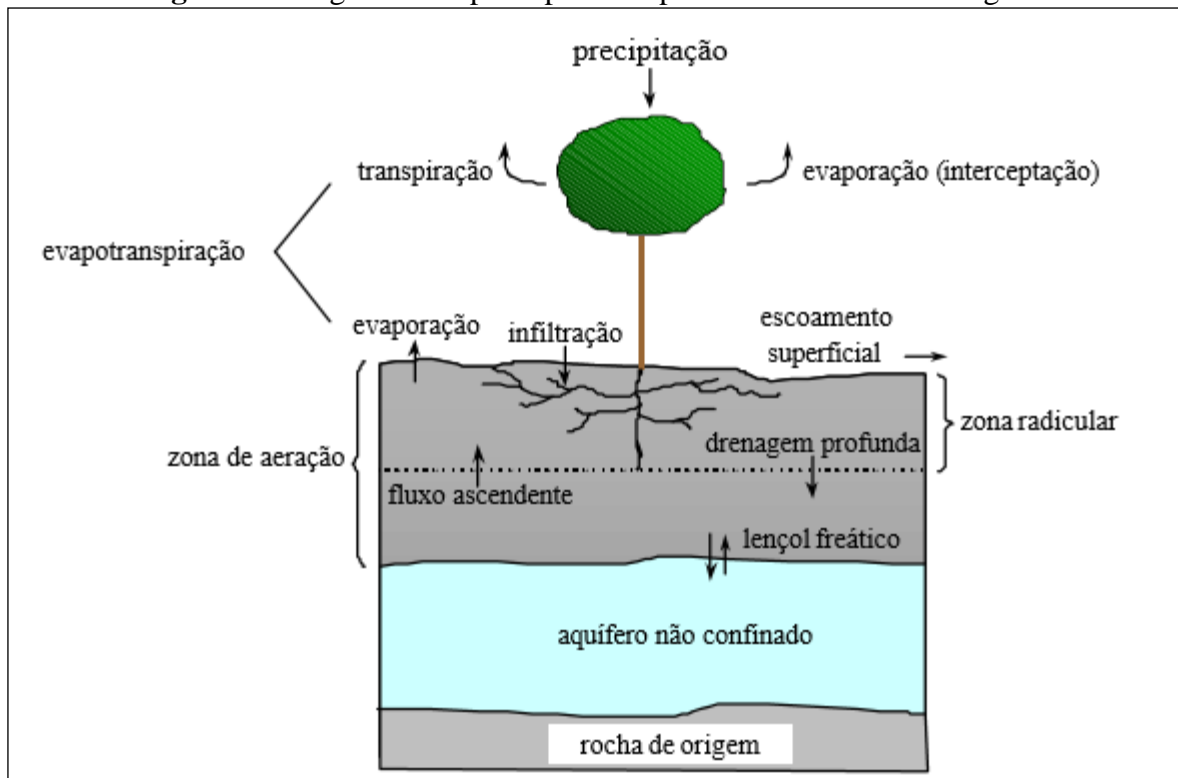


Fonte: Adaptado de Hewlett, 1982.

e) **Escoamento subterrâneo** – a presença de água subterrânea tem origem ou pela infiltração ou pela percolação de água pluviais e/ou superficiais. O escoamento subterrâneo acontece majoritariamente na zona saturada e se processa pelos vazios ou poros interconectados devido às diferenças de potencial hidráulico.

Para melhor entender os modelos hidrológicos, é necessário analisar os componentes envolvidos no ciclo hidrológico. A Figura 12 apresenta o esquema dos principais componentes envolvidos no ciclo hidrológico.

Figura 12 Diagrama dos principais componentes do ciclo hidrológico.



Fonte: Rennó & Soares, 2000.

3.5.1 Tipos de modelos hidrológicos

Os modelos hidrológicos e hidrossedimentológicos são ferramentas capazes de simular processos do ciclo hidrológico e hidrossedimentológico, sendo um dos seus objetivos prever o efeito do uso e manejo do solo e da precipitação no regime de variação de vazões e na produção e transporte de sedimentos ao longo da bacia hidrográfica. (ROSA, 2016)

De acordo com Machado (2005), um modelo matemático consiste em representar, de forma simplificada, o comportamento de um sistema físico complexo, por meio de equações. Onde modelar é avaliar coerentemente, os resultados possíveis de um sistema, por meio de representações simplificadas do comportamento ou da estrutura e das transformações internas deste sistema.

Modelos hidrológicos são ferramentas científicas desenvolvidas para melhor entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica. São inúmeros os modelos utilizados na Engenharia. Segue abaixo uma síntese dos conceitos de alguns tipos de modelos, elaborada a partir de autores clássicos do tema hidrologia, como RIGHETTO (1998), TUCCI (1998) e LINSLEY (1981):

- a) **Modelo Determinístico:** sempre produzirá o mesmo resultado já que as fases do ciclo hidrológico são descritas por equações que não contêm componentes aleatórias;
- b) **Modelo Estocástico ou Probabilístico:** as equações que descrevem o fenômeno contêm variáveis aleatória, por meio de distribuição probabilística;
- c) **Modelo com embasamento físico:** Possui equações matemáticas que reproduzem todos os processos físicos. Diferencia-se por não necessitar de calibração para determinar os parâmetros e as constantes das equações. Restringe-se pela dificuldade de obter os parâmetros necessários para sua utilização.
- d) **Modelo Conceitual e Semiconceitual:** De forma simplificada, busca representar os processos físicos do ciclo hidrológico, baseado no entendimento conceitual do ciclo.
- e) **Modelo Empírico ou “Caixa Preta” (Black Box):** Resultados obtidos a partir de funções matemáticas ajustadas, cuja finalidade não é explicar os processos envolvidos, mas sim representações estatísticas.
- f) **Modelo Contínuo:** Utilizado para simulações de longos períodos de tempo e deve considerar acúmulo de umidade no solo.
- g) **Modelo de Evento:** Este modelo simula um evento individual de acordo com as condições iniciais.
- h) **Modelo Concentrado (lumped):** Considera os dados de entrada e os parâmetros representativos da bacia como valores médios, válidos para toda área de estudo.
- i) **Modelo Distribuído:** Os dados de entrada variam no espaço, assim como as características da bacia, e podem ser distribuídas em sub-bacias.
- j) **Modelo Simplificado:** Para diminuir o processamento computacional, faz uso de algoritmos simplificados ou usa grandes incrementos de tempo.

3.5.1.1 Modelos “chuva-vazão”

De acordo com Tucci (2005), os modelos “chuva-vazão” são utilizados para converter a precipitação que ocorre no ciclo hidrológico em vazão. Com o objetivo de compreender melhor o ciclo hidrológico em uma bacia hidrográfica, os modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão buscam representar os fenômenos físicos que ocorrem na bacia, assim como simular impactos causados por inundações, mudança na cobertura do solo, supressões vegetais, poluição, erosões, entre outros. O desenvolvimento e uso de duas grandes classes de modelos,

que são os modelos concentrados e distribuídos, têm sido os principais propulsores para a evolução do tema (PACA, 2008).

Os modelos do tipo chuva-vazão concentrados utilizam variáveis que representam valores médios da bacia. Nesse caso, usa-se o artifício de subdividir a bacia em várias sub-bacias ou regiões, sendo que cada informação que variar no espaço, exigirá uma subdivisão diferente da bacia, levando-se em consideração as informações mais importantes. Ou de outra forma, uma subdivisão da bacia que permita uma representação fiel da região, fará com que a calibração, validação e operação do modelo sejam mais trabalhosas. A limitação desse tipo de modelo, é a não representação da variabilidade espacial das informações hidrometeorológicas, topográficas e de cobertura e uso do solo, motivo pelo qual apareceram, os modelos chuva-vazão chamados distribuídos, onde essa variação espacial é considerada, por meio da divisão da bacia em células. (DI BELLO, 2005)

Os modelos do tipo chuva-vazão distribuídos exigem dados que nem sempre existem, para a sua calibração. Beven (1989), listou as suas principais limitações:

- a) As equações utilizadas são baseadas na física de pequena escala de laboratório, e em bacias ideais, homogêneas e estacionárias, fazendo com que a representatividade de sua parametrização seja duvidosa;
- b) Possui natureza complexa e necessita de muitos dados para sua calibração;
- c) Incerteza de parâmetros estimados.

3.5.1.2 Método racional

O método racional foi apresentado por Mulvaney em 1851, e consiste em modelos bastantes simplificados e muito utilizados em projetos de drenagem para estimativa de vazão em pequenas bacias.

De acordo com Pinheiro (2011) este método se baseia no conceito da continuidade de vazões ($Q = A \cdot v$), considerando o termo de velocidade como sendo a intensidade da chuva de projeto, com dimensão $[L.T^{-1}]$. A fórmula de aplicação do método é dada abaixo na equação (3), inserindo-se as abstrações hidrológicas no termo do coeficiente de escoamento superficial:

$$Q_p = 0,278 \cdot C \cdot i \cdot A \quad (1)$$

onde:

Q_P é a vazão de pico ou vazão superficial máxima (m^3/s);

C é o coeficiente de escoamento superficial (adimensional);

i é a intensidade de chuva (mm/h) referente ao tempo t_C ;

A é a área da bacia (km^2);

Observação: t_C é o tempo de concentração, que ocorre quando a intensidade é máxima e a vazão é máxima, já que neste tempo toda a bacia está contribuindo;

A premissa básica do método racional é a adoção da intensidade da chuva de projeto com uma duração igual ao tempo de concentração t_C da bacia hidrográfica.

O coeficiente de escoamento superficial C é definido em função das tipologias de uso e ocupação do solo. A Tabela 2 apresenta os valores do coeficiente C utilizados em dimensionamento de obras hidráulicas em mineração.

Tabela 2 Valores de coeficiente de escoamento superficial.

TIPOLOGIA DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	COEFICIENTE DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL
Sem vegetação (solo exposto)	0,65 / 0,40
Campo natural (vegetação baixa)	0,50 / 0,30
Arbusto cerrado (vegetação média)	0,45 / 0,30
Florestas e matas densas	0,05 / 0,20
Áreas de cultivo (sem curvas de nível)	0,35 / 0,25
Cava	0,60 / 0,70
Pilhas de estéril (fase inicial, superfície exposta)	0,60 / 0,50
Pilhas de estéril (fase final, c/ cobertura vegetal)	0,50 / 0,30
Taludes de barragens gramados	0,50 / 0,30

Fonte: Pinheiro, 2011.

O método tem como limitação a aplicabilidade apenas para pequenas bacias hidrográficas, com área de drenagem $A < 1,0 km^2$. Entretanto, existem adaptações para aplicação em bacias com áreas de até $10 km^2$, empregando a formulação abaixo (4), na qual se insere um coeficiente de retardo Φ :

$$Q_P = 0,278 \cdot C \cdot i \cdot A \cdot \Phi \quad (2)$$

Dentre as formulações sugeridas para o cálculo do coeficiente de retardo, pode-se adotar:

$$\Phi = \frac{1}{\sqrt[n]{A}} \quad (3)$$

Nessa equação, a área de drenagem **A** é dada em hectares (ha) e **n** é um parâmetro que pode assumir os seguintes valores:

- n = 4 para bacias com talvegue principal com baixas declividades, inferiores a 0,5%
- n = 5 para bacias com talvegue principal com declividades entre 0,5% e 1,0%
- n = 6 para bacias com talvegue principal com declividades superiores a 1,0%

3.5.1.3 Método do Hidrograma Unitário Sintético

O hidrograma unitário foi proposto pela primeira vez por Sherman (1932) e representa o hidrograma de escoamento superficial correspondente a uma precipitação efetiva de 1 mm (pulso unitário) e pode ser aplicado como operador de uma bacia hidrográfica, para gerar hidrogramas de cheias correspondentes a precipitações efetivas de quaisquer magnitudes e durações. (SILVEIRA, 2015)

Sob o enfoque puramente teórico, o hidrograma unitário pode ser calculado a partir de registros simultâneos de chuva e de vazão, considerando dados de monitoramento contínuo (pluviógrafo e linígrafo) na bacia hidrográfica. Essa condição de monitoramento simultâneo praticamente não existe nas pequenas bacias de interesse para as obras hidráulicas implantadas nas áreas de mineração, devendo assim ser aplicado o conceito de hidrograma unitário sintético. (PINHEIRO, 2011)

Snyder(1938) desenvolveu o Hidrograma Unitário Sintético (HUS), e desde então outras propostas surgiram, compondo três grupos principais de acordo com Chow, Maidment e Mays (1988): tipos 1 e 2 usam parâmetros empíricos que, normalmente, são válidos para uma bacia ou região particular; os do tipo 3, baseados na validade da adimensionalização de vazões e tempos do hidrograma (hidrogramas unitários adimensionais, como o do SCS, 1972) (SILVEIRA, 2015).

De acordo com Pinheiro (2011), o método do SCS – Soil Conservation Service, é o mais indicado para bacias que apresentem muitas intervenções (pilhas e estradas de acesso) e áreas

impermeáveis (estradas pavimentadas, galpões industriais e escritórios). E para bacias em condições mais naturais, o método de Clark (1945) apresenta-se mais adequado. Abaixo seguem as premissas adotadas nos cálculos de síntese de hidrogramas unitários:

- a) O intervalo de tempo unitário deve ser de $\Delta t = t_c/5$, sendo t_c o tempo de concentração da bacia.
- b) Adotar o intervalo unitário para a discretização da chuva de projeto e composição de ietogramas.
- c) A duração total da chuva de projeto deve ser maior que o tempo de concentração da bacia (duração crítica da chuva de projeto).
- d) Adicionar chuvas de projeto progressivamente maiores que 2 dias para reservatórios com elevada inércia volumétrica, cuja duração crítica não seja alcançada de imediato;
- e) A chuva incidente sobre a bacia resulta em escoamento superficial, ou escoamento tipo hortoniano, e tende a ser nulo para bacias cobertas com florestas tropicais ou com terrenos planos e arenosos

3.5.1.4 Modelo USLE

A USLE (Universal Soil Loss Equation), em português conhecida como EUPS (Equação Universal de Perda de Solo) é uma equação utilizada na previsão da erosão hídrica. Foi proposta, em 1954 nos Estados Unidos por W. H. Wischmeier, D. D. Smith e outros pesquisadores do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), do Serviço de Conservação do Solo (SCS) e da Universidade de Purdue. No ano de 1978, com o intuito de melhorar as estimativas das perdas de solo, a equação foi revisada. (Bertoni & Lombardi Neto, 2010). O modelo USLE é utilizado como ferramenta conservacionista e permite estimar a perda média anual de solo levando em consideração os fatores clima, solo, topografia, uso e o manejo do solo (Pruski, 2009). A USLE segue apresentada na Equação X.

$$PS = R \times K \times L \times S \times C \times P$$

(4)

Onde:

PS é a perda de solo por unidade de área, em $Mg \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$

R é o fator erosividade das chuvas, em $MJ \text{ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$

K é o fator erodibilidade do solo, em $Mg \text{ h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$

L é o fator comprimento de encosta, em metros

S é o fator declividade, em porcentagem

C é o fator uso e manejo do solo, adimensional

P é o fator práticas conservacionistas, adimensional.

Tendo em vista os objetivos deste trabalho, apenas os fatores erosividade (R) e erodibilidade (K) serão aprofundados. Sendo que o fator de erosividade (R) representa a erosividade da chuva, pois o clima é um fator ambiental a ser considerado na modelagem da erosão hídrica pela USLE. O índice de erosividade média anual é obtido pela soma dos valores mensais. Assim, o valor do fator de erosividade R é usualmente determinado pela média dos valores anuais do EI30 de um longo período de tempo, conforme Equação 5. (Bertoni & Lombardi Neto, 2010)

$$EI30 = 67,355 \left(\frac{p^2}{P} \right)^{0,85} \quad (5)$$

Onde:

EI = média mensal do índice de erosividade, em MJ mm há⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹

p = média mensal de precipitação, em mm

P = média anual de precipitação, em mm

Carvalho (2008) propôs a interpretação dos valores de erosividade conforme classes de intensidade. Essa interpretação segue apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 Classificação da erosividade em relação à intensidade.

Erosividade (R) (MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹ ano ⁻¹)	Classes de intensidade
R ≤ 2452	Baixa
2452 < R ≤ 4905	Média
4905 < R ≤ 7357	Média a Forte
7357 < R ≤ 9810	Forte
R > 9810	Muito Forte

Fonte: Carvalho, 2008.

O fator de erodibilidade (K), é outro fator ambiental, que representa o grau de resistência do solo à erosão. É uma propriedade inerente a cada tipo de solo, e que depende dos seus atributos mineralógicos, químicos, morfológicos e físicos, que interferem na velocidade de

infiltração e na capacidade de armazenamento de água nos horizontes, nas forças de resistência do solo ao salpicamento, dispersão e transporte pela ação das chuvas e do escoamento superficial (Bertoni & Lombardi Neto, 2010).

A utilização de equações de regressão para a determinação do fator de erodibilidade (K) trata-se de um método rápido, porém, boa parte das equações necessita de ajuste para as condições de solos tropicais, podendo não apresentar bons resultados devido às diferenças texturais encontradas principalmente em Latossolos brasileiros (Pruski, 2009; Castro et al., 2011). Atualmente, no Brasil, existem vários tipos de solos cuja erodibilidade já foi determinada. (Calixto, 2013).

Mannigel e colaboradores (2002) propôs a classificação dos solos em função do fator de erodibilidade e classes de intensidade. Essa classificação segue apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 Classificação do potencial de erosão dos solos em função do fator de erodibilidade (K).

Classe	Fator K (Mg ha h ha ⁻¹ MJ ⁻¹ mm ⁻¹)
Extremamente alto	>0,0600
Muito Alto	0,0450 – 0,0600
Alto	0,0300 – 0,0450
Médio	0,0150 – 0,0300
Baixo	0,0090 – 0,0150
Muito baixo	<0,0090

Fonte: Mannigel e colaboradores (2002).

4 ÁREA DE ESTUDO

A Pilha de Disposição de Estéril Noroeste II (PDE NW II) foi escolhida para estudo pois atende quesitos que permitem o objetivo deste trabalho. A pilha está situada ao norte da Província Mineral de Carajás, foi implantada em 2007, classificada como pilha operacional, e atualmente possui cerca de 215,00 m de altura, área ocupada de 1.096,42 há, e um volume 89Mm^3 de estéril disposto ao longo de 10 anos. A pilha recebe estéril oriundo do decapeamento de jazidas de minério de ferro, compreendida de rochas e solos da formação. A Figura 13 apresenta o mapa de localização da pilha noroeste II.

Figura 13 Mapa de localização da PDE NW II.



Fonte: Google Earth, 2015.

Para a escolha da PDE NW II foram considerados os seguintes critérios:

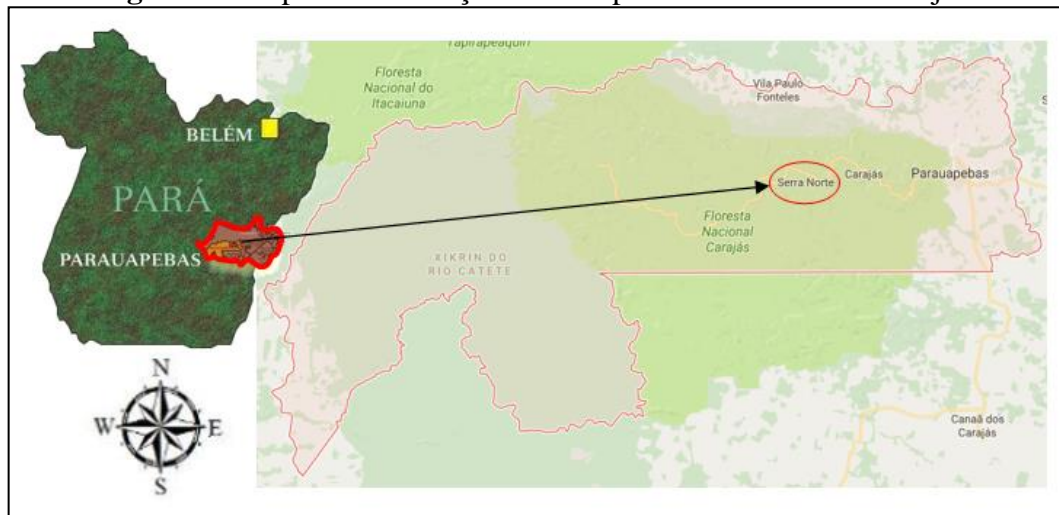
- Pilhas que ainda tivessem em operação, mas que possuísem bancos em situação final;
- Pilhas que já tivessem bancos recuperados vegetalmente;
- Pilhas com dreno interno instalado e em operação;
- Pilhas com drenagem superficial construída, mesmo que parcialmente;
- Pilhas que possuísem estrutura de contenção de sedimento;
- Pilhas com documentação existente desde a fase de projeto.

A aplicação desses critérios objetiva mostrar como cada componente desses participa no funcionamento da pilha, sob a ótica da formação do processo erosivo e transporte de sedimento no contexto do ciclo hidrológico.

A Província Mineral de Carajás é composta por diversos corpos mineralizados situados em três serras principais, assim denominadas: Serra Norte, Serra Sul e Serra Leste, todas pertencentes ao estado do Pará.

A estrutura estudada neste trabalho pertence a Serra Norte, que faz parte do conhecido Complexo Minerador de Carajás, localizado na região sudeste do estado do Pará, mais precisamente no município de Parauapebas, que está distante cerca de 800 km da Capital Belém. A Figura 14 apresenta um mapa de localização do Complexo Minerador de Carajás, em Serra Norte.

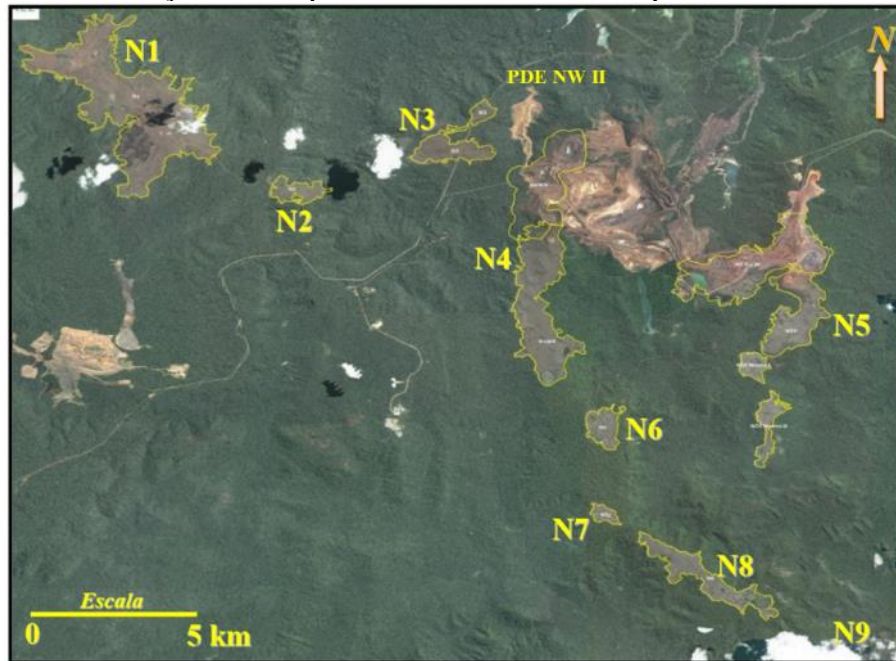
Figura 14 Mapa de localização do Complexo Minerador de Carajás.



Fonte: Própria.

O Complexo Minerador de Carajás é formado por nove corpos mineralizados, nomeados de N1 a N9. Atualmente as atividades de extração mineral estão concentradas nos corpos de N4 e N5, ocupando uma área aproximada de 4.895 hectares, onde possui várias estruturas geotécnicas para viabilizar a produção de minério de ferro, dentre elas cavas, pilhas de disposição de estéril (PDE) e barragens. A figura 15 apresenta os corpos mineralizados identificados em Serra Norte.

Figura 15 Identificação dos corpos mineralizados do Complexo Minerador de Carajás.



Fonte: Adaptado de Gomes,2012.

4.1 PESQUISA DOCUMENTAL

Após a definição da pilha a ser estudada foi realizada a pesquisa documental da referida pilha, principalmente os projetos elaborados para a execução da mesma. A partir desses projetos, objetiva-se fazer uma análise mais detalhada da participação de cada componente na dinâmica erosiva da estrutura, bem como analisar a sua efetividade.

Para esse controle de eficácia, adicionalmente serão analisados os procedimentos operacionais de construção da estrutura.

4.1.1 Geometria da pilha

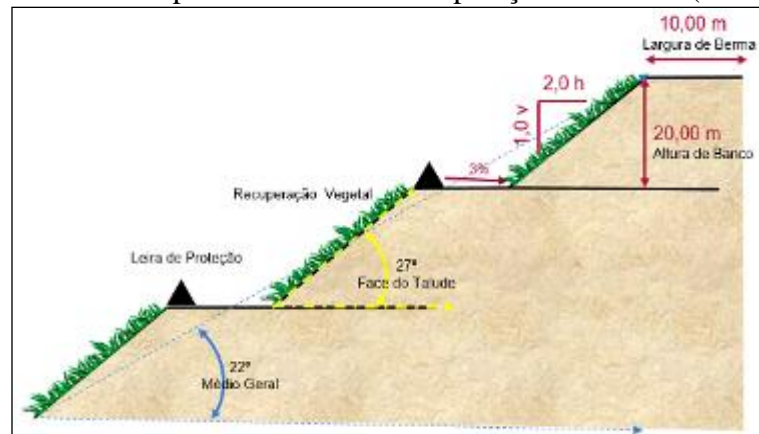
A pilha de estéril Noroeste II teve seu projeto desenvolvido anteriormente à revisão da NBR 13029 em 2006 que limitava a altura de pilhas de estéril em 200 metros, além de outros parâmetros. Com a revisão da norma, as restrições foram modificadas, ficando a geometria condicionada apenas ao fator de segurança mínimo para o tipo de estrutura. Com isso, em 2009 os projetos foram revisados de forma a adequá-los aos requisitos revisados da norma.

A Tabela 5 apresenta o resumo das características geométrica do arranjo final da PDE e a Figura 16 apresenta a geometria típica dessas características.

Tabela 5 Resumo das características geométricas de projeto para a fase final da PDE.

Taludes	Altura da bancada	20 m
	Largura da berma	10 m
	Ângulo de face	$\cong 27^\circ$ (2,0H:1,0V)
Ângulo entre bermas		$\cong 22^\circ$ (2,56H:1,0V)
Altura Máxima		335m
Elevação máxima da pilha		720m
Área total ocupada		197,1 ha ou 1,971 km ²
Volume geométrico (maximizado)		178,0 Mm ³
Declividades longitudinais das bermas		0,5% a 2,5%
Declividades transversais das bermas		3%

Fonte: Vale, 2009.

Figura 16 Geometria típica das Pilhas de Disposição de Estéril (Taludes Finais).

Fonte: Própria, 2017.

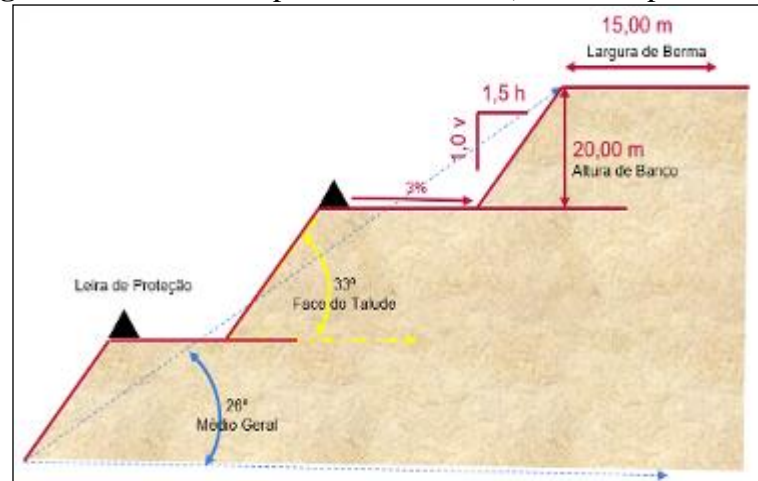
A Tabela 6 apresenta o resumo das características geométrica do arranjo operacional da PDE e a Figura 17 apresenta a geometria típica dessas características.

Tabela 6 Resumo das características geométricas na fase operacional da PDE.

Taludes	Altura da bancada	20m
	Largura da berma	15m
	Ângulo de face	$\cong 33^\circ$ (1,5H:1,0V)
Ângulo entre bermas		$\cong 21^\circ$ (2,56H:1,0V)
Altura Máxima		335m
Elevação máxima da pilha		720m
Área total ocupada		197,1 ha ou 1,971 km ²

Fonte: Vale, 2009.

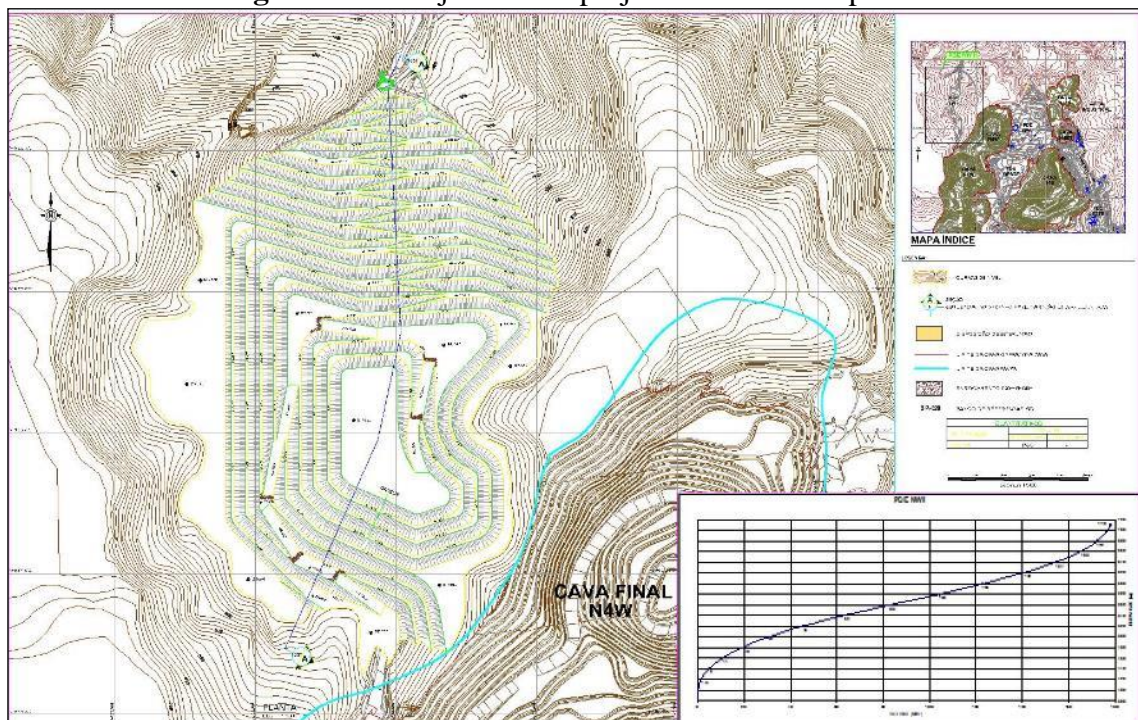
Figura 17 Geometria típica de uma PDE (Taludes Operacionais).



Fonte: Própria, 2017.

A partir dessas premissas pré-estabelecidas foi desenvolvido o arranjo geométrico da PDE NWII, de forma a maximizar o volume de disposição até a elevação 720 m. A Figura 18 apresenta o arranjo final da pilha.

Figura 18 Arranjo final do projeto executivo da pilha.

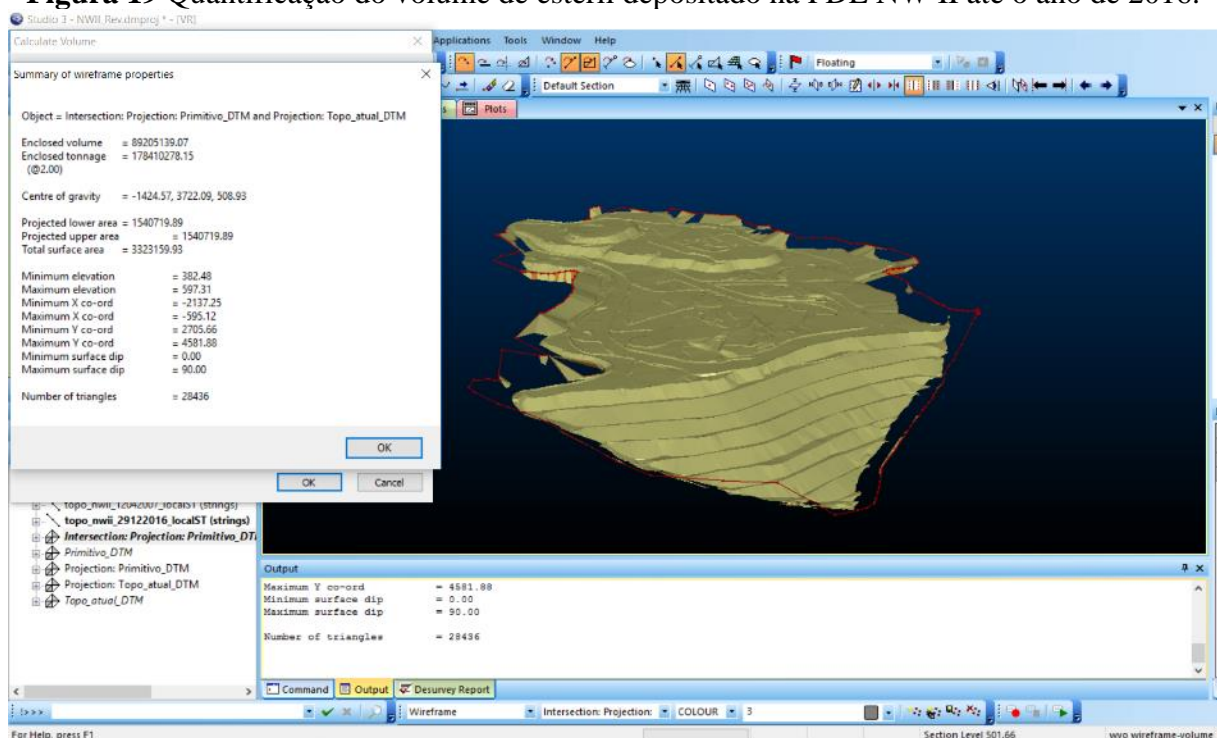


Fonte: Vale, 2009.

4.1.1.1 Cadastro topográfico da pilha na condição atual “As is”

A PDE NW II está em operação há pelo menos 10 anos, e ainda não atingiu o volume total de projeto, sendo que em 2016 acumulava um volume de aproximadamente 178 milhões de toneladas de estéril, conforme cálculo executado pelo software Studio 3 – Datamine, mediante comparação entre a topografia primitiva datada de 12/04/2007 e a topografia de 29/12/2016 da referida pilha. O resumo desse cálculo é apresentado na figura 19.

Figura 19 Quantificação do volume de estéril depositado na PDE NW II até o ano de 2016.

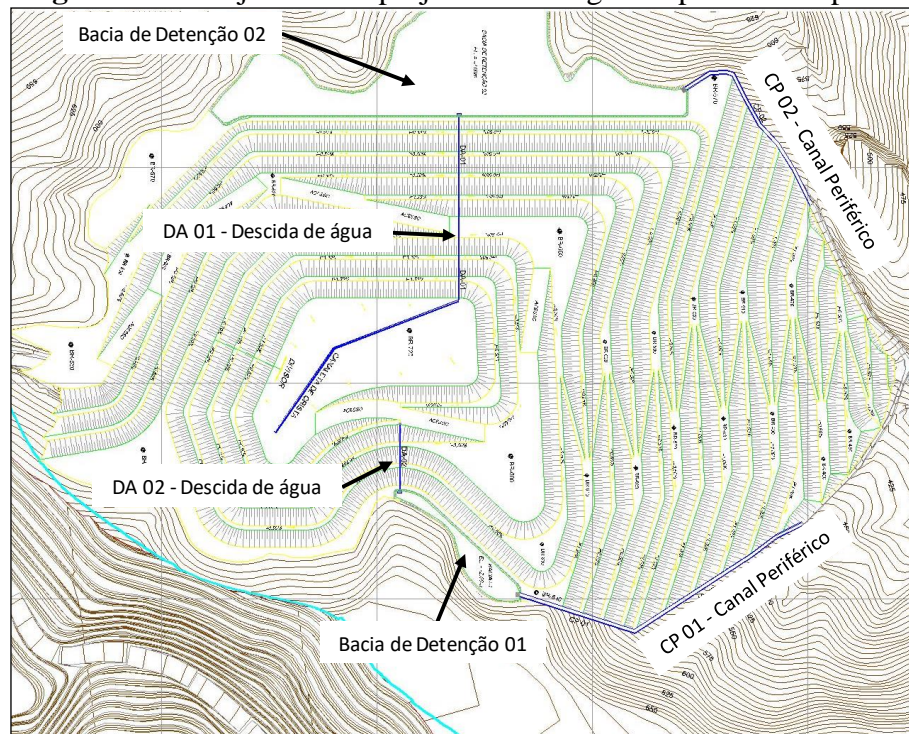


Fonte: própria, 2017.

4.1.2 Drenagem Superficial da PDE NW II

Na concepção do sistema de drenagem superficial adotada, o projeto prevê a utilização das bermas para a condução do escoamento superficial, a construção de descidas de água, canais periféricos e bacias de detenção. A Figura 20 apresenta o arranjo final da drenagem superficial da pilha gerado em 3D, com a devida identificação dos dispositivos.

Figura 20 Arranjo final do projeto de drenagem superficial da pilha.

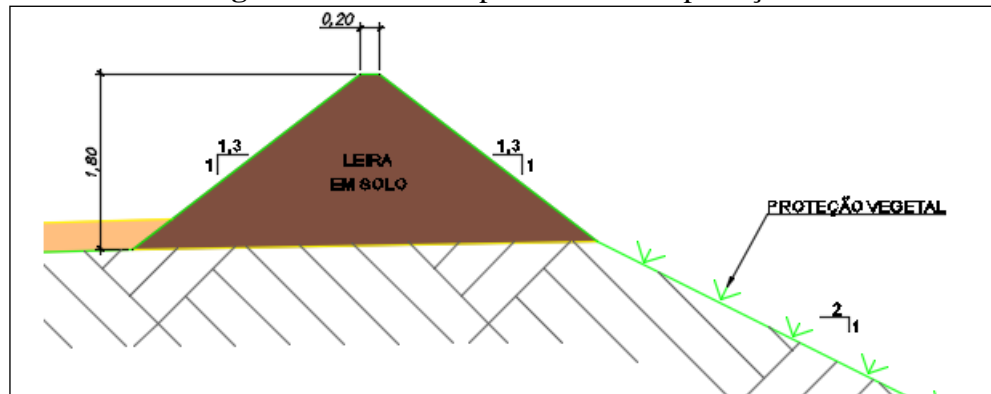


Fonte: Vale, 2009.

As bermas funcionam como canais, interceptando a chuva e conduzindo o escoamento superficial para as descidas de água. Cada berma tem como área de contribuição a sua própria área e a área do respectivo talude adjacente.

Na borda das bermas foram previstas leiras de proteção que permitem uma pequena sobre-elevação do nível de água, propiciando um incremento na capacidade de escoamento na seção da berma. A figura 21 apresenta detalhe de perfil transversal de leira proteção.

Figura 21 Detalhe Típico de leira de proteção.



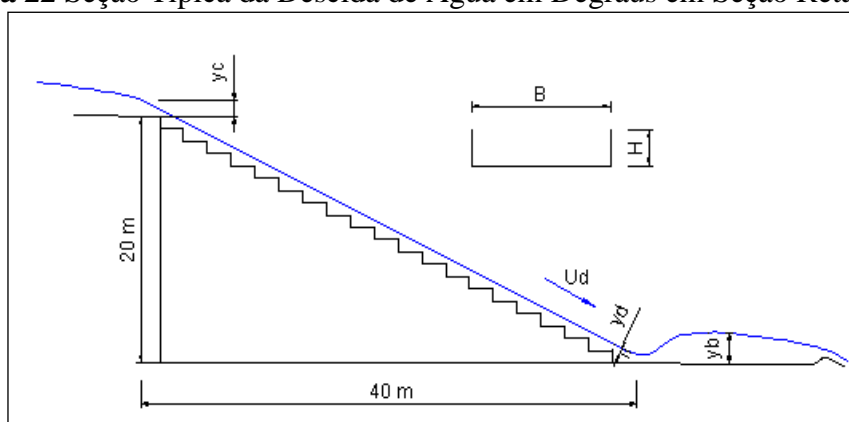
Fonte: Vale, 2009.

Segundo o projeto executivo (Vale, 2009) as bermas apresentam declividade longitudinal entre 0,5% e 2,5%, largura mínima igual a 10 m e declividade transversal de 5%, de forma a garantir o funcionamento como canal na capacidade máxima de projeto.

A verificação da capacidade de escoamento da seção transversal da berma foi realizada através do processo iterativo de determinação do tempo de concentração. Os valores máximos encontrados apresentaram-se iguais a 0,39 e 1,20 m/s para a lâmina de água e velocidade de escoamento na berma, compatíveis à geometria adotada, para a recorrência de 500 anos.

As descidas de água têm a função de captar as vazões provenientes das bermas e do topo da pilha, e conduzir a contribuição recebida em marcha para a base das pilhas. Para o projeto em questão foi adotada a construção de descidas em degraus com seção retangular revestida em concreto armado, para degraus com altura de 1,0 ou 1,5m. O número de descidas da pilha foi definido em função do comprimento crítico das bermas, e dimensionadas para tempo de retorno igual a 500 anos. A Figura 22 a seguir, apresenta as principais variáveis envolvidas no dimensionamento da descida de água.

Figura 22 Seção Típica da Descida de Água em Degraus em Seção Retangular.



Fonte: Vale, 2009.

O escoamento em degraus tem como objetivo vencer desníveis elevados e efetuar a dissipação da energia ao longo da descida, reduzindo o ressalto hidráulico nas bermas.

Na Tabela 7 é apresentada uma síntese dos resultados obtidos para o dimensionamento das descidas de água, mostrando a vazão de projeto calculada pelo método do Soil Conservation Service – SCS e as dimensões dos degraus.

Tabela 7 Tabela Resumo para as Descidas de Água em Degraus.

Identificação	Vazão de projeto	Descida em degraus				
		Dimensões			Variáveis hidráulicas	
		Base	Altura na descida	Altura dos degraus	Velocidade no pé	Profundidade no pé
		Q _p (m ³ /s)	B (m)	H (m)	h (m)	U _d (m/s)
DA-01	22,2	3,00	1,50	1,00	6,8	1,08
DA-02	7,0	1,50	1,00	1,00	6,0	0,79
CP-01	20,5	7,00	1,50	1,00	2,8 a 5,0	0,59 a 1,07
CP-02	25,4	7,00	1,50	1,00	3,1 a 5,5	0,66 a 1,17

Fonte: Vale, 2009

O nível atual da pilha, ainda não requer a construção das descidas de água previstas em projeto para o corpo da pilha, apenas os canais periféricos.

Eventualmente, o desaguamento das descidas é conduzido por meio de canais periféricos até novas descidas ou até a base da pilha.

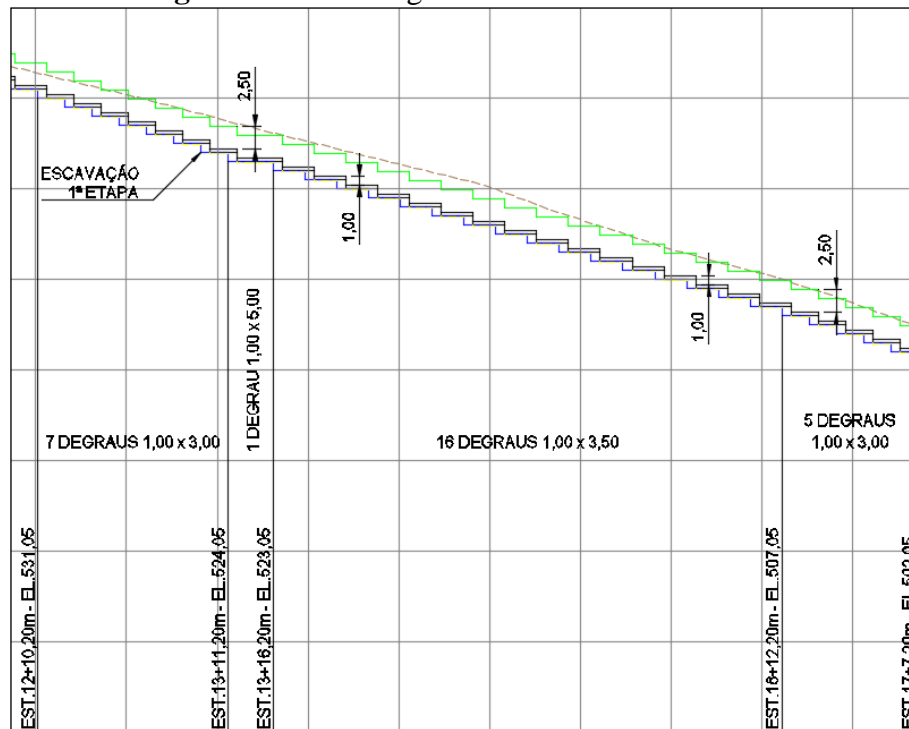
Esses canais foram dimensionados para tempo de retorno de 500 anos, conforme recomendado na NBR 13.029 (ABNT, 2006). As declividades longitudinais dos canais seguiram a declividade natural do terreno, tendo sido considerado o valor mínimo de 0,5%, e a capacidade dos canais foi verificada em regime de escoamento uniforme, para situação de escoamento com a maior lâmina d'água. A Tabela 8 apresenta um resumo com as dimensões dos canais periféricos, em seção retangular, assim como sua respectiva vazão de projeto, e A figura 23 apresenta o perfil longitudinal de trecho do canal periférico CP 02

Tabela 8 Tabela Resumo para os Canais Periféricos.

Identificação	Vazão de Projeto (m ³ /s)	Seção Transversal		Velocidade (m/s)	Profundidade (m)
		Base (m)	Altura (m)		
CP-01	20,50	7,00	2,00	3,6	0,82
CP-02	25,40	7,00	2,00	3,8	0,94

Fonte: Vale, 2009.

Figura 23 Perfil longitudinal de trecho do CP 02.



Fonte: Vale, 2009

De forma a proporcionar o abatimento das vazões de pico, para eventos com recorrência de 500 anos, foram dimensionadas duas bacias de detenção de escoamento superficial imediatamente a jusante de descidas de água e canais periféricos.

Estas estruturas armazenarão transitoriamente o deflúvio superficial, sendo compostas por uma área alagável (zona escavada na pilha nas proximidades das ombreiras, com profundidade máxima de 2 m) e por um canal extravasor, implantado na mesma elevação do fundo da área alagável. Este canal é dimensionado de forma a provocar a retenção de parte do deflúvio superficial, resultando no abatimento das vazões de pico.

Ressalta-se que, uma vez que os canais extravasores são implantados na mesma elevação do fundo das bacias de detenção, não haverá armazenamento permanente de água sobre a pilha, visto que as estruturas desaguarão por gravidade horas após o evento chuvoso.

O primeiro sistema de drenagem superficial da pilha foi construído em 2007 e era composto por duas descidas de água em degraus de gabião, construídas no contato com o terreno natural, ao longo das ombreiras da pilha. Estes canais serviriam para receber a drenagem das bermas, à medida que a pilha fosse crescendo e promover o deságue à jusante da estrutura. As figuras 24 e 25, apresentam a imagem dos canais em gabião construídos nas ombreiras direita e esquerda, respectivamente.

Figura 24 Descida de água em gabião construída na ombreira direita da PDE NW II.



Fonte: Própria, 2007.

Figura 25 Descida de água em gabião construída na ombreira esquerda da PDE NW II.



Fonte: Própria, 2007.

Em 2013, devido à revisão do projeto da pilha e crescimento da estrutura, as decidas d'água em gabião foram impermeabilizadas com concreto, bem como foram prolongadas. A figura 26 apresenta a obra de prolongamento dos canais.

Figura 26 Prolongamento do canal periférico.



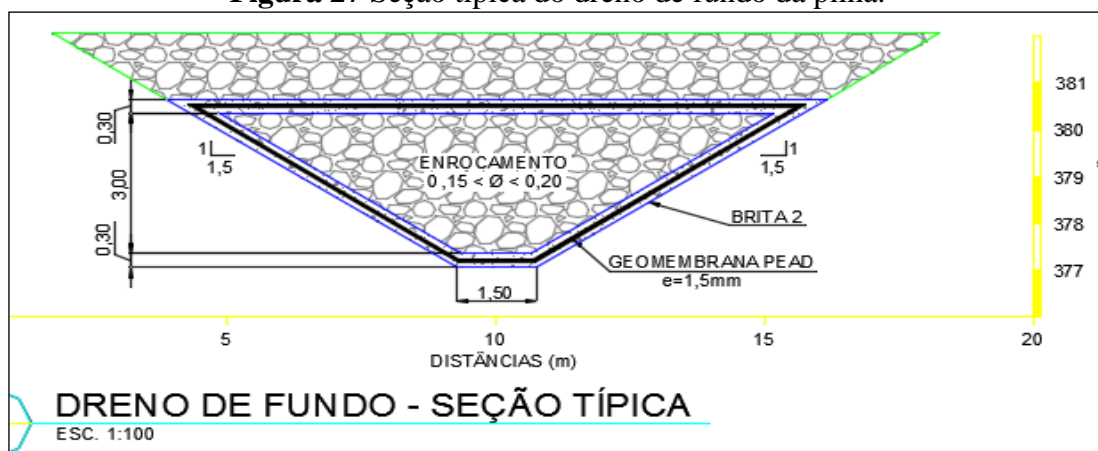
Fonte: Própria, 2013.

4.1.3 Drenagem Interna da PDE NW II

A drenagem interna da pilha foi construída de forma segmentada, cujas etapas foram realizadas de acordo com o avanço da área de disposição. A disposição em etapas é viabilizada pelas interseções que o acesso faz com o talvegue principal da área. À montante dessas interseções, foram construídos diques com a finalidade de conter sedimentos e atenuar as vazões de pico durante os eventos de chuvas.

A Figura 27 ilustra uma seção típica do projeto executivo do dreno de fundo da pilha, com o dimensionamento detalhado dos materiais que constituem o dreno.

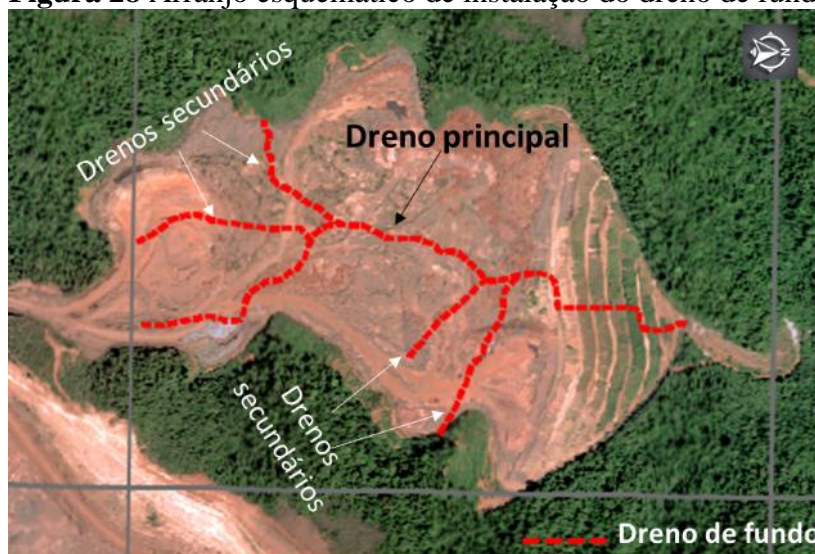
Figura 27 Seção típica do dreno de fundo da pilha.



Fonte: Vale, 2009.

O dreno de fundo da pilha NW II teve sua execução concluída no ano de 2005, sendo constituído de um dreno principal construído em toda extensão do talvegue, e de alguns drenos secundários cuja função é coletar a percolação gerada pela recarga aplicada sobre a pilha (infiltração da água de chuva) e da recarga aplicada à bacia de contribuição a montante, que se mostra no desagüamento em nascentes e na vazão de base de córregos em condições permanentes. A figura 28 apresenta o arranjo esquemático da drenagem interna da pilha.

Figura 28 Arranjo esquemático de instalação do dreno de fundo.



Fonte: Própria, 2016.

Os drenos foram implantados em camadas de transição de areia, britas e pedras de mão, e “envelopados” com manta geotêxtil formando um colchão drenante, e em seguida foram cobertos com uma camada de estéril, afim de garantir a integridade estrutural do dreno contra intempéries, escoamentos superficiais e eventual tráfego de equipamentos.

A Figura 29, apresenta as fases de construção do dreno interno da pilha, onde: A – Transição de areia e brita; B - Aplicação de pedra de mão e envelopamento com manta geotêxtil; C e D – Cobrimento do dreno com estéril.

Figura 29 Fases do processo construtivo do dreno interno da pilha.



Fonte: Própria, 2005.

A saída do dreno ou ponto de desaguamento da drenagem é exatamente no “pé” da pilha, onde foi executado o enrocamento para proteção do dispositivo, uma bacia de dissipação e instalação de um medidor de vazão do tipo triangular, onde é feita a medição mensal da vazão que percola do dreno interno da pilha. A figura 30 apresenta uma imagem atual da saída dreno, e foi registrada durante a leitura de medição da vazão. Nesta foto pode ser vista as condições atuais do enrocamento do pé da pilha, a bacia de dissipação e o medidor de vazão.

Figura 30 Execução de leitura da medição do dreno de fundo da pilha NW II.



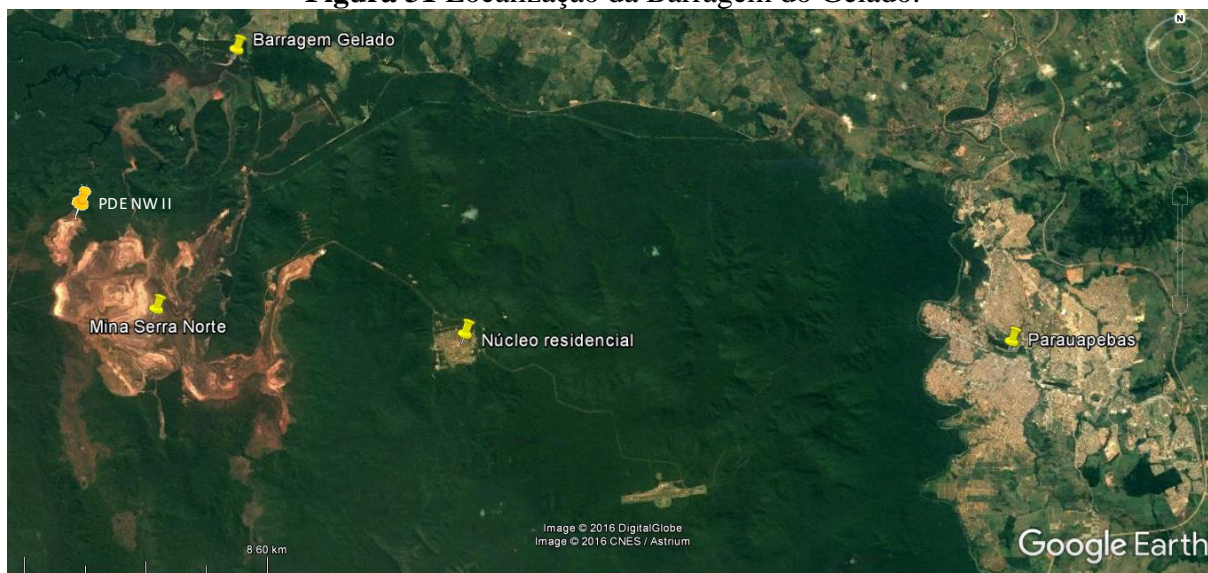
Fonte: Própria, 2017.

4.1.4 Estruturas de controle de sedimentos da PDE NW II

A operação de disposição de estéril forçosamente acarretará na geração de sedimentos. O sedimento proveniente da operação da PDE NW II é controlado pelo braço 3 de uma barragem situada à jusante da pilha denominada barragem do Gelado como estrutura final para garantia de clarificação de partículas finas de silte e argila sobrenadantes.

A Barragem do Gelado está situada no Complexo Industrial da VALE, na Serra dos Carajás, Estado do Pará, distante cerca de 220 km da cidade de Marabá, sendo 105 km através da estrada PA-150 e 115 km através da estrada PA-275.

Figura 31 Localização da Barragem do Gelado.

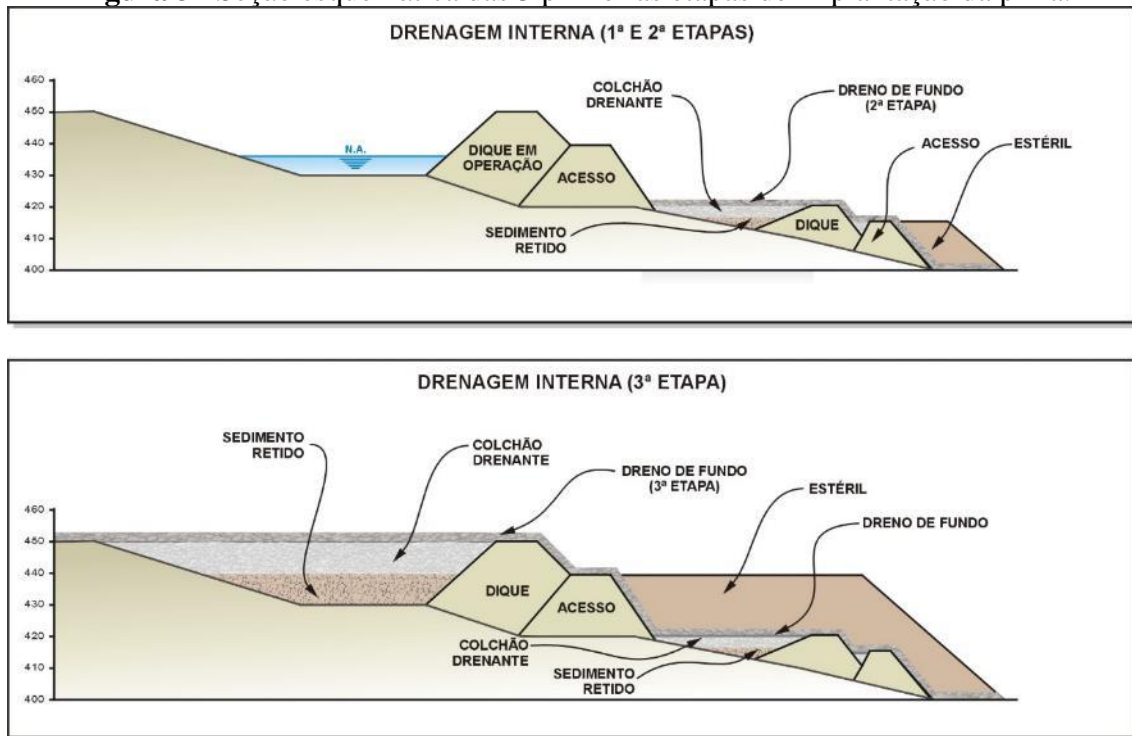


Fonte: Google Earth, 2016.

Afim de minimizar o carregamento de sedimento para o reservatório da barragem, algumas “barreiras” foram construídas à montante do reservatório. Durante a implantação da pilha, foram construídos diques temporários na área da pilha, com a finalidade de conter sedimentos e atenuar as vazões de pico durante os eventos de chuvas.

A Figura 32 ilustra uma seção esquemática dos diques de contenção temporários e os sedimentos retidos.

Figura 32 Seção esquemática das 3 primeiras etapas de implantação da pilha.



Fonte: Vale, 2009.

Outra barreira foi construída a cerca de 370 metros do pé da pilha, e consiste de um cordão drenante. A Figura 33 apresenta um mapa indicativo da localização do cordão drenante e da barragem do Gelado, instalados à jusante da PDE NW II.

Figura 33 Mapa de localização do cordão drenante e da barragem do Gelado.



Fonte: Própria, 2015.

Este cordão drenante é composto por material de enrocamento com transições, conforme pode ser visto na Figura 34, e semelhantemente ao dreno interno da pilha, o mesmo foi construído para promover o processo de filtragem das partículas em suspensão na drenagem proveniente da pilha, permitindo que o mínimo possível de sedimento seja encaminhado para a barragem, e assim facilitar a limpeza periódica do reservatório.

Figura 34 Visão aérea e do material de enrocamento do cordão drenante.



Fonte: Própria, 2012.

As outras barreiras foram construídas no próprio corpo da pilha e consistem em pequenas bacias construídas nas bermas e próximas aos seus pontos de deságues nos canais periféricos. Além de dissipar a energia da água, essas bacias servem para promover a decantação de partículas suspensas na drenagem, afim de que o mínimo possível de sedimento seja transportado pelos canais.

Enquanto os taludes são operacionais, essas bacias são executadas apenas por meio de escavação da berma, permanecendo em seu estado original até que o talude seja finalizado, quando então a mesma é concretada, afim de facilitar limpezas quando necessárias. A figura 35 apresenta uma bacia construída na berma de um talude operacional e uma bacia construída e concretada na berma de um talude finalizado, respectivamente.

Figura 35 Bacias de contenção de sedimento construídas no corpo da pilha.



Fonte: Própria, 2016.

4.2 ASPECTOS GEOLÓGICOS

Em termos regionais, a área de estudo insere-se no contexto geológico da Província Mineral de Carajás. Tal província constitui-se em uma bacia metavulcanossedimentar neoarqueana, sobreposta a um embasamento mesoarqueano a neoarqueano, composta por rochas de complexos ígneos e metamórficos.

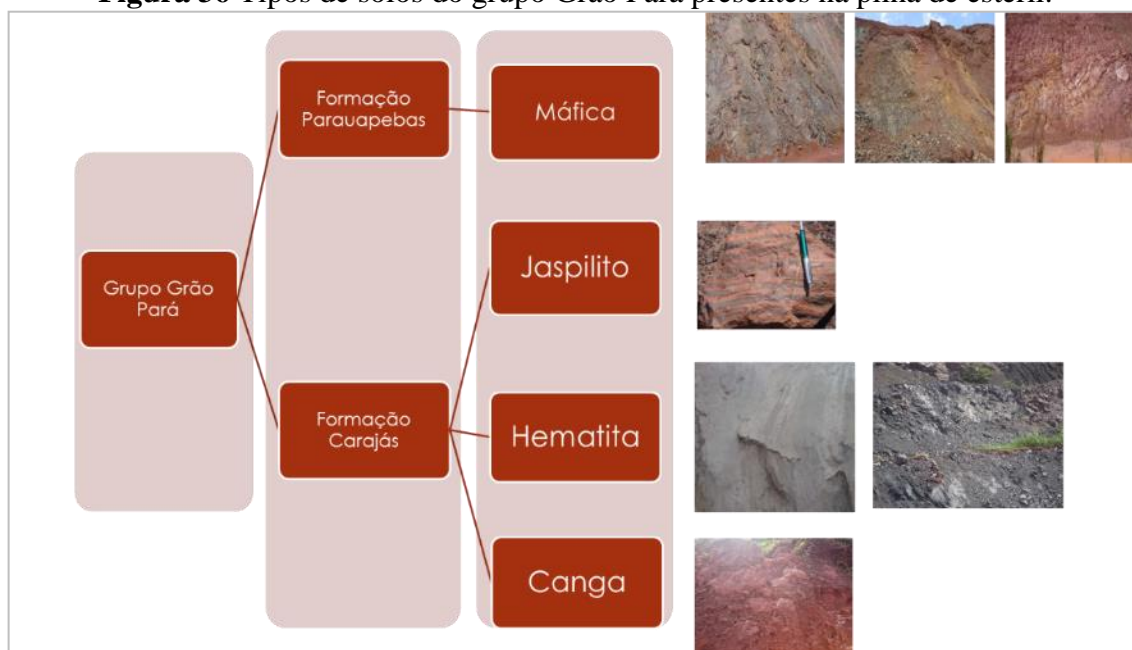
Em termos geológicos locais, constata-se que o Grupo Grão-Pará ocupa a maior porção da área de estudo, sendo representado por uma sequência vulcanossedimentar composta pela Formação Parauapebas (basaltos com níveis de riolitos subordinados); pela Formação Carajás (jaspilitos e formações ferríferas bandadas); e, pela Formação Paleovulcânica Superior (basaltos com lentes de formações ferríferas bandadas, cherts, siltitos e arenitos). Além destas rochas, ocorrem ainda filitos, cangas e depósitos gravitacionais de fluxo de detritos. Uma caracterização sucinta destas unidades é apresentada de forma resumida a seguir.

- a) **Formação Parauapebas** - é a unidade basal do Grupo Grão Pará. Esta unidade é formada por basaltos, andesitos, shoshonitos e riolitos, cortados por corpos quartzodioríticos, metamorfisados na fácies xisto-verde e pouco deformados. No topo da Formação Parauapebas dominam rochas vulcânicas félsicas, traquiandesíticas e riolíticas, as quais frequentemente encontram-se alteradas e recobertas por depósitos gravitacionais de fluxo de detritos e/ou canga química.
- b) **Formação Carajás** - se situa em posição intermediária, sendo formada por jaspilitos oolíticos e formações ferríferas bandadas, que correspondem ao protominério do ferro laterítico das grandes jazidas de Carajás. Sua idade mínima é determinada por um sill máfico datado de 2.740 ± 8 Ma. Os Jaspilitos são caracterizados por intercalações

- rítmicas de bandas milimétricas a centimétricas, escuras e claras de hematita e chert, respectivamente. As formações ferríferas são constituídas de bandas de dolomitos cinza claros com quartzo/chert ou chert avermelhado intercalado a bandas de óxido de ferro de tonalidade cinza escuro. O aumento na proporção de dolomito resulta em meso-bandas alternadas claras e escuras. Localmente encontra-se um dolomito rico em ferro.
- c) **Formação Paleovulcânica Superior** - esta unidade corresponde a um conjunto de rochas vulcânicas, metagrauvacas, filitos e arenitos, com derrames basálticos, tufos e arenitos tufáceos.
 - d) **Filito** - ocorre sob a forma de pacotes discretos e restritos, apresentando composição carbonática e coloração morrom-arroxeadada. Podem ser encontrados veios de quartzo deformados (regime dúctil) associados. Este filito pode ser encontrado a norte de N4, representando uma zona de transcorrência limitando a ocorrência de formação ferrífera; e, a sul de N4E, marcando o contato entre as rochas da Formação Carajás com as rochas metavulcânicas.
 - e) **Canga** - ocorre capeando tanto as ocorrências de formação ferrífera como as rochas metavulcânicas. Podem ser separados dois tipos de canga:
 - f) **Canga de Minério** - composta por blocos de hematita cimentados por óxido de ferro e flanqueia os afloramentos de minério in situ.
 - g) **Canga Química** - composto por goethita e apresenta estruturas coliformes e abundantes poros e cavidades. Cobre geralmente as rochas máficas e não possui continuidade estrutural com as rochas subjacentes.
 - h) **Depósitos gravitacionais de fluxo de detritos** - estes depósitos se apresentam na maioria das vezes lateritizados, cortados por inúmeras pequenas falhas, e ocorrem nos talvegues das encostas. Podem ser compostos por fragmentos de minério, jaspilitos e rochas básicas.

Como recebe estéril de várias cavas, a pilha possui um maciço extremamente heterogêneo. A figura 36 apresenta um diagrama resumo com a ilustração dos litotipos predominantes das cavas de proveniência do estéril (Mina de N4WN)

Figura 36 Tipos de solos do grupo Grão Pará presentes na pilha de estéril.



Fonte: Própria, 2016.

4.3 ESTUDOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS

A sequência adotada para o desenvolvimento dos estudos hidrossedimentológicos da área de estudo seguiu a ordem abaixo indicada:

- Delimitação da área de drenagem (Bacia de Contribuição) considerando as intervenções impostas pela existência de estruturas de drenagem superficial e das cavas adjacentes;
- Cálculo do coeficiente de escoamento superficial considerando o tipo de solo e as características de uso e ocupação dos terrenos da bacia de contribuição, identificados em campo durante a visita técnica e também com o auxílio de imagens de satélite;
- Determinação do fator de erodibilidade do solo (K);
- Determinação do fator de erosividade da chuva (R) com base nos totais mensais e anuais das precipitações.

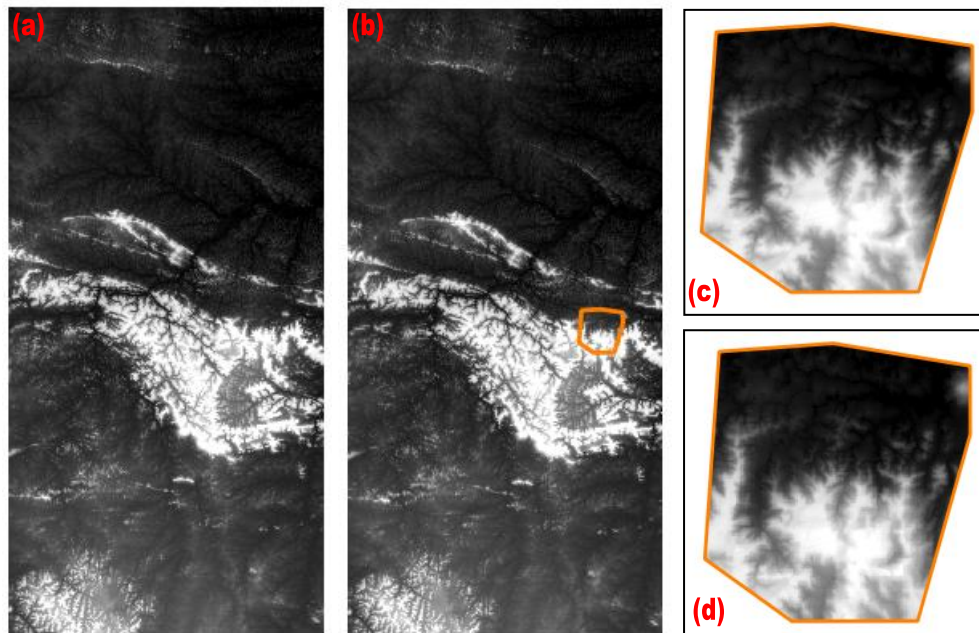
4.3.1 Mapa de Elevação Digital - DEM

O mapa de elevação digital (DEM) da área de estudo foi obtido junto ao banco de dados online da Shuttle Radar Topography Mission – SRTM (<<http://earthexplorer.usgs.gov/>>) na resolução espacial de 30 metros, nas extensão GeoTIFF (raster), coordenadas geométricas. O

raster foi reprocessado pelo software QGIS (comandos clipper e reprojetar) e convertido, de acordo com a localidade do mapa, para a Zona WGS84 / UTM 22S – EPSG:32722.

A Figura 37 apresenta o DEM obtido no site da SRTM, a identificação da área de estudo no DEM, o recorte executado no DEM de forma a reduzi-lo para o tamanho da área de estudo e a conversão da DEM obtida para UTM.

Figura 37 (a) DEM que contém a área de estudo. (b) Identificação da área de estudo no DEM. (c) DEM recortado. (d) DEM reprojetado para UTM.

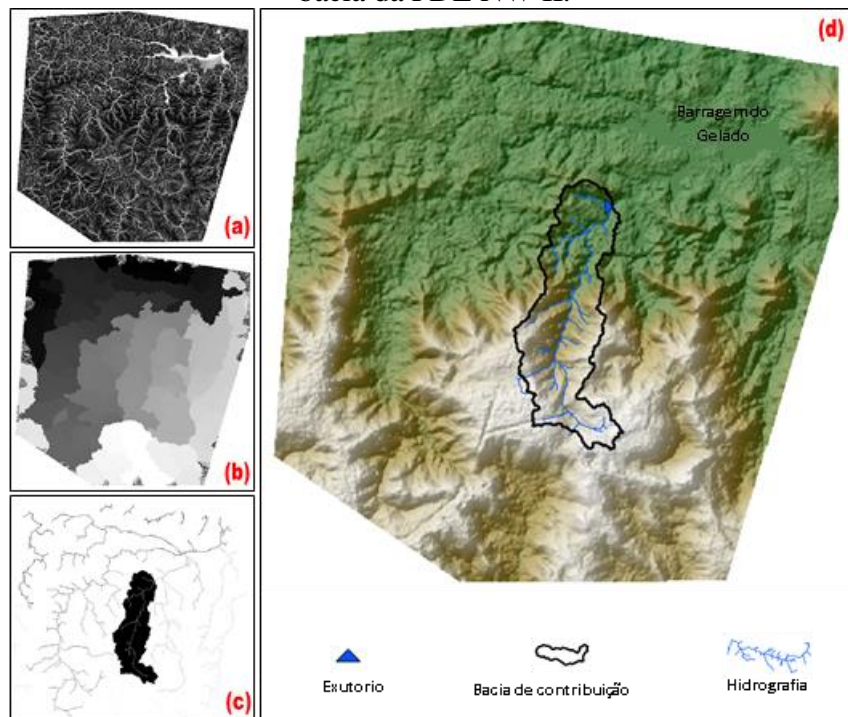


Fonte: SRTM, 2018.

4.3.2 Bacia de contribuição da PDE NW II

A bacia hidrográfica ou bacia de contribuição da área de estudo foi delimitada automaticamente a partir do DEM apresentado no item 4.3.1, utilizando os algoritmos *r.watershed* e o *r.water.outlet* na ferramenta GRASS do QGIS. Para criar o limite da bacia hidrográfica, ou seja, o seu divisor topográfico usando essa ferramenta foi necessário gerar o fluxo acumulado e marcar um ponto de exutório. Este ponto refere-se à foz do corpo d'água principal, o reservatório da barragem do Gelado. O produto do processamento foi a geração da rede de fluxos da bacia, identificação das sub bacias e finalmente a delimitação da bacia de contribuição da área de interesse, conforme é apresentado na Figura 38.

Figura 38 (a) Rede de fluxos da bacia total. (b) Identificação das sub bacias. (c) delimitação automática da bacia da PDE NW II. (d) Mapa visual do relevo, rede de fluxo e delimitação da bacia da PDE NW II.

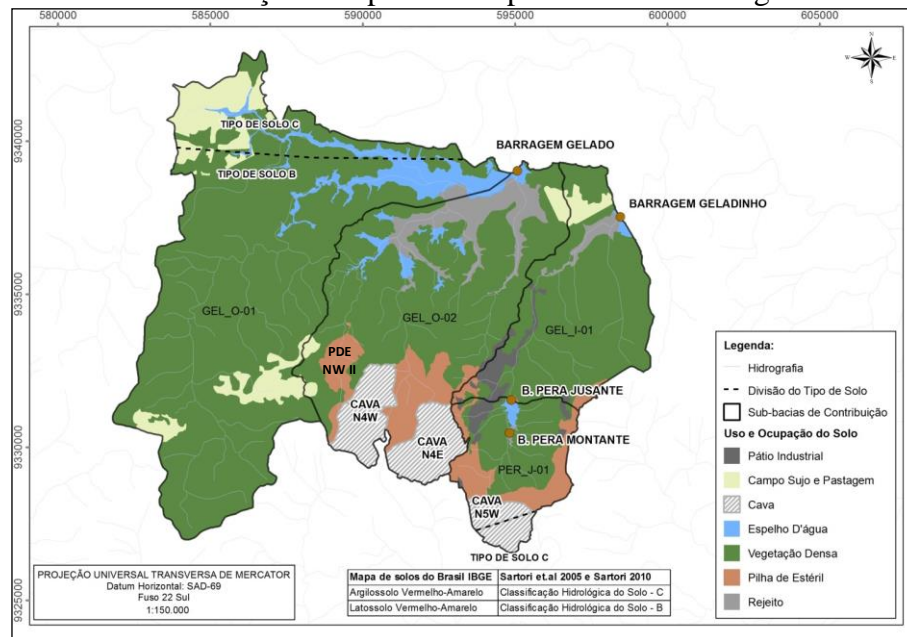


Fonte: SRTM, 2018.

4.3.3 Cobertura e uso do solo

De acordo com o mapa de solos do Brasil produzido pelo IBGE e pela EMBRAPA, na região estudada ocorre predominantemente a classe dos Latossolos vermelho-amarelo. Os Latossolos, devido à sua estrutura, porosidade, permeabilidade e consistência, possuem elevada resistência à erosão. Porém, um manejo inadequado pode provocar a formação de camadas compactadas, onde a infiltração da água é reduzida e os riscos de erosão é aumentado. (Macedo, 1994). A Figura 39 apresenta as bacias de contribuição que drenam para as barragens do Complexo Minerador de Carajás, assim como os tipos de solo predominantes na região.

Figura 39 Mapa da Bacia de contribuição das Barragens do Complexo Minerador de Carajás com indicação do tipo de solo predominante na região.



Fonte: Pótamós, 2017.

A partir da caracterização ambiental da área de estudo, por meio da interpretação visual de imagens de alta resolução espacial disponíveis no sistema Google Earth®, de ortomagens adquiridas da base GISMineral e de visitas à área de estudo foi possível o reconhecimento das feições de uso e ocupação do solo.

4.3.4 Caracterização climatológica

De acordo com a classificação climática de Köppen, baseada na quantidade e distribuição anual da precipitação e nos valores de temperaturas média mensal e anual, o clima da região em que se localiza o empreendimento é do tipo Am. O tipo Am é um clima tropical úmido de monção, com primavera seca, clima quente e temperaturas médias elevadas entre 25°C e 27°C, com precipitação média mensal em torno de 300 mm, durante os meses de janeiro a março, e ocorrência de três meses com precipitações inferiores à 60 mm – junho, julho e agosto (SUDAM, 1984).

A região se encontra em uma zona com dominância de ventos fracos, com considerável predominância de ventos oriundos das direções norte (N), norte-noroeste (NNW) e noroeste (NW), apresentando uma intensidade média da ordem de 1,2 m/s para a Estação Climatológica Marabá, operada pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, e de 2,0 m/s para a Estação Mina do Sossego operada pela Vale (GOLDER, 2006). As normais climatológicas

correspondentes aos registros observados na Estação Marabá (Código 82.562) no período de 1973 a 1990 são: Precipitação Total Anual: 2088 mm; Evaporação Total Anual: 980 mm; Temperatura Média: 26,1 °C; Umidade Relativa: 82%; e Insolação Total: 1884,1 h.

4.3.5 Caracterização pluviométrica

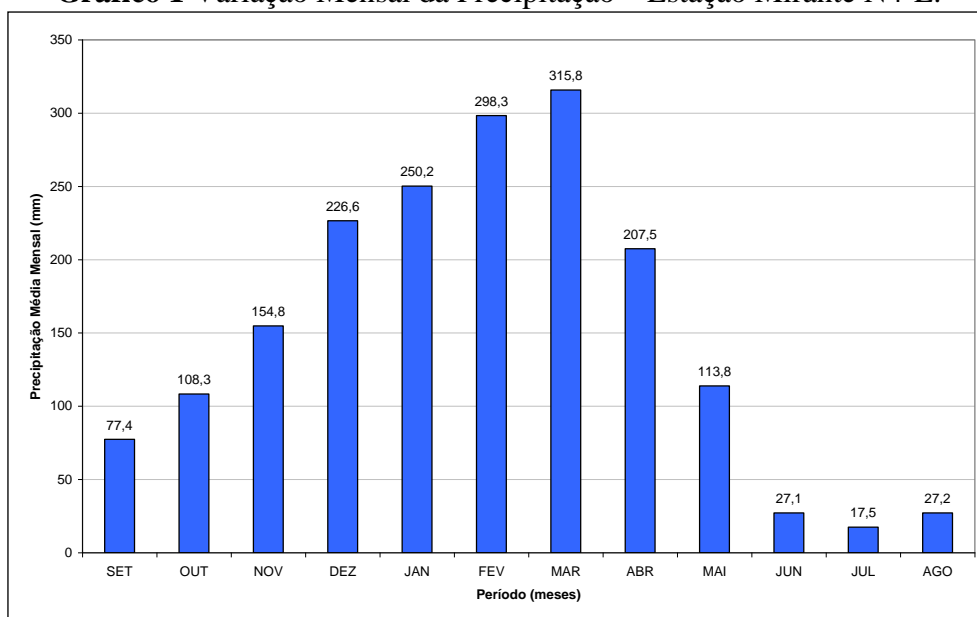
A Vale dispõe de uma estação pluviométrica localizada na Mina de N4-E, denominada Mirante N4-E, com um período de 24 anos de monitoramento diário - 1985 a 2009, sendo esta definida como a mais representativa para a caracterização pluviométrica da área em análise.

Uma vez selecionada a Estação Mirante N4-E, os registros monitorados foram consistidos avaliando-se as falhas existentes e o período em que as mesmas ocorreram dentro do ano hidrológico considerado (setembro a agosto). A série histórica consistida da Estação Mirante N4-E é apresentada na Tabela 9 enquanto a variação mensal da precipitação e o número médio de dias chuvosos podem ser visualizados nos Gráficos 1 e 2, respectivamente.

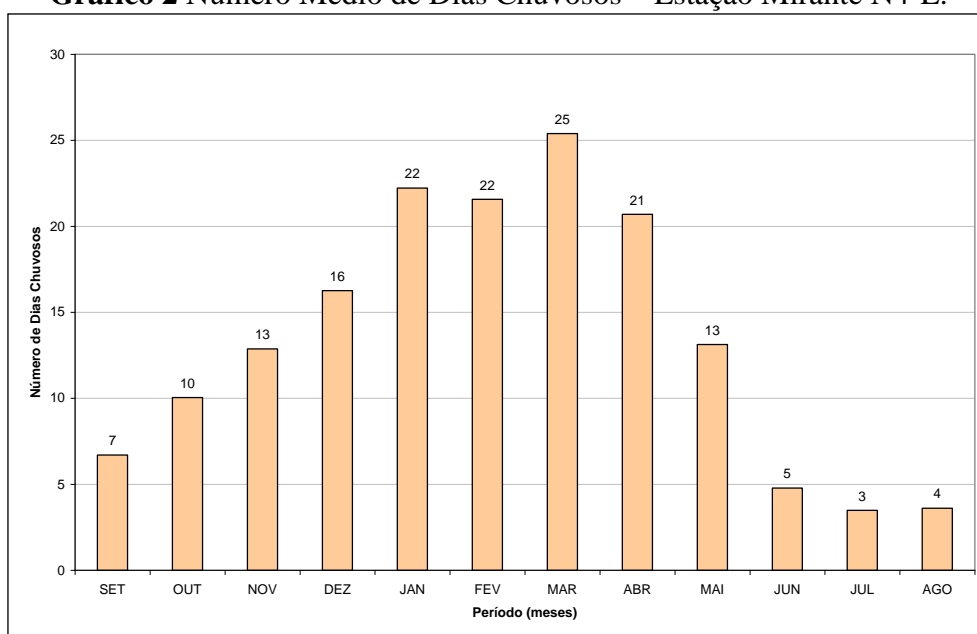
Tabela 9 Estação Mirante N4-E - Série histórica consistida de precipitação mensal considerada no estudo hidrológico do projeto (mm).

Ano Hidrológico	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Total Anual
1985/1986	89,3	153,1	178,8	478,4	318,7	279,9	476,0	243,7	78,9	104,3	24,7	13,6	2439,4
1986/1987	86,3	232,7	49,0	130,8	152,0	154,3	398,5	153,5	78,9	23,6	0,3	40,4	1500,3
1987/1988	190,6	171,3	151,0	85,9	297,7	405,1	308,6	416,1	28,2	27,0	0,2	42,8	2124,5
1988/1989	45,0	57,4	203,3	334,9	138,0	169,1	503,6	338,6	161,2	96,7	20,6	24,4	2092,8
1989/1990	89,4	71,0	92,9	434,9	164,3	324,5	164,2	142,9	55,4	0,4	48,7	10,7	1599,3
1990/1991	104,8	141,4	40,1	135,5	401,6	190,1	250,0	158,5	168,2	7,8	1,0	4,4	1603,4
1991/1992	35,9	99,4	73,5	158,0	291,8	328,8	158,7	144,8	7,4	0,0	11,4	28,7	1338,4
1992/1993	54,1	9,8	202,0	351,2	134,1	350,8	182,2	172,6	160,7	24,8	15,0	55,1	1712,4
1993/1994	72,1	200,3	293,9	190,4	172,8	338,3	388,6	262,0	169,9	68,2	0,0	10,4	2166,9
1994/1995	23,3	189,7	126,4	347,5	168,3	377,5	251,9	183,7	207,6	17,0	12,2	0,0	1905,1
1995/1996	45,0	84,5	252,2	211,9	262,0	169,6	327,0	216,2	148,4	0,0	2,4	-	1719,2
1996/1997	28,0	106,4	449,3	110,7	529,7	162,9	490,6	149,7	106,0	7,9	1,7	15,3	2158,2
1997/1998	9,9	146,7	41,9	179,1	311,5	241,8	257,4	69,2	-	-	-	-	1257,5
1998/1999	-	-	-	-	156,1	292,8	281,2	192,9	209,0	9,8	0,0	14,3	1156,1
1999/2000	282,2	62,4	213,6	4,0	325,2	498,2	424,9	288,1	39,6	36,3	80,1	18,0	2272,6
2000/2001	170,9	60,5	215,6	325,6	316,4	262,2	294,9	201,0	145,9	21,8	34,8	20,7	2070,3
2001/2002	45,2	166,4	218,3	213,7	412,5	181,4	361,7	129,6	80,5	39,3	20,6	1,5	1870,7
2002/2003	30,8	61,8	26,4	241,0	355,1	420,0	258,3	175,0	86,7	39,6	0,0	65,1	1759,8
2003/2004	28,8	76,7	217,4	205,7	202,2	403,6	248,7	226,8	107,7	11,0	52,4	79,1	1860,1
2004/2005	34,2	61,2	90,1	155,7	77,6	194,1	223,9	67,8	59,1	6,1	1,2	0,0	971,0
2005/2006	82,0	43,5	114,0	365,0	217,5	352,5	413,5	424,0	216,5	-	39,0	-	2267,5
2006/2007	-	150,0	103,5	-	129,5	466,0	282,5	-	48,0	24,5	14,0	-	1218,0
2007/2008	-	35,5	51,5	98,0	219,5	-	-	-	140,5	3,5	4,5	72,0	625,0
Média	77,4	108,3	154,8	226,6	250,2	298,3	315,8	207,5	113,8	27,1	17,5	27,2	1824,4

Fonte: Vale, 2009.

Gráfico 1 Variação Mensal da Precipitação – Estação Mirante N4-E.

Fonte: Vale, 2009

Gráfico 2 Número Médio de Dias Chuvosos – Estação Mirante N4-E.

Fonte: Vale, 2009

4.4 AVALIAÇÃO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTO

4.4.1 Análises laboratoriais

De acordo com Carvalho (2008), muitos problemas oriundos de processos erosivos e sedimentação são solucionados pelo conhecimento da granulometria do material transportado, então para a avaliação sedimentométrica deste trabalho foi proposta a realização da coleta de

amostras em dispositivos à jusante da pilha, seja diques de contenção de sedimentos ou barragens construídas para esse fim.

Essas amostras serão úteis para a obtenção do valor da descarga sólida, para análise do sedimento e suas características. Com isso, pretende-se coletar materiais de duas naturezas: amostra de material em suspensão, contendo uma mistura composta de água, sedimento e sais solúveis, acondicionadas normalmente em garrafas; amostra de material sólido, contendo sedimento um pouco molhado, acondicionadas normalmente em sacas plásticas.

De posse das amostras coletadas, as mesmas serão encaminhadas para a realização de ensaios laboratoriais para determinação da concentração e da distribuição granulométrica dos sedimentos contidos nessas amostras de material.

As análises granulométricas seguirão o padrão da NBR 7181 (ABNT, 1984) para a sua execução, e caso o solo em estudo seja constituído de fração grossa e fina, então o ensaio realizar-se-á por meio da granulométrica conjunta, isto é, peneiramento e sedimentação, sendo este último realizado por meio de defloculante (hexametáfosfato de sódio).

A fim de conhecer a granulometria do material transportado, em 2017 foi realizada a campanha de coleta de amostras de solo. O material estudado fora prospectado em diferentes pontos, entre o “pé” da pilha e o dique de contenção desativado, perfazendo um total de 12 furos de sondagem a trado. A Tabela 10 apresenta as informações de localização e profundidade dos furos, de onde foram coletadas as amostras para os ensaios laboratoriais. E a Figura 40 apresenta a identificação dos pontos de coleta das amostras para caracterização do solo.

Tabela 10 Informações dos furos de sondagem.

SONDAGEM	NORTE	ESTE	COTA DO TERRENO (m)	PROF. (m)
01	9.333.984,544	589.431,2130	369,455	0,45
02	9.333.982,4747	589.464,4437	369,902	0,50
03	9.333.995,2517	589.482,7445	369,596	0,70
04	9.333.966,4347	589.491,9452	370,661	0,60
05	9.333.940,3172	589.511,0943	371,571	0,60
06	9.333.916,4342	589.511,9249	372,715	0,50
07	9.333.896,6357	589.514,2086	372,967	0,60
08	9.333.874,6287	589.516,1651	373,608	0,45
09	9.333.839,8621	589.488,2510	375,197	0,45
10	9.333.774,2296	589.431,5713	378,376	0,50
11	9.333.763,8501	589.452,1442	378,569	0,48
12	9.333.738,4614	589.453,2525	378,864	0,50

Fonte: Geominas, 2018.

Figura 40 Pontos de coleta das amostras deformadas na região de interesse.



Fonte: Própria, 2017.

Essas sondagens a trado foram realizadas de acordo com a NBR 9603, as amostras foram coletadas em sacos plásticos devidamente identificados representativas de cada horizonte e depois destinadas ao laboratório para ensaios geotécnicos de caracterização. A Figura 41 apresenta a imagem de um dos pontos de coleta.

Figura 41 Coleta de amostra deformada.

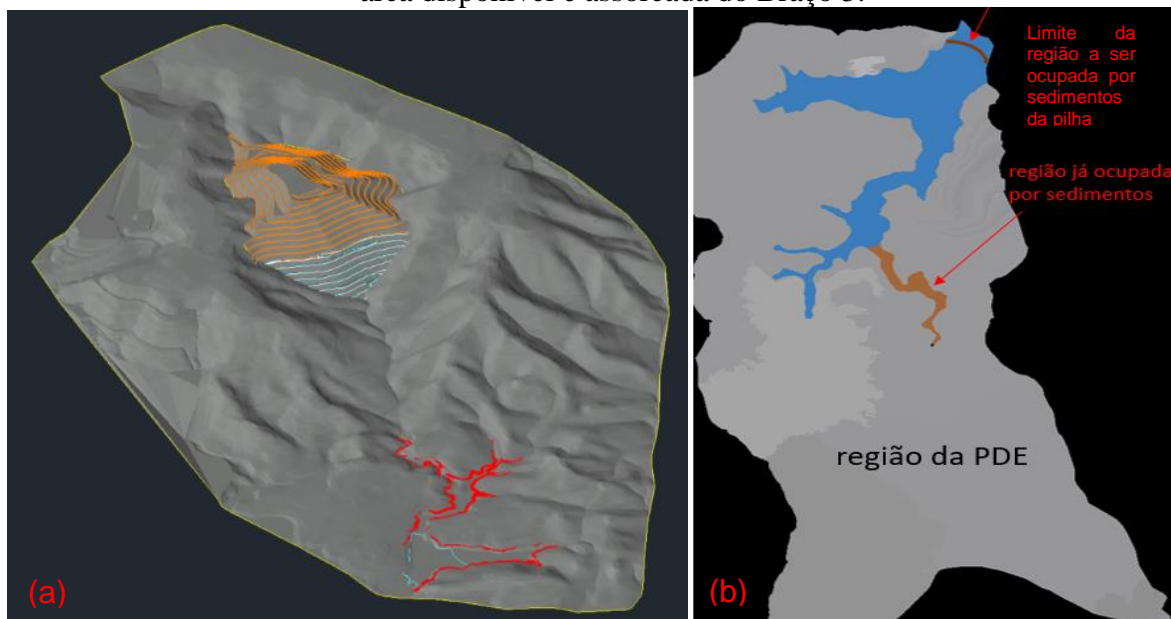


Fonte: Própria, 2017.

4.4.2 Produção de Sedimento

Considera-se como volume de sedimento gerado e transportado para fora da pilha, todo o sedimento que estiver depositado à jusante da estrutura, ou seja, todo volume de sedimento emerso depositado ao longo do trajeto até o encontro com o reservatório da barragem (braço 3). O volume de sedimento gerado foi levantado por meio da comparação do levantamento topográfico do braço 3 na condição atual, com o levantamento topográfico da mesma região em sua situação primitiva, antes da construção da PDE NW II. Essa modelagem foi realizada no software Studio 3 Datamine, por meio dos comandos *clo*, *dtm*, *pdv*, *win* e *wvo*, cujo produto do processamento segue apresentado na Figura 42.

Figura 42 a) Ilustração da pilha e Braço 3 da barragem do Gelado. b) Ilustração em planta da área disponível e assoreada do Braço 3.



Fonte: Própria, 2017.

4.5 INSPEÇÕES GEOTÉCNICAS

O manual de operação da estrutura prevê o monitoramento geotécnico da pilha e tem o objetivo de identificar condições geotécnicas desfavoráveis, denominadas “Anomalias”, e fazer o devido tratamento das mesmas. Este monitoramento é realizado através de inspeções visuais rotineiras, seja de forma visual ou por instrumentos, e os dados resultantes são utilizados na elaboração das avaliações de segurança das referidas estruturas.

Para a realização sistemática destas inspeções e monitoramentos são utilizados procedimentos e sistemas de controle geotécnicos.

No monitoramento visual é realizada a inspeção local da pilha e estruturas acessórias (dique de contenção de sedimentos, estruturas hidráulicas, etc., verificando as condições geométricas das bancadas e existências de fendas, deformações ou qualquer outro indicativo de instabilidade da pilha. No monitoramento visual também é verificada a existência de processos erosivos na superfície do talude e assoreamentos a jusante do dique de contenção.

É realizada a verificação visual da água proveniente do dreno de fundo com o intuito de identificar a ocorrência de mudança de suas características físicas (turbidez), cuja existência pode indicar carreamento de partículas do maciço. O monitoramento visual também deverá prever uma verificação nas estruturas de drenagem, buscando identificar processos erosivos, pontos de assoreamentos, pontos onde houver deficiência no revestimento, nível de assoreamento do dique de contenção de sedimentos e mudanças da geometria das seções hidráulicas.

A frequência do monitoramento visual é mensal, em período seco, e quinzenal, em período chuvoso. Todavia, qualquer alteração percebida por qualquer um dos agentes, mesmo em atividades que não sejam de inspeção, é comunicada ao responsável pela obra.

O monitoramento por instrumentos é realizado mensalmente e visa determinar as condições de segurança da pilha, por meio de dispositivos capazes de acompanhar eventuais mudanças nas condições de estabilidade da pilha. A pilha em estudo possui os seguintes instrumentos de monitoramento: medidores de nível d'água; medidores de vazão afluente a jusante do pé da pilha; e piezômetros;

Todas as anomalias observadas nas estruturas geotécnicas durante as inspeções são consolidadas em relatório específico, e são elaborados os planos de ação pertinentes, de forma a evitar condições geotécnicas desfavoráveis e prejuízos à saúde e ao meio ambiente, principalmente no que concerne ao controle do sedimento gerado pelas estruturas.

4.6 PROGRAMAS COMPUTACIONAIS UTILIZADOS

Os principais programas computacionais utilizados neste trabalho foram:

- QGIS® 2.18.13 ou Quantum GIS, seu nome antigo, é um software livre com código-fonte aberto, multiplataforma de sistema de informação geográfica (SIG) que permite a visualização, edição e análise de dados georreferenciados. Para os processamentos, além de comandos específicos, utilizou-se a extensão Grass®.

- Datamine Studio 3.0©, software pago produzido pela CAE Mining, utilizado na captura e análise de dados, exploração, geologia, geoquímica, mecânica de rochas, levantamentos, modelagem de minas, planejamento de produção e planejamento de minas subterrâneas e a céu aberto, e em áreas relacionadas, como estudos ambientais.
- Autocad© Civil 3D© 2015, software desenvolvido pela Autodesk, voltado para elaboração e análise de projetos nos mais diversos ramos da engenharia civil. Além de possuir todas as funcionalidades do AutoCAD, o Civil 3D possui uma gama de ferramentas exclusivas que permitem ao usuário desenvolver, com facilidade, projetos na área de transportes, SIG e inúmeras aplicações envolvendo áreas ligadas ao meio ambiente, como análise de bacias hidrográficas e estudos hidráulicos e hidrológicos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1.1 Pesquisa Documental

Após a definição da pilha a ser estudada foi realizada a pesquisa documental da referida pilha, principalmente os projetos elaborados para a execução da mesma.

A análise mais detalhada dos documentos levantados na pesquisa documental da PDE NW II apresentou a participação de cada componente na dinâmica erosiva da estrutura, bem como a sua efetividade.

A construção da PDE NW II segue o método ascendente com disposição do estéril por meio do uso de caminhões “fora estrada” e espalhamento via trator de esteira modelo D11. Esse método construtivo proporciona o aumento da segurança operacional da estrutura (redução de possíveis pontos de instabilidade) e melhoria na estabilidade com eficiência na compactação.

Apesar de ainda estar em operação, a mesma já possui bancos em situação final, cujos taludes se encontram rebatidos e revegetados. Na Figura 43 é apresentada a imagem dos bancos da pilha que já estão finalizados e dos bancos em situação operacional.

Figura 43 Identificação dos bancos operacionais e finalizados da PDE NW II.



Fonte: Própria, 2016.

Os bancos operacionais e os finalizados possuem características geométricas distintas, pois os primeiros objetivam alcançar o máximo aproveitamento do espaço disponível, por conta disso são implantados com ângulos mais fortes e sem qualquer controle do solo solto na saia do talude. Esta forma de implantação dos taludes operacionais pode contribuir na geração de

sedimento, já que os taludes se encontram desnudos e com ângulos favoráveis ao escorregamento de solo solto para os acessos (rampas e bermas), no período chuvoso.

Para os taludes finalizados, a contribuição na geração de sedimento reduz-se à medida que as ações são implantadas, pois além do ângulo do talude tornar-se mais suave, todo solo solto é retirado, e por fim é realizada a recuperação vegetal que ajuda a minimizar os efeitos do impacto da gota de chuva no solo.

A figura 44 apresenta dois bancos da pilha, sendo um com o talude rebatido e pronto para receber a proteção vegetal e outro com talude operacional onde é possível visualizar o solo solto na face do mesmo.

Figura 44 Geometria de bancos com talude rebatido e operacional.



Fonte: Própria, 2017.

Ao longo da pilha foi necessário considerar a implantação de canais periféricos junto ao contato das ombreiras, com o intuito de receber as vazões provenientes dos taludes e bermas das pilhas, e também de possíveis áreas de contribuição externa, com o objetivo de evitar a formação de erosões no pé da pilha e trechos pontuais com alagamentos.

O sistema de drenagem superficial da PDE NW II coleta a drenagem de todos os bancos, inclusive os bancos operacionais, que por conta dos parâmetros construtivos (ângulo mais acentuado), bem como excesso de solo solto na “saia” do aterro, acaba por permitir o transporte de finos para jusante da pilha, conforme pode ser visto na figura 45.

Figura 45 Transporte de sedimento pela drenagem superficial da estrutura.



Fonte: Própria, 2015.

Atualmente a PDE NW II possui dois canais periféricos em pleno funcionamento, um em cada ombreira, e o transporte de sedimento cessaram em virtude da execução dos trabalhos de finalização dos bancos acabados. A Figura 46 apresenta o desaguamento de água limpa no canal periférico da pilha, cuja drenagem provem de uma berma que o banco foi totalmente recuperado.

Figura 46 Desaguamento de água sem presença de sedimento no canal periférico da pilha.



Fonte: Própria, 2017.

O dreno de fundo, além de conferir estabilidade à pilha, reduz a geração e carreamento de sedimento para a região à jusante da estrutura, pois o seu método construtivo o torna uma espécie de canal preferencial para a água percolada no fundo do vale, promovendo a filtragem e evitando a perda de finos para o meio ambiente.

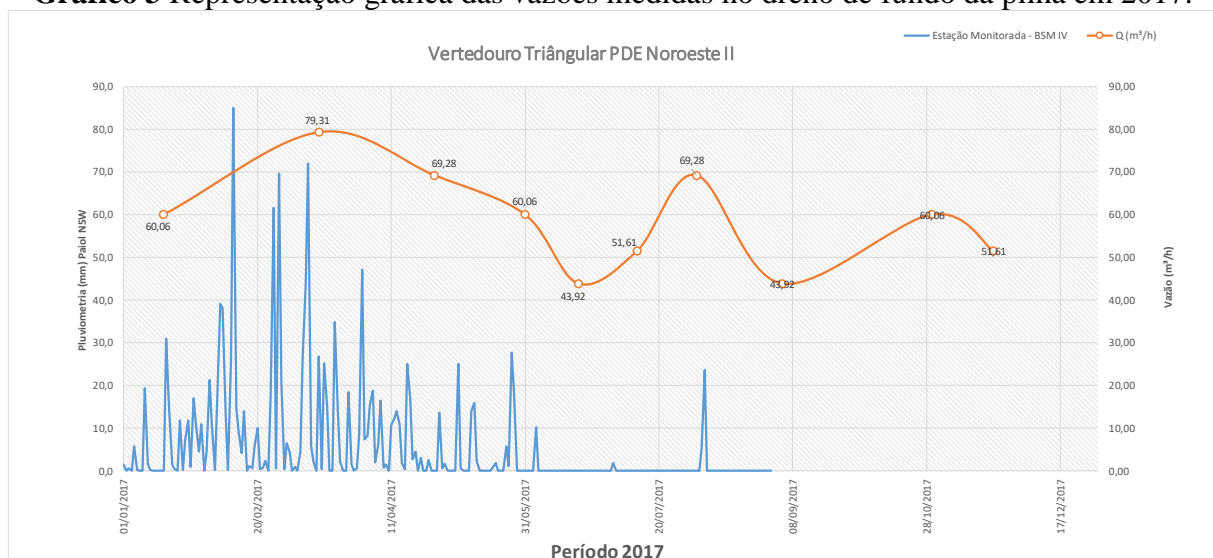
A vazão média do dreno interno da PDE NW II é da ordem de 58,91 m³/h, a água percolada é limpa, sem presença de partículas em suspensão. Na Tabela 11 seguem as medições realizadas na calha do dreno em 2017, e no Gráfico 3 segue a representação gráfica dessas medições versus pluviometria do período.

Tabela 11 Vazões medidas na calha do dreno de fundo da pilha em 2017.

DATA	LEITURA (m)	VAZÃO (m ³ /s)	VAZÃO (l/s)	Q (m ³ /h)
16/01/17	0,17	0,02	16,68	60,06
15/03/17	0,19	0,02	22,03	79,31
27/04/17	0,18	0,02	19,24	69,28
31/05/17	0,17	0,02	16,68	60,06
20/06/17	0,15	0,01	12,20	43,92
12/07/17	0,16	0,01	14,34	51,61
03/08/17	0,18	0,02	19,24	69,28
04/09/17	0,15	0,01	12,20	43,92
30/10/17	0,17	0,02	16,68	60,06
22/11/17	0,16	0,01	14,34	51,61

Fonte: Própria, 2017.

Gráfico 3 Representação gráfica das vazões medidas no dreno de fundo da pilha em 2017.

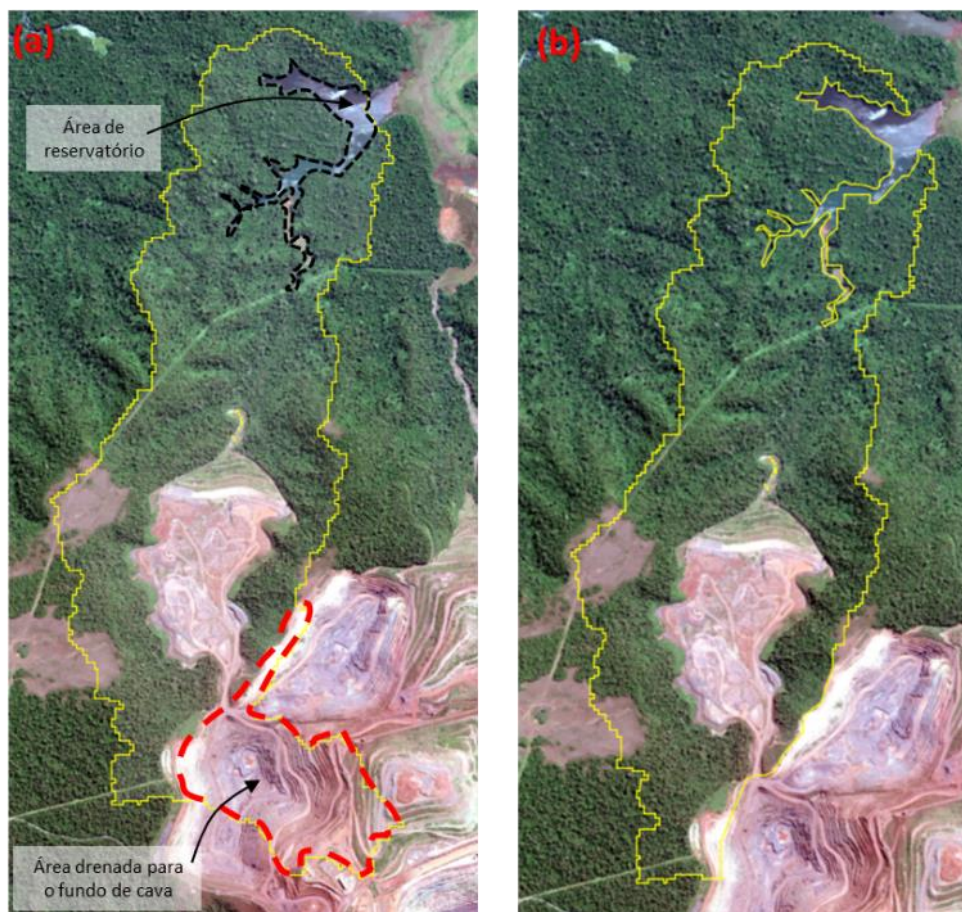


Fonte: Própria, 2017.

5.1.2 Estudos hidrossedimentológicos

A delimitação automática da bacia de contribuição totalizou a área de drenagem em 12,27 km², porém a sobreposição dos limites da bacia de contribuição à ortoimagem da região evidenciou que na referida bacia existem áreas de mina que drenam para o fundo das cavas e áreas de reservatório que constituem o exutório. Sendo assim, na bacia existem as áreas de drenagem total e as áreas de drenagem efetiva, isto é, aquelas que contribuem diretamente com escoamento superficial para os reservatórios das barragens (descontando as áreas que drenam para o fundo das cavas e reservatório da barragem). Após o ajuste, a bacia de contribuição da PDE NW II passou a ter área de drenagem efetiva de 10,17 km². A Figura 47 apresenta a delimitação da bacia de contribuição de áreas totais e áreas efetivas, sobrepostas à ortoimagem.

Figura 47 (a) Área de contribuição total da PDE NW II. (b) Área de contribuição efetiva da PDE NW II.

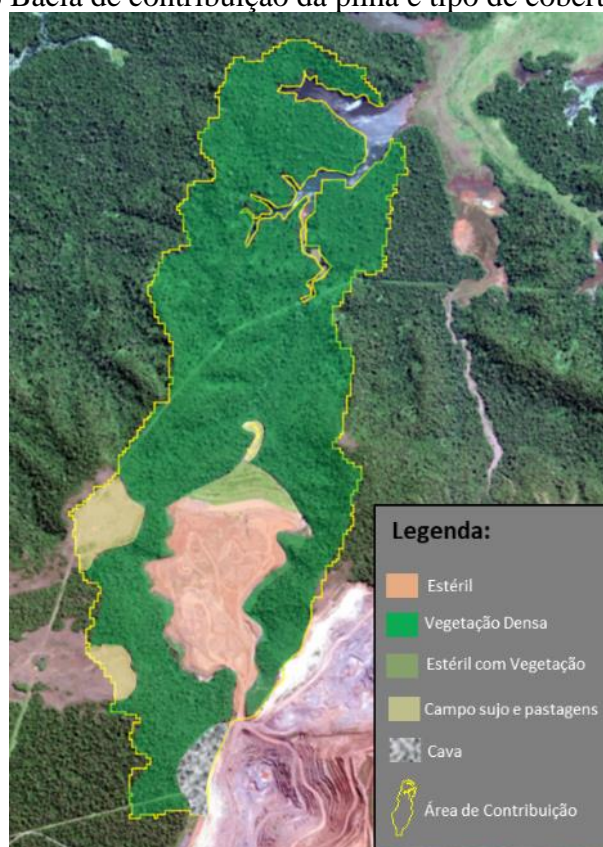


Fonte: Modificada do HUB da Vale, 2016.

A interpretação visual da cena ainda auxiliou na edição matricial e vetorial do mapeamento, modificando pixels erroneamente classificados e realizando o mapeamento de

classes para imagem temática. Assim, obteve-se uma imagem temática classificada, cujas classes de uso e ocupação do solo estão apresentadas na Figura 48, assim como os valores do coeficiente de escoamento superficial (C) e suas respectivas áreas, em função da ocupação do solo estão apresentadas na Tabela 12.

Figura 48 Bacia de contribuição da pilha e tipo de cobertura de solo.



Fonte: Própria, 2017.

Tabela 12 Valores de coeficiente de escoamento superficial.

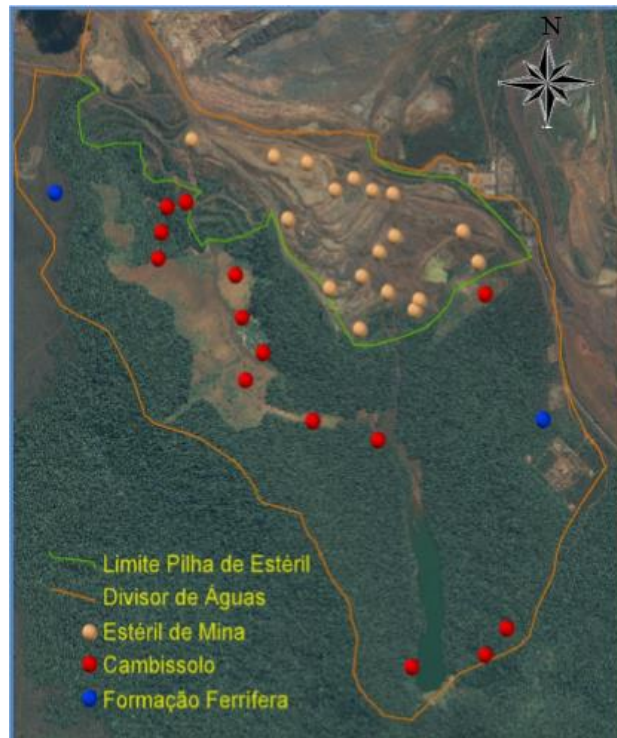
Bacia	Sub-bacia	Área de Drenagem (km ²)	C
PDE NW II	Pilha de estéril (superfície exposta)	1,40	0,6
	Pilha de estéril (fase final c/ cobertura vegetal)	0,36	0,5
	Campo natural (vegetação baixa)	0,48	0,5
	Florestas e matas densas	7,65	0,2
	Cava	0,28	0,7
	Total	10,17	-

Fonte: Adaptado de Pinheiro, 2011.

Os valores de erodibilidade para solos da Província Mineral de Carajás disponíveis na literatura foram compilados em relação às unidades pedológicas similares às da área da bacia de contribuição da PDE NW II. Os valores do fator K foram obtidos principalmente dos estudos de Gomes (2012), sendo semelhantes. Foram encontrados em regiões de estudo próximas da bacia de contribuição da PDE NW II e adicionados à tabela de atributos do mapa de solos.

A área estudada por Gomes (2012) é uma pilha de estéril localizada na Província Mineral de Carajás, nas proximidades da PDE NW II. Para a geração do fator de erodibilidade (K), o autor realizou ensaios de granulometria em 32 amostras deformadas coletadas da área de estudo. A Figura 49 apresenta a localização dos pontos de coleta das amostras deformadas e na Tabela 13 segue o resultado das análises.

Figura 49 Pontos de coleta das amostras deformadas na PDE SUL.



Fonte: Gomes, 2012.

Tabela 13 Valores adotados do fator erodibilidade de cada tipo de solo.

Solo	Erodibilidade (k) (T.ha.h/ha.MJ.mm)
Estéril de Mina	0,0280
Formação Ferrífera	0,0001
Cambissolo	0,0158
Água (Reservatório)	0,0000

Fonte: Gomes, 2012.

Pela classificação proposta por Mannigel e colaboradores (2002), conforme apresentado na Tabela 4 do subitem 3.5.2, os solos da Província Mineral de Carajás tem propensão média à erodibilidade. Já o fator erosividade da chuva (R) foi calculado com base nos totais mensais e anuais das precipitações da estação pluviométrica Mirante N4-E, utilizando os dados consistidos, apresentados na Tabela 14 abaixo.

Tabela 14 Precipitações Média Mensal e Anual na bacia hidrográfica da PDE NW II.

Nome da Estação	Precipitação Média Mensal (mm)												Precipitação Média Anual (mm)
	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	
Mirante N4-E	77,4	108,3	154,8	226,6	250,2	298,3	315,8	207,5	113,8	27,1	17,5	27,2	1824,4

Fonte: Adaptado de Vale, 2009.

A bacia da PDE NW II apresentou fator de erosividade (R) anual no valor de 8.899,64 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹. A partir desse resultado, pode-se dizer que a bacia possui erosividade FORTE, de acordo com a interpretação proposta por Carvalho (2008). A Tabela 15 apresenta o resultado do fator R para a bacia da PDE NW II.

Tabela 15 Erosividade anual (em MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹) na bacia da PDE NW II.

Estação	Precipitação Média Anual	Índice de Erosividade (EI)
	(mm)	(MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹)
Mirante N4-E	1.824,40	8.899,64

Fonte: Própria, 2018.

5.1.3 Avaliação do transporte de sedimento

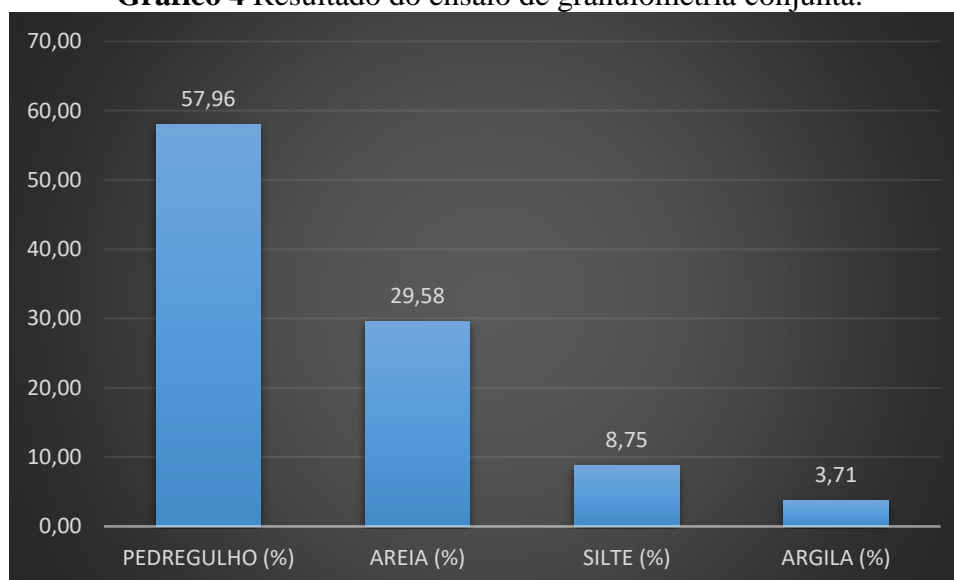
A fim de evidenciar e quantificar o volume de sedimento carregado pela chuva para porção à jusante da pilha, foi feita uma avaliação topográfica comparativa do braço 3 na condição atual e primitiva, antes da construção da pilha de estéril. O resultado do processamento indicou um volume de 48.130,12m³ de sedimento depositado ao longo do braço 3.

Considerando que este sedimento foi depositado ao longo de 10 anos de operação da PDE NW II, para uma área de drenagem de 1.017ha, então a taxa de geração de sedimento foi em torno de 4,73 m³/ha/ano. Esta taxa de geração de sedimento pode ser considerada ínfima (<98%) diante da taxa mínima (250m³/ha/ano) adotada para a mensuração do volume a ser aportado para as estruturas de contenção de finos.

O fator erodibilidade (K) indicou que dentre as coberturas de solo da PDE NW II, o estéril tem maior propensão à erodibilidade, portanto se considerarmos que todo sedimento depositado no braço 3 é proveniente apenas da área de drenagem da pilha de estéril (176ha), nesse caso a taxa de geração de sedimento seria de 27,34%, ainda assim ínfima em relação à taxa mínima adotada (250m³/ha/ano).

No intuito de conhecer os tipos de materiais que poderiam ser carreados, foi realizada uma campanha de coleta de amostras de solo deformado. O material estudado fora prospectado em diferentes pontos, entre o “pé” da pilha e o dique de contenção desativado, perfazendo um total de 12 furos de sondagem a trado. Cujo resultado da caracterização granulométrica segue apresentado no Gráfico 4.

Gráfico 4 Resultado do ensaio de granulometria conjunta.



Fonte: Própria, 2018.

Colocar curva granulométricas com as espessuras

Pelo resultado observa-se que houve carreamento de todo tipo de material, o que confirma a heterogeneidade do estéril disposto em uma pilha. No caso dessa pilha, o gráfico mostra que os agregados graúdos foram contidos no dique de sedimento, e acredita-se que as porções mais finas de solo chegaram até o braço da barragem.

6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

A redução de geração de sedimento em pilhas de estéril está relacionada, em sua maioria, com uma gestão eficiente dessas estruturas, e compreende de um conjunto de ações aplicáveis desde a implantação da pilha até o seu fechamento, bem como aos monitoramentos que são essenciais para o acompanhamento da eficiência das ações de controle adotadas.

No geral, atividades de corte/aterro e de escavação/fundação e qualquer alteração direta que se faça em ambientes naturais podem induzir ou acelerar os processos erosivos e movimentações de massa, gerando sedimentos que podem comprometer a qualidade ambiental e o equilíbrio de áreas afetadas.

Na implantação de uma pilha de estéril, dentre as atividades e processos que notadamente são passíveis de ocorrência de processos erosivos e geração de sedimentos, pode-se citar a abertura de acessos e estradas de serviço, limpeza do terreno e supressão vegetal, execução de fundações, instalação de canteiro de obras e a construção de áreas de disposição de material excedente (ADME), pois envolvem supressão vegetal, exposição da camada superficial do solo e de seus horizontes subjacentes, modificação da paisagem natural e movimentação de material terroso. Já na fase operacional, a própria disposição de estéril caracteriza a principal atividade que propicia a geração de sedimento.

De acordo com as análises realizadas da área de estudo, a PDE NW II apresentou uma boa performance na gestão dos seus sedimentos, pois de acordo com o resultado do processamento da quantificação de sedimento transportado para a região à jusante da pilha, o braço 3 apresentou um volume ínfimo de sedimento depositado, ao longo de 10 anos, em sua extensão. Uma outra condição positiva é que o braço 3 está localizado de forma que não permite a saída do sedimento dessa região, pois o bloqueio criado pela praia de rejeitos mais a jusante, permite que praticamente todo sedimento fino transportado seja retido e decantado nesta região, inclusive durante o período chuvoso. Esta condição nem sempre é alcançada com a mesma eficiência por estruturas de contenção de sedimentos em geral.

A condição atual da pilha é outro indicador de que os controles implementados foram eficientes, pois nas inspeções visuais é possível visualizar que o transporte de sedimento cessou. Atualmente a disposição de estéril na pilha, está localizada mais ao fundo da mesma, essa situação e mais a instalação de bacias intermediárias permitiu a redução da contribuição de sedimento para os canais periféricos e para o cordão drenante, conforme pode ser visto na Figura 50 onde é apresentada a condição do reservatório e da qualidade de água que percorre a jusante. A água se encontra sem carreamento de sólidos e sem turbidez. O reservatório se

encontra revegetado, exceto no leito do curso de água.

Figura 50 Ponto de deságue do cordão drenante sem presença de sedimento.



Fonte: Própria, 2017.

Esta geração de sedimento se deve ao fato de que a PDE NW II está localizada em uma região onde a bacia de contribuição é formada por solos (Latosolos vermelho-amarelo), cujo fator de erodibilidade (K), conforme análise implementada, apresentou propensão MÉDIA à erodibilidade. Isso significa que o manejo inadequado desses solos pode acarretar na formação de processos erosivos. Tal situação é desencadeada principalmente na presença da água, sendo que o fator erosividade da chuva (R) apresentou classificação FORTE, para a bacia, constituindo o período chuvoso como um período que requer controles mais criteriosos, principalmente na fase operacional, a fim de reduzir a contribuição de sedimentos gerados em pilhas de estéril. Nesse sentido, seguem abaixo os critérios operacionais, cujo objetivo principal é imprimir melhorias nas condições de drenagem de forma a minimizar o transporte de sedimento nas calhas e leitos dos rios durante o período chuvoso:

- a) Elaborar planejamento de supressão vegetal, de forma que a área de construção da pilha seja suprimida somente quando houver necessidade. Quanto maior a área desnuda, maior a geração de sedimento.
- b) Analisar a geometria adotada para a estrutura, pois se não for condizente para o tipo de material disposto na pilha, a mesma poderá ficar instável e com isso incorrer em rupturas. Isso acontece principalmente com bancos muito altos e inclinações muito fortes.
- c) Executar análises topográficas à medida que os bancos forem construídos, pois dessa

- forma haverá certificação se a geometria está sendo executada conforme projeto.
- d) Construir bacias de controle sedimento na área de expansão da própria pilha, de forma que o material decantado fique em seu interior.
 - e) Construir bacias de controle de sedimento definitivas, de forma a atender à pilha, inclusive após o descomissionamento da mesma.
 - f) Não dispor material úmido e nem blocoso na face dos taludes, pois o material úmido pode criar zonas de instabilidade na pilha e os blocosos podem causar acidentes, em caso de instabilizações. Qualquer disposição de material úmido no corpo da pilha deve ser precedido de análise geotécnica de estabilidade.
 - g) Realizar manutenção das drenagens operacionais, principalmente nas bermas e platôs, pois são drenagens cuja a água é direcionada pelo próprio solo. Caso as inclinações implementadas sejam além da planejada, incidirão em processos erosivos com carreamento de sedimento para as porções a jusante da estrutura. E se forem aquém da planejada poderão incidir em zona de empoçamentos com propensão à formação de rupturas.
 - h) Implementar largura das bermas de forma a atender às considerações de drenagem e garantir acesso de equipamentos de manutenção com segurança.
 - i) Construir barreiras dissipadoras de energia da água, em acessos com fortes inclinações para controlar o volume e a velocidade do escoamento superficial.
 - j) Evitar direcionamento de águas bombeadas para bermas e trechos de canais não revestidos, pois podem aumentar a taxa de geração de sedimentos e criar instabilizações localizadas de taludes.
 - k) Retaludar os bancos finalizados e/ou retirar o excesso de solo solto de bancos operacionais, antes do período de chuva. O excesso de solo solto na face do talude, durante o período chuvoso, escorre pelos taludes e é direcionado para as estruturas de drenagem ou criar empoçamentos/rupturas nos bancos.
 - l) Executar recuperação vegetal dos bancos finalizados e/ou dos bancos operacionais que ficarão mais de dois períodos chuvosos sem intervenções. A ausência de proteção vegetal de taludes rebatidos pode criar ravinamentos na face dos taludes;
 - m) Corrigir falhas de proteção vegetal executadas em outras épocas.
 - n) Limpar as bacias de controle de sedimento, definitivas e temporárias, antes do período de chuva. O sedimento retirado das bacias deverá retornar para a pilha, preferencialmente em áreas confinadas.
 - o) Executar canais periféricos em concreto nas ombreiras da pilha, a fim de evitar o

direcionamento da drenagem em fortes inclinações do aterro.

- p) Implantar trechos de descidas d'água em bancos finalizados, assim como os denominados “convites” de concreto nas bermas e/ou acessos para disciplinar o fluxo de água.
- q) Implantar, monitorar e avaliar periodicamente a instrumentação instalada na pilha com intuito de identificar qualquer anomalia que possa conduzir a algum dano à estrutura.
- r) Executar rotina de inspeções geotécnicas com implementação de um controle de anomalias, cuja função é atuar de forma preventiva frente a ocorrências de naturezas diversas na estrutura, inclusive ambiental.

Conseguir anular a geração de sedimento na formação de uma pilha de estéril é impraticável, porém conseguir a minimização desse carregamento, caracteriza uma gestão eficiente no controle do sedimento.

REFERÊNCIAS

- ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13029 - **Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha**. Rio de Janeiro, ABNT, 05/2006. 5p.
- ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7181 - **Solo – Análise Granulométrica**. Rio de Janeiro, ABNT, 12/1984. 13p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Manual de construção da base hidrográfica ottocodificada: fase 1 - construção da base topológica de hidrografia e ottobacias conforme a codificação de bacias hidrográficas de Otto Pfafstetter**: Versão 2.0. Brasília, ANA/SGI, 2007. 144p.
- AL-BAYATI, M. A.; OTHMAN, N. Y. (2014) **Water balance of Haditha Reservoir**. Journal of Babylon University, nº 4, vol. 22
- ARAGÃO, G. A. S.; OLIVEIRA FILHO, W. L. **Mine dump classification in the iron ore mining**. Rem: Revista Escola de Minas, 2011 Apr-Jun. Vol 64(2), pp.193-198 – Web of Science.
- BARKAU, R. L., **UNET: One-Dimensional Unsteady Flow Throught a Full Network of Open Channels – User’s Manual**, Hydrologic Engineering Center, Davis CA, 1996.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 7. ed. São Paulo: Ícone, 2010. 355 p.
- BEVEN, K. “**Changing ideas in Hydrology - the case of physically-based models**”, Journal of Hydrology, 105, 157-172, 1989.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J., SALES, M.M., SOUZA, N.M. de & MELO, M.T. da S., 2006: **Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro**. Brasília: Universidade de Brasília: Finatec, 464 p.
- CALIXTO, B. B. Estimativa indireta da erodibilidade (K) dos solos da Bacia do Ribeirão Pípiripau – DF usando dados pedológicos locais. 2013. 67 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Florestal) –Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília 2013.
- CARVALHO, N. de O. **Hidrossedimentologia Prática**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008. 599 p. Inclui bibliografia. ISBN 978- 85- 7193- 181- 7.
- CASTRO, W. J. de; LEMKE-DE-CASTRO, M. L.; LIMA, J. de O.; OLIVEIRA, L. F. C. de; RODRIGUES, C.; FIGUEIREDO, C. C. de. Erodibilidade de solos do Cerrado goiano. Revista em Agronegócios e Meio Ambiente, Maringá, v. 4, n. 2, p. 305-320, 2011
- CELLA, P. R. C.; MICHELUZZI, V. F. C.; NASCIMENTO, M. A. G.; VIRGILI, G. S.; ALVARES, R.A. **Balanco hídrico de longo termo – Estudo de caso da barragem Bocaiúva**. In: 15º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, Bento Gonçalves –RS, 2015

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1988.

CLARK, C. O. **Storage and the unit-hydrograph**. Trans. Amer. Soc. Civ. Eng., v. 110, n. 2261, p. 1416-1446, 1945.

DERPSCH, R., ROTH, C.H., SIDIRAS, N. & KÖPKE, U. **Controle da erosão no Paraná, Brasil: Sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo**. Londrina: IAPAR, 1990. 272p. Sonderpublikation der GTZ, No. 245 Deutsche Gesellschaft für Technische. ISBN 3-88085-433-5.

DIAZ, J. S. **Manual de ingeniería para el control de erosión**. Universidad Industrial de Santander, 1992. 318 p.

DI BELLO, Rafael Carneiro. **Análise do Comportamento da Umidade do Solo no Modelo Chuva-Vazão SMAP II – Versão com Suavização Hiperbólica**. Estudo de Caso: Região de Barreiras na Bacia do rio Grande - BA [Rio de Janeiro] 2005. 225 p. (Dissertação de Mestrado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

EATON, T.; BROUGHTON, S.; BERGER, K. C.; Piteau Associates Engineerin Ltda (2005). **Course Introduction Design and Operation of Large Waste Dumps**. Under Licence from the British Columbia Ministry of Energy and Mines – Mine Dump Committee.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Apostila Construção de terraços para controle de erosão pluvial no estado do Acre**, 2004.

FAIRFIELD, J. & LEYMARIE, P. **Drainage networks from grid digital elevation models**. Water Res. Res., 27:709-717, 1991.

FAGUNDES, J.R.T. **Balanço hídrico do bota-fora BF4 da Mina Osamu Utsumi, INB, como subsídio para projetos de remediação de drenagem ácida**. Ouro Preto. 2005. 147p. (Dissertação de Mestrado) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais.

FARIA, T. O.; VECCHIATO, A. B.; SALOMÃO, F. X. T.; SANTOS Jr, W. A. **Abordagem morfopedológica para diagnóstico e controle de processos erosivos**. Rev. Ambient. Água [online]. 2013, vol.8, n.2, pp.215-232. ISSN 1980-993X. (<http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1007>).

GLYSSON, G. D. (1987). **Sediment-transport curves**. U.S. Geological Survey. Open-File Report 87-218, 47pp., <https://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr87218>

GOLDER ASSOCIATES. **Caracterização Hidrológica Preliminar e Avaliação do Potencial das Bacias Hidrográficas nas Áreas das Flonas, no Entorno da Província Mineral de Carajás – Relatório Final - Documento nº RT-069-5616-5130-0016-00-B**. Golder, Dezembro, 2006.

GOMES, Leonardo Leopoldo. **Avaliação espacial da perda de solo por erosão pela equação universal de perda do solo (EUPS)** – pilha de estéril sul – carajás/pa. 2012. 192f. (Dissertação de Mestrado) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais.

HEWLETT, J.D. **Principles of forest hydrology**. Athens, University of Georgia, 1982.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Normas Climatológicas** – 1961-1990. Brasília, 1992.

JENSON, S.K. & DOMINGUE, J.O. **Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis**. Photogr. Eng. Rem. Sens., 54:1593-1600, 1988.

Lal, R. & Shukla, M.K. **Principles of Soil Physics**. Marcel Dekker, New York, 2004. x + 716 pp. US\$95, hardback. ISBN 0-8247-5324-0.

LINSLEY, R. K. (1981). **Rainfall-runoff models: na overview**. In: SINGH, V.P. (org.). Rainfall-runoff relationship. P. 3-22. Apresentado no Internacional Symposium on Rainfall-runoff Modelling, Mississippi, maio 1981.

MACHADO, F. W. **Modelagem Chuva-Vazão Mensal utilizando Redes Neurais Artificiais**. Curitiba. 2005. 174p. (Dissertação de Mestrado) – Universidade Federal do Paraná.

MEMPR (2005). Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources. **Design and Operation of Large Waste**, British Columbia.

MULVANEY, T. J. 1851. **On the Use of Self-Registering Rainfall and Flood Gauges**, Institute of Civil Engineers Transactions (Ireland), Vol. 4, No. 2, pp. 1-8.

NUNES, Diego dos Ramos. **Comportamento geotécnico de pilha de estéril formada pelo método de disposição por correia**. 2014. 112f. (Dissertação de Mestrado) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais.

OHTSU, I., YASUDA, Y., TAKAHASHI, M. **Flow Characteristics of Skimming Flows in Stepped Channels**. Journal of Hydraulic Engineering. American Society of Civil Engineers. v. 130. n. 9. p.860-869. 2004.

PACA, Victor Hugo da Motta. **Análise de informações satelitais e dados convencionais da rede pluvio-fluviométrica como contribuição a modelagem hidrológica na região Amazônica - Estudo de caso: bacia do Rio Guamá – Pará** [Rio de Janeiro] 2008 XI, 121 p. (Dissertação de Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro.

PETRONILHO, M. R. **Avaliação do comportamento geotécnico de pilhas de estéril por meio de análise de risco**. 2010. 137p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2010.

PINHEIRO, Mario Cicareli. **Diretrizes para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamentos hidráulicos em obras de mineração**. 1. ed. Porto Alegre: ABRH, 2011. 308p. ISBN 8588868632-5.

PRUSKI, F. F. (Ed.). Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica. 2. ed. atual. e ampl. Viçosa, MG: UFV, 2009. 279 p.

RENNÓ, C. D.; SOARES J. V. **Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental**. INPE: Relatório Técnico Parcial. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000

RIGHETTO, A. M. **Hidrologia e Recursos Hídricos**, São Carlos: Publicação EESC-USP, 1998.

ROSA, David Rafael Quintão. **Modelagem hidrossedimentológica na bacia hidrográfica do rio pomba utilizando o SWAT**. Viçosa, MG, 2016.

SALOMÃO, F. X. de T. **Controle e prevenção dos processos erosivos**. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. da; BOTELHO, R. G. M. erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010. p. 229-268.

SCS - Soil Conservation Service. **A Method for Estimating Volume and Rate of Runoff in Small Watersheds**. Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture, 1973. (SCS-TP 149).

SETE, 2010. **Relatório Ambiental (RA)** – Nova Fábrica de Explosivos, Complexo Minerador de Carajás. Belo Horizonte.

SHERMAN, L. K. **Streamflow from rainfall by the unit-graph method**, Eng. News Rec., v. 108, n. 14, p. 501-506, 1932.

SILVEIRA, André Luiz Lopes da. **Fator de Pico para Hidrogramas Unitários Sintéticos Triangulares**. RBRH [online]. 2016, vol.21, n.1, pp.46-52. ISSN 2318-0331. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p46-52>.

SNYDER, F. F. **Synthetic unit-graphs**. Trans. Am. Geophys. Union, v. 19, n. 1, p. 447-454, 1938.

SUBCOMMITTEE ON SEDIMENTATION. **Determination of fluvial sediment discharge**. Washington, D.C. 1963 (Report nº 14).

SUDAM – Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia, Ministério do Interior. Atlas Climatológico da Amazônia Brasileira – **Projeto de Hidrologia e Climatologia da Amazônia** – PHCA. Belém, 1984.

TUCCI, C.E.M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre . Editora da Universidade .UFRGS, ABRH, 1998.

TUCCI, C.E.M. **Modelo hidrológicos. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2005.**

TUCCI, C. E. M., **Inundações Urbanas**, Coleção ABRH de Recursos Hídricos – Volume 11, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Editora da Universidade, Porto Alegre-RS, 2007.

USACE – U.S. Army Corps of Engineers, **HEC-HMS: Hydrologic Modeling System – User’s Manual**, Hydrologic Engineering Center, 2010.

VALE (2009). Relatório Técnico - RL-1000KN-B-01378 - **Projeto Executivo Complexo Carajás Pilha de estéril Noroeste II**, elaborado pela Golder Associates em agosto de 2009.

WHITEHEAD, P.G.; ROBINSON, M. (1993) **Experimental basin studies: an international and historical perspective of forest impacts**. Journal of Hydrology , v. 145, n. 3-4, p. 217-230.

ZAKIA, M. J. B. **Identificação e Caracterização da Zona Ripária em uma Microbacia Experimental: Implicações no Manejo de Bacias Hidrográficas e na Recomposição de Florestas**. São Carlos: USP/EESC, 1998. 98p. (Tese - Doutorado).

ZACHAR, D. (1982). **Soil Erosion**. Brastislava (Czechoslovakia): Elsevier, Developments in Soil Science. 547p.