



**REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP  
ESCOLA DE MINAS  
Departamento de Engenharia De Minas  
Campus Morro do Cruzeiro  
Ouro Preto – Minas Gerais - Brasil**



**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO EM ENGENHARIA DE  
MINAS**

**ANÁLISES DE ALTERNATIVAS DE FECHAMENTO DE UMA  
BARRAGEM**

**Bruno Alvarenga Fraga**

**Ouro Preto, Dezembro de 2019**

**Bruno Alvarenga Fraga**

**Análises de Alternativas de Fechamento de Uma Barragem**

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito básico para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas.

**Orientador: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima**

**Ouro Preto, Dezembro de 2019**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

F811a Fraga, Bruno Alvarenga .  
Análises de alternativas de fechamento de uma barragem. [manuscrito] / Bruno  
Alvarenga Fraga. - 2019.  
39 f.: il.: color., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de  
Minas.

1. Barragens de rejeitos. 2. Segurança nas minas. 3. Direito de minas. I. Lima,  
Hernani Mota de. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.86

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



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas - Departamento de Engenharia de Minas

## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 17 dias do mês de dezembro de 2019, às 16h00min, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas DEMIN/EM, no Campus Universitário Morro do Cruzeiro, foi realizada a defesa da Monografia de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, intitulado “ANÁLISES DE ALTERNATIVAS DE FECHAMENTO DE BARRAGEM”, pelo aluno **Bruno Alvarenga Fraga**, sendo a comissão avaliadora formada por **Prof. Dr. Hernani Mota de Lima (orientador)**, **Prof. Dr. Felipe Ribeiro de Souza** e **Eng.º de Minas Lucas Bianchetti Drumon**.

Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou pela *aprovação* do candidato, com a nota *8,0* concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.

O aluno fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após o depósito, no site do Repositório UFOP, da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.

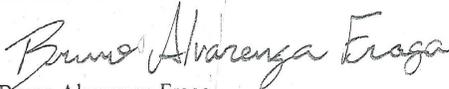
Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pelo discente.

Ouro Preto, 17 de dezembro de 2019.

  
Prof. Dr. Hernani Mota de Lima  
Presidente da Comissão Avaliadora e Orientador

  
Prof. Dr. Felipe Ribeiro de Souza  
Membro da Comissão Avaliadora

  
Eng.º de Minas Lucas Bianchetti Drumon  
Membro da Comissão Avaliadora

  
Bruno Alvarenga Fraga

  
Prof. M.Sc. José Fernando Miranda  
Professor responsável pela Disciplina Min 492 – Trabalho de Conclusão de Curso

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais, Alexandre e Luiza, razão do meu viver, pela dedicação e confiança nessa etapa. Aos amigos e professores pelo aprendizado diário.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Alexandre e Luiza, por me apoiarem em todos os momentos da minha vida, por ser amor no mais puro significado da palavra. A cada etapa vencida, vencemos juntos, só espero que um dia os meus filhos possam sentir um orgulho igual por mim.

A UFOP e aos professores que tive a oportunidade de conhecer, pelo ensino gratuito e de qualidade.

Ao meu orientador Prof. Dr. Hernani Mota de Lima pela prontidão e conhecimento que proporcionaram a realização deste trabalho.

À minha família pelo suporte e apoio.

Aos amigos de Ribeirão Vermelho e Ouro Preto pela amizade sincera.

## **RESUMO**

A mineração sempre enfrentou durante sua existência problemas para descartar seus rejeitos provenientes da atividade. Uma das soluções encontradas foi à construção de barragens. Todavia essas barragens de contenção do rejeito possuem características que se não forem bem estruturadas, podem oferecer danos para comunidade. Após alguns acidentes recentemente com essas barragens, tomou-se uma medida para descaracterizar todas as barragens construídas pelo método de alteamento a montante. Neste sentido, o presente estudo tem como objetivo avaliar alternativas para o fechamento de uma barragem localizada nos arredores do município de Ouro Preto, Minas Gerais. A metodologia contou com uma análise das características dessa barragem a fim de encontrar uma solução que condiz com a legislação vigente. De posse dos dados, concluiu-se que a solução mais viável seria a remoção total do maciço principal e do dique auxiliar 1.

Palavras-chave: barragem, rejeito, descaracterizar, maciço, legislação.

## **ABSTRACT**

Mining has always struggled during its existence to discard its tailings from mining. One of the solutions found was the construction of dams. However, these tailings containment dams have characteristics that, if not well structured, can offer damage to the community. After some recent accidents with these dams, a measure has been taken to de-characterize all dams built by the upstream elevation method. In this sense, the present study aims to evaluate alternatives for closing a dam located on the outskirts of Ouro Preto, Minas Gerais. The methodology included an analysis of the characteristics of this dam in order to find a solution that complies with current legislation. With the data, it was concluded that the most viable solution would be the total removal of the main massif and the auxiliary dike 1.

Keywords: dam, tailings, mischaracterization, massive, legislation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Vista geral da barragem.....	1
Figura 2 – Mapa do entorno regional da área de estudo (CODEMIG 2014).....	7
Figura 3 – Seção da Barragem.....	11
Figura 4 – Seção atual da barragem – Seção B-B. ....	13
Figura 5 – Seção atual do Dique Auxiliar 1 – Seção E-E. ....	13
Figura 6 – Vista em planta da alternativa 1.....	18
Figura 7 - Vista em planta da alternativa 2. ....	20
Figura 8 - Vista em planta da alternativa 3. ....	22
Figura 9 - Vista em planta da alternativa 4. ....	24

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critérios de projeto para fechamento de barragens de mineração (Adaptado de MIRO, 1999). .....	5
Tabela 2 - Parâmetros geotécnicos drenados utilizados nas análises de estabilidade. Dados internos da empresa.....	12
Tabela 3 - Parâmetros geotécnicos adotados nas análises de estabilidade para a condição não drenada. Dados internos da empresa. ....	12
Tabela 4 - Fatores de Segurança Mínimos para a Barragem - NBR 13.028 (2017).....	14
Tabela 5 - Resultado das análises de estabilidade para condição drenada.....	14
Tabela 6 - Resumo dos resultados das análises de estabilidade na condição não drenada. .	15
Tabela 7 - Elevação da soleira da alternativa 3. ....	23
Tabela 8 - Elevação da soleira na alternatia 4. ....	25
Tabela 9 - Pontos positivos e negativos das alternativas. ....	27

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
2 OBJETIVOS .....	2
2.1 Objetivo Geral.....	2
2.2 Objetivos Específicos .....	2
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
3.1 Contextualização Teórica .....	3
3.2 Resoluções De Barragens De Mineração .....	3
3.3 Geologia Geral .....	6
3.3.1 Geologia.....	6
3.3.2 Sismicidade Regional .....	8
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	9
4.1 Análises Iniciais .....	9
5 ESTUDO DE CASO .....	11
5.1 Maciço – Barragem Principal e Dique Auxiliar 1.....	11
5.2 Estudos Geotécnicos.....	12
5.3 Condições Drenadas.....	13
5.4 Condições Não Drenadas.....	15
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	17
6.1 Alternativa 1.....	17
6.2 Alternativa 2.....	19
6.3 Alternativa 3.....	21
6.4 Alternativa 4.....	23
6.5 Avaliações Das Alternativas .....	25
7 CONCLUSÃO .....	28
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	29

## 1.INTRODUÇÃO

As barragens de rejeito provenientes da atividade minerária sempre foram um alvo de discussões, quanto à poluição e o aos danos sobre o risco de rompimento das mesmas. Após os acidentes em duas barragens em minas gerais, essa discussão tem se aprofundado cada vez mais.

No dia 25/02/2019 foi sancionada a Lei 23.291, de 2019, que determina o fim das barragens construídas pelo método alteamento a montante. Essa lei proíbe a construção de novas barragens por este método e também obriga o empreendedor que já possui uma barragem nestes moldes, que descaracterize (esvazie) as barragens já inativas e utilize outras tecnologias para descartar seu rejeito.

O presente estudo tem como objetivo apresentar soluções para descaracterização de uma barragem incluindo suas estruturas auxiliares. Essa barragem oferece riscos às comunidades situadas ao longo do caminho da cheia, em caso de sua ruptura.

A Figura 1 apresenta uma vista geral da barragem e suas estruturas.



Figura 1 – Vista geral da barragem.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho foi apresentar soluções alternativas para a descaracterização da barragem em presente estudo, elaboradas com base nos estudos hidrológicos e geotécnicos desenvolvidos a partir da análise dos documentos disponibilizados.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Propor soluções que sejam elaboradas de modo a reduzir a altura das estruturas geotécnicas e dos rejeitos, manter a freática em posição baixa, drenar a área interna ao barramento e manter as estruturas estáveis perante as condições drenadas e de liquefação.

Avaliar as quatro alternativas para o fechamento da barragem:

- Remoção total do maciço principal, diques e do rejeito, com posterior reconformação do relevo natural original e revegetação da área com espécies da flora nativa.
- Remoção parcial da barragem, dos diques e do rejeito; reforço do maciço principal e do Dique 1 por jusante; implantação de drenagem superficial e capeamento do reservatório com solo vegetal e vegetação da área com espécies da flora nativa.
- Reforço do maciço principal e dique auxiliar 1, implantação de drenagem superficial e capeamento do reservatório com solo vegetal e vegetação da área com espécies da flora nativa.
- Construção de uma barragem a jusante do maciço principal e do Dique 1, por linha de centro e porção jusante em enrocamento, implantação de drenagem superficial e capeamento da praia do reservatório com solo vegetal e vegetação da área com espécies da flora nativa.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Contextualização Teórica**

Em 5 de novembro de 2015, a barragem de rejeitos de Fundão, da Samarco, rompeu causando 19 mortes e destruindo o vale do rio Doce em mais de 600 km. Em 25 de janeiro de 2019, a barragem de rejeitos B1 da Mina de Córrego do Feijão da Companhia Vale, também rompeu, causando 248 mortes. As duas barragens de rejeitos, em Mariana e Brumadinho, eram de alteamento de montante. Existem mais de 600 barragens de rejeitos de mineração no Brasil, das quais 400 em Minas Gerais (MG), oitenta (80) barragens são construídas pelo método de montante. Segundo a Secretaria de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Minas Gerais (SEMAD), existem 50 barragens de montante no Estado. Deste total, 27 estão em operação e 22 paralisadas. O município de Ouro Preto possui 29 barragens de rejeitos das quais 10 são de alteamento de montante.

Em Minas Gerais e em nível federal, leis mais rigorosas sobre monitoramento e licenciamento foram introduzidas e o governo mineiro ordenou o fechamento de todas as barragens de rejeitos construídas pelo método de montante. No contexto atual da indústria da mineração, observa-se uma estratégia de minimização dos riscos e dos passivos associados às barragens, a partir da implantação de soluções de engenharia para o fechamento dessas estruturas. Na literatura técnica entende-se por fechamento de barragens a conclusão das etapas de desativação da estrutura e a reabilitação da área.

#### **3.2 Resoluções De Barragens De Mineração**

Dentre as resoluções da atual legislação quanto o fechamento de mina e barragem, cabe destacar:

A ABNT NBR 13.028/2017: que estabelece os requisitos mínimos para a elaboração e apresentação de projeto de barragens, visando atender às condições de segurança, operacionalidade, economicidade e desativação destas estruturas, minimizando os impactos ao meio ambiente. Segundo a referida norma, o plano de fechamento conceitual da barragem deve incluir uma descrição dos processos, atividades e alternativas de uso futuro, buscando se integrar ao plano de fechamento da mina, atendendo à legislação específica. Já o plano de desativação conceitual deve contemplar todas as atividades após o fim da vida útil operacional da barragem, tais quais medidas de

monitoramento e instrumentação, revestimentos, sistema de drenagem superficial e garantia de estabilidade.

A Agência Nacional de Mineração (ANM) por meio da Resolução N° 4, de 15 de fevereiro de 2019, define barragem descaracterizada como aquela que não opera como estrutura de contenção de sedimentos ou rejeitos, não mais possui as características de barragem de mineração, sendo destinada a outra finalidade, considerando a retirada de todo o material depositado na barragem, incluindo diques e maciços onde a barragem deixa de existir no final do processo.

A Resolução ANM n° 13, de 8 de agosto de 2019, altera o Art. 15 da Portaria do extinto Departamento Nacional de Pesquisa Mineral (DNPM) n° 70.389, de 17 de maio de 2017, onde considera barragem de mineração descaracterizada como a estrutura que não recebe, permanentemente, aporte de rejeitos e/ou sedimentos oriundos de sua atividade fim, a qual deixa de possuir características ou de exercer função de barragem, de acordo com projeto técnico, compreendendo, mas não se limitando, às seguintes etapas concluídas, dentre as quais cita o descomissionamento como o encerramento das operações com a remoção das infraestruturas associadas, tais como, mas não se limitando, a espigotes, tubulações, exceto aquelas destinadas à garantia da segurança da estrutura.

Independente dos termos, soluções para fechamento de uma barragem devem buscar a estabilidade geotécnica da estrutura ou área em diversos aspectos (Tabela 1), assim como, a reintegração desta área ao meio ambiente e ao entorno.

Tabela 1 - Critérios de projeto para fechamento de barragens de mineração (Adaptado de MIRO, 1999).

<b>Premissa</b>	<b>Critério de Fechamento</b>
<b>Estabilidade Física</b>	Estabilização física das estruturas construídas, diminuindo os riscos à segurança ou impactos ambientais;
<b>Estabilidade Química</b>	Estabilização química das estruturas físicas, evitando contaminações e risco à saúde pública;
<b>Estabilidade Biológica</b>	Restauração da biota para um ecossistema balanceado, autossustentável e endêmico. Ou no mínimo, para um ambiente estável, que favoreça a reabilitação natural e o desenvolvimento da diversidade biológica;
<b>Hidrologia e Hidrogeologia</b>	Prevenção da migração de contaminantes à jusante (águas superficiais e subterrâneas);
<b>Influências geográficas e climáticas</b>	Adequação às características de clima e topografia locais.
<b>Oportunidades</b>	Otimização das oportunidades para a restauração do local.
<b>Uso Futuro</b>	Compatibilização do uso futuro com as necessidades e anseios das comunidades do entorno.
<b>Garantia Financeira</b>	Maximização dos impactos socioeconômicos positivos.
<b>Considerações socioeconômicas</b>	Maximização dos impactos socioeconômicos positivos.

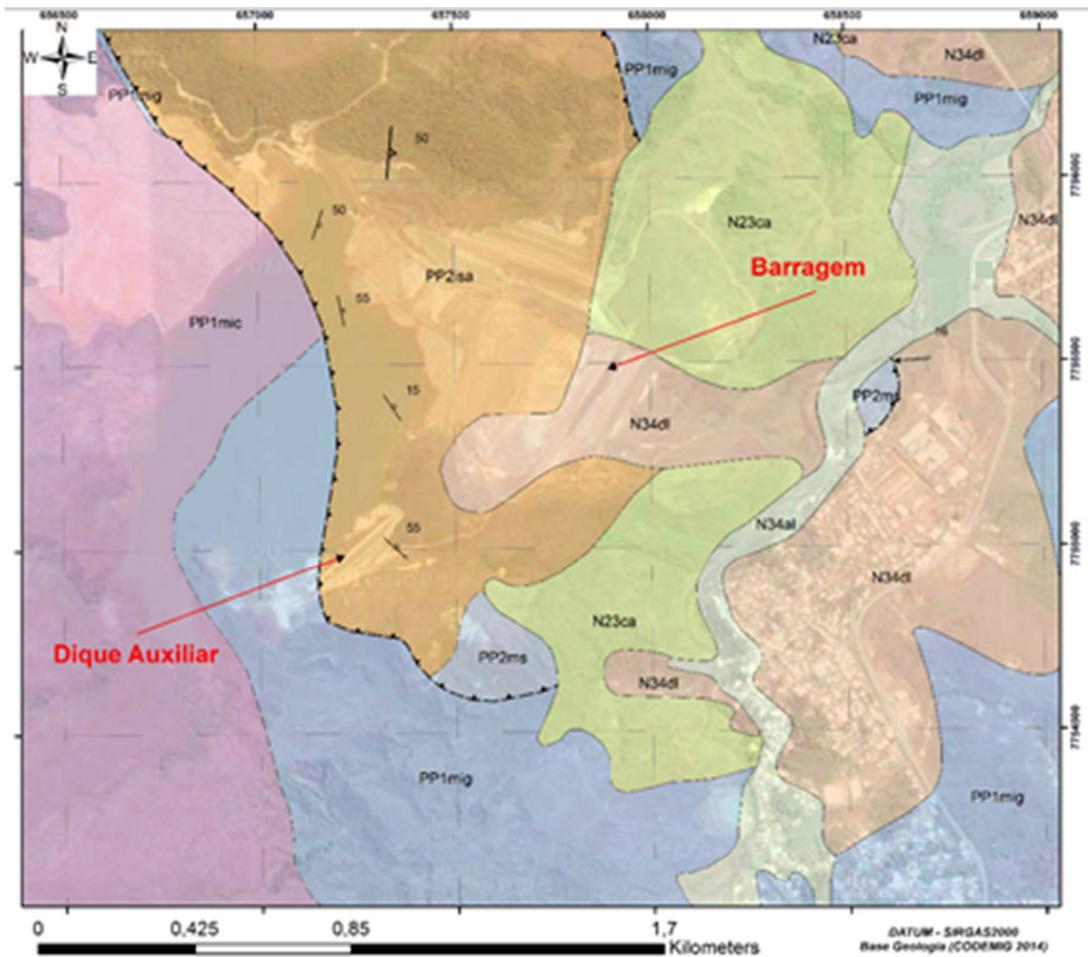
Seguindo a legislação vigente, a solução de fechamento de uma barragem é particular para cada estrutura e depende das características técnicas, bem como, das condições do entorno da mesma. Dentre os aspectos que devem ser considerados na escolha da solução de fechamento pode-se citar: características geométricas do maciço (altura, volume, inclinação dos taludes, etc.), método construtivo e de alteamento do maciço (etapa única, alteamento por montante, linha de centro ou jusante), tipo de material de construção do maciço (solo, rocha, rejeito, concreto, etc.), características da drenagem interna, características do sistema extravasor, características do reservatório (tipo de material armazenado, área, volume de material armazenado e volume de água armazenado), potencial de aproveitamento econômico do material depositado no reservatório (por exemplo: rejeitos com alta concentração de minério), consistência/grau de saturação do material depositado (materiais com baixa umidade ou com alta umidade/saturados), trabalhabilidade do material depositado no reservatório (facilidade ou dificuldade associada ao carregamento, transporte, descarregamento, espalhamento e compactação do material), área da bacia de contribuição, topografia no entorno do reservatório (dificuldades associadas à implantação de estruturas de desvio das águas afluentes), disponibilidade de áreas para a disposição do material (eventualmente retirado do reservatório), interferências (estradas, área de lavra, áreas de relevância ambiental, etc.) no entorno da barragem, dentre outros.

### **3.3 Geologia Geral**

#### **3.3.1 Geologia**

A barragem está inserida na porção oeste do Quadrilátero Ferrífero, ao sul da Serra do Caraça, e abrange as litologias do Supergrupo Minas e do Grupo Itacolomi (Formação Santo Antônio). O empreendimento encontra-se próximo aos contatos do Grupo Itabira com Grupo Itacolomi, demarcada por falha de empurrão com vergência para oeste (Figura 2). A área pode apresentar falhas de primeira e segunda ordem originárias deste contato.

As informações geofísicas disponíveis (CODEMIG, 2014) exibem zonas de contraste magnético orientadas sob os trends NW-SE e E-W, que podem correlacionar-se com o contato do Supergrupo Minas com o Supergrupo Rio das Velhas e a região de falhas da Serra da Canastra, respectivamente.



Contato geológico aproximado      ——— Contato geológico definido      ↗ Falha de empurrão  
 ——— Direção e mergulho de foliação      ——— Direção e mergulho de xistosidade      ← Direção e caimento de lineação

- N23ca - Depósitos elúvio-colúviais. Canga: fragmentos de itabirito e hematita compacta, cimentados por limonita.
- N34d - Depósitos residuais e detriticos recentes - Laterita, bauxita e detrito ferruginoso não cimentado
- PP2isa - Gp. Itacolomi - Fm. Santo Antônio - Quartzito, filito e algum conglomerado
- PP2ms - Sg. Minas - Gp. Sabará - Rochas metavulcânicas, xisto verde, clorita xisto, filito e quartzito, com lentes de conglomerado
- PP1mig - Sg. Minas - Gr. Itabira - Fm. Gandarela - Dolomito, calcário magnesiano e itabirito dolomítico, com filito e quartzito
- PP1mic - Sg. Minas - Gr. Itabira - Fm. Cauê - Itabirito dolomítico, itabirito e filito.

Figura 2 – Mapa do entorno regional da área de estudo (CODEMIG 2014).

### **3.3.2 Sismicidade Regional**

A avaliação da sismicidade regional foi elaborada com base nos dados obtidos no Banco de Dados do Centro de Sismologia e Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo IAG-USP.

Estudos sismológicos efetuados em reservatórios de todo o mundo mostraram que tanto a sobrecarga da coluna de água como, principalmente, a penetração da água sob pressão em fraturas e zonas de falha até alguns quilômetros de profundidade podem desencadear atividades sísmicas. No entanto, é necessário que o maciço rochoso, sob influência do reservatório, já esteja com tensões tectônicas bastante altas, próximas do ponto de ruptura do maciço. A carga de água do reservatório e a penetração de água em fraturas no maciço são apenas fatores que desencadeiam sismos numa situação que já estava em estado crítico. Em reservatórios com barragens de mais de 100 metros de altura, em regiões sedimentares, a probabilidade da incidência de sismos induzidos pode chegar a 50%. Os maiores sismos induzidos em reservatórios no Brasil chegaram a causar pequenas trincas em casas da área rural. Porém, a maior parte desses sismos tem sido de magnitudes pequenas, até inferiores aos sismos naturais ocorridos na mesma região.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia abordada neste trabalho envolveu as seguintes etapas:

- Revisão bibliográfica sobre os principais assuntos abordados.
- Determinações de soluções iniciais.
- Levantamento dos dados da barragem em questão.
- Determinação de uma solução final condizente com as condições apresentadas pela barragem e com a legislação vigente.

### 4.1 Análises Iniciais

Embora a solução de fechamento seja única para cada barragem, durante o estudo inicial algumas alternativas podem ser avaliadas:

- Remoção total do maciço e reservatório: nesta solução o maciço e o material do reservatório (rejeitos e/ou sedimentos) devem ser removidos e depositados de maneira adequada (por exemplo: em uma cava exaurida, em uma pilha, etc.), sendo o leito natural do vale reconformado topograficamente às suas condições iniciais (antes da implantação da barragem). Além disso, deve-se considerar o plantio da vegetação característica do local, de modo a reintegrar a área à sua condição original mais próxima possível;
- Remoção parcial do maciço e reservatório: solução similar à anterior, entretanto parte do maciço e do material contido no reservatório permanece. Nesta solução pode-se considerar, por exemplo: a abertura de uma brecha do maciço e remoção do material contido no reservatório no leito principal do talvegue com retaludamento do restante do material do reservatório (região das margens);
- Preenchimento do reservatório (remoção do lago): nesta solução o reservatório da barragem deve ser preenchido com material (blocos, estéril, etc.), de modo que não seja possível a formação de lago na estrutura. Neste sentido, deve ser previsto o adequado direcionamento das águas afluentes para canais e estruturas de drenagem posicionadas no entorno ou sobre a própria estrutura. Além disso, deve-se considerar o plantio de vegetação na área do antigo reservatório, de modo a integrar a região ao ambiente local;
- Empilhamento drenado: solução que o maciço e o reservatório são deixados no local, garantida a sua condição drenada. É necessário que sejam feitas intervenções

para que drenagem superficial da estrutura seja garantida, assim como sua reintegração ao meio;

- Estrutura com crista parcialmente galgável (soleira vertente no vão central): podendo-se preservar ou não a lagoa a montante. O maciço deve apresentar declividade e características do material de cobertura compatíveis com as velocidades de escoamento previstas, de modo que não ocorram erosões e seja garantida a estabilidade da estrutura remanescente;
- Wetlands construídas: consiste em sistemas artificialmente projetados para utilizar plantas aquáticas (macrófitas) em substratos como areia, cascalho ou outro material inerte, de modo a reintegrar a área do reservatório ao meio ambiente local;
- Combinação de alternativas: uma possibilidade de fechamento é a utilização de uma combinação de soluções, por exemplo: remoção parcial do maciço e do material contido no reservatório combinado com uma adequação geométrica do maciço, de modo a torná-lo galgável.

Ressalta-se que, de maneira geral, uma alternativa que vem sendo buscada refere-se à remoção do conteúdo do material depositado no reservatório (principalmente para as barragens de disposição dos rejeitos). Neste caso, a solução adotada deve estar alinhada ao processo de lavra do rejeito, que pode ser realizada por meio de métodos a seco e hidráulicos, dependendo das características do reservatório, da área disponível de trabalho e das alternativas de transporte e estocagem. Os métodos hidráulicos são basicamente o desmonte hidráulico e a dragagem. Já os métodos a seco podem ser realizados com escavadeiras e draglines. Embora do ponto de vista de descaracterização esta solução seja interessante, deve-se avaliar previamente a necessidade de reforço da barragem antes do início da remoção, a trabalhabilidade do material (umidade/saturação dos rejeitos) e disponibilidade de local para disposição do material removido.

Com base no exposto, um estudo de alternativas será realizado de modo a avaliar as inúmeras variáveis envolvidas e elencar vantagens e desvantagens de cada solução apresentada. Assim, a melhor solução técnica, econômica e ambiental para o fechamento ou descaracterização da barragem poderá ser definida, levando-se em conta as condições de uso futuro, conceitos de estabilidade em longo-prazo e sustentabilidade.

## 5 ESTUDO DE CASO

### 5.1 Maciço – Barragem Principal e Dique Auxiliar 1

Segundo o projeto executivo, a estrutura do maciço seria composta por um dique inicial com altura aproximada de 25 m e cota de crista na El. 770,00 m, sendo que os alteamentos da estrutura seriam realizados com o método de "linha de centro", levemente deslocado para montante, empregando underflow de ciclones na parte de jusante e overflow e rejeitos totais na parte de montante (praia).

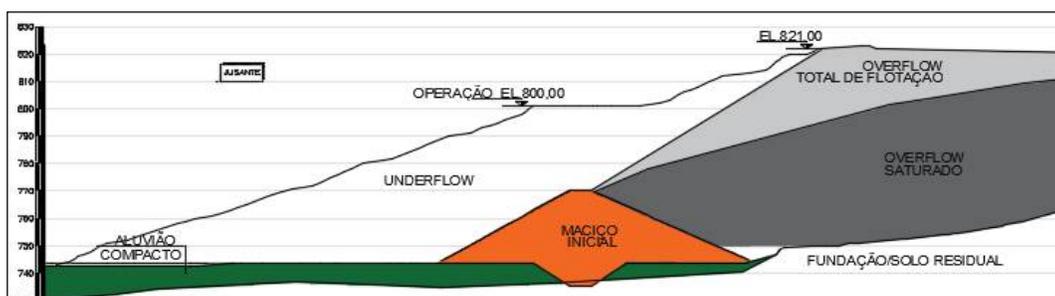


Figura 3 – Seção da Barragem

Conforme Figura 3, nota-se que o contato entre os materiais underflow e overflow não era bem definido, sendo representado por uma linha inclinada a montante, ligando o início dos alteamentos por ciclonação, até a cota da crista na época dos estudos. Atualmente a barragem tem seu coroamento alcançando uma altura de 76 m, com comprimento de crista igual a 1.100 m.

A Figura 4 apresenta a seção de maior altura do maciço principal e a Figura 5 representa a seção E-E do Dique Auxiliar 1. Com base na Seção B-B, é possível notar que o maciço principal da Barragem apresentou alteamento por linha de centro até a cota El. 811,00 m, a partir desta cota a barragem foi alteada pelo método de montante. Nota-se que o mesmo ocorre para o Dique Auxiliar 1, sendo uma estrutura concebida integralmente por alteamentos a montante.

## 5.2 Estudos Geotécnicos

O estudo geotécnico foi elaborado com a finalidade de fornecer subsídios necessários à avaliação das soluções técnicas alternativas para Descomissionamento fechamento da Barragem e dos Diques.

As Tabelas 2 e 3 apresentam os parâmetros consolidados para os materiais constituintes da Barragem, Diques, fundações e rejeitos – underflow e overflow.

Tabela 2 - Parâmetros geotécnicos drenados utilizados nas análises de estabilidade. Dados internos da empresa.

<b>Materiais</b>	<b><math>\gamma</math> (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>c' (kPa)</b>	<b><math>\phi'</math> (°)</b>
Aterro Compactado – Maciço Principal / Dique 2 / Dique 3	21,5	25	29
<i>Underflow</i> Compactado (Dique 2 / Dique 3)	21	5	31
<i>Underflow</i> (Maciço Principal / Dique 1)	21	0	31
<i>Overflow</i> (Maciço Principal / Dique 1)	23	0	24
Areia	20	0,0	30,0
Brita	20	0,0	32,0
Fundação			
– Solo Residual	19,8	13,0	29,0
– Aluvião Compacto	19	17,5	25,0
– Colúvio	17,5	5,0	27,0

Tabela 3 - Parâmetros geotécnicos adotados nas análises de estabilidade para a condição não drenada. Dados internos da empresa.

<b>Material</b>	<b><math>\gamma_n</math> (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b><math>s_u/\sigma'_{v0}</math></b>	
		<b>pico</b>	<b>residual</b>
<i>Underflow</i>	24	0,29	0,11
<i>Overflow</i>	24	0,26	0,08

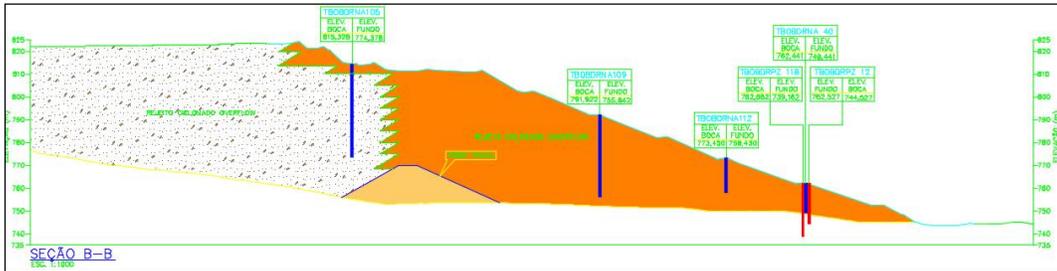


Figura 4 – Seção atual da barragem – Seção B-B.

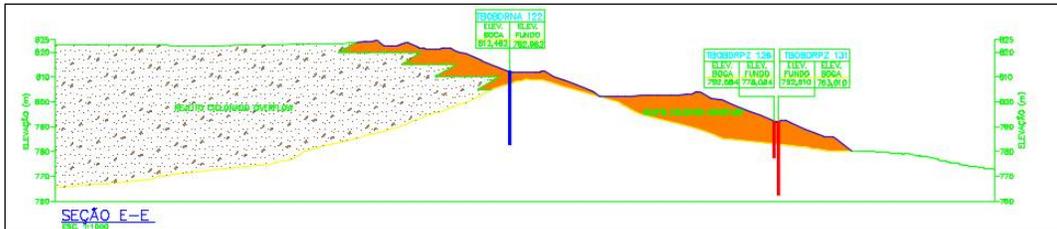


Figura 5 – Seção atual do Dique Auxiliar 1 – Seção E-E.

A análise dos estudos realizados permitiu inferir que a barragem é uma estrutura concebida por alteamentos pelo método de montante. Desta forma, o projeto deverá contemplar no mínimo, sistemas de estabilização da barragem existente ou a construção de nova estrutura de contenção situada à jusante, para minimizar o risco de ruptura por liquefação ou reduzir o dano potencial associado a isto.

Sendo assim, para prosseguimento dos estudos de estabilidade e adotando caráter conservador, como é necessário e aconselhável para uma estrutura destas dimensões, optou-se por representar o contato entre os materiais underflow e overflow, por uma linha inclinada a montante, como inferida anteriormente.

### 5.3 Condições Drenadas

Considerando os aspectos de operação da barragem, a mesma deve atender aos seguintes requisitos da NBR 13.028 (ABNT, 2017) quanto a solicitações drenadas.

Tabela 4 - Fatores de Segurança Mínimos para a Barragem - NBR 13.028 (2017).

Fase	Localização da potencial superfície de ruptura	Talude	FS <sub>mín</sub> Requerido
Operação com rede de fluxo em condição normal	Maciço	Jusante	1,5
		Entre bermas	1,3
Operação com rede de fluxo em condição normal de operação, nível máximo do reservatório	Maciço e fundações	Jusante	1,5

Considerado tais critérios, foram conduzidas as análises de estabilidade para solicitações drenadas, para as seções representativas das estruturas da Barragem. O resumo dos fatores de segurança obtidos é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultado das análises de estabilidade para condição drenada.

Estrutura	Condição	Talude	FS <sub>Referência</sub>	FS <sub>Obtido</sub>
Maciço Principal	Condição normal	Jusante	1,5	1,7
		Entre Bermas	1,3	1,0
Dique 1	Condição normal	Jusante	1,5	1,8
		Entre Bermas	1,3	1,4
Dique 2	Condição normal	Jusante	1,5	2,0
		Entre Bermas	1,3	1,7
Dique 3	Condição normal	Jusante	1,5	1,7
		Entre Bermas	1,3	1,6

Baseado nos resultados obtidos é possível observar que, de modo geral, para rupturas globais a estrutura apresenta fatores de segurança superiores ao mínimo requerido pela NBR 13.028 (ABNT, 2017). Observa-se, entretanto, que no banco superior do Maciço Principal, ainda em geometria operacional (provisória), foi obtida uma potencial superfície de ruptura com fator de segurança (FS = 1,0) inferior ao requerido por norma. Apesar de ser uma superfície localizada, cujo material colapsado (frente a uma hipotética ruptura superficial) ficaria retido no platô imediatamente inferior ao talude, ressalta-se a importância de adequação da geometria visando atender aos critérios normativos. Para as demais estruturas, Dique 1, Dique 2 e Dique 3, foram obtidos fatores de segurança superiores ao requerido por norma tanto na escala entre bermas quanto global.

## 5.4 Condições Não Drenadas

Para avaliar a segurança da Barragem quanto a solicitações não drenadas por carregamento estático, foram ponderados os parâmetros geotécnicos, modelo geológico-geotécnico e nível freático. Essas análises foram conduzidas para o maciço principal e Dique 1, cujo maciço é continuamente formado por ciclonagem de rejeito por linha de centro. Entretanto, é importante ressaltar que essas estruturas foram construídas com um considerável deslocamento do maciço de underflow para montante, sobre o rejeito de overflow.

O Dique 2 e Dique 3 são estruturas construídas em etapa única, em que possivelmente o rejeito utilizado para a formação do maciço foi compactado. As análises de estabilidade desenvolvidas para as solicitações não-drenadas foram realizadas para as seções principais do Maciço Principal e Dique 1. Essas análises foram conduzidas por meio da ferramenta computacional Slide 2018, desenvolvida pela desenvolvida pela Rocscience, utilizando o método de equilíbrio limite de Bishop Simplificado.

Os resultados obtidos nas análises encontram-se apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Resumo dos resultados das análises de estabilidade na condição não drenada.

Estrutura	Condição	Resistência Não Drenada	FS <sub>Referência</sub>	FS <sub>Obtido</sub>
Maciço Principal	Apenas o <i>overflow</i> suscetível à liquefação	Pico	1,3	1,5
	<b>Overflow e underflow suscetíveis à liquefação</b>			<b>1,3*</b>
	Apenas o <i>overflow</i> suscetível à liquefação	Residual	1,2*	1,1
	<b>Overflow e underflow suscetíveis à liquefação</b>			<b>0,7*</b>
Dique 1	Apenas o <i>overflow</i> suscetível à liquefação	Pico	1,3	1,4
	<b>Overflow e underflow suscetíveis à liquefação</b>			<b>1,4*</b>
	Apenas o <i>overflow</i> suscetível à liquefação	Residual	1,2	1,4
	<b>Overflow e underflow suscetíveis à liquefação</b>			<b>0,9*</b>

A NBR 13.028 (2017) não estabelece fatores de segurança de referência para solicitações não drenadas. Para tanto foi utilizada como base as diretrizes da Associação Canadense de Barragem (CDA, 2013), sendo adotados como referência os Fatores de

Segurança  $FS > 1,3$  para parâmetros de resistência de pico e  $FS > 1,2$  para parâmetros de resistência residual.

Como pode ser observado, caso apenas o overflow apresente comportamento contrátil e o parâmetro de resistência de pico considerado seja representativo das condições existentes na estrutura, tanto o Maciço Principal quanto o Dique 1 apresentariam condições de segurança satisfatórias para solicitações não drenadas ( $FS > 1,3$ ).

No entanto, observa-se que, na eventual ocorrência de gatilho de ruptura por liquefação (vibrações por sismo natural ou induzido, tráfego de equipamentos ou ainda eventos desconhecidos) que leve os materiais a solicitações de resistência residual não drenada, a estrutura não apresentaria fatores de segurança adequados aos valores de referência utilizados nesta análise.

Na hipótese de ocorrência de um gatilho, o Maciço Principal apresentaria condição de segurança insatisfatória ( $FS = 1,1$ ) se apenas o overflow apresentar comportamento contrátil ou ainda se todo o rejeito saturado (*overflow* e *underflow*) se comportarem de tal maneira. Para o Dique 1, observa-se que as condições de segurança são insatisfatórias se todo o rejeito saturado for suscetível à liquefação.

Consideradas as incertezas expostas e resultados obtidos para as hipóteses analisadas, não é possível atestar a estabilidade da Barragem frente a solicitações não drenadas.

## **6 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **6.1 Alternativa 1**

A Alternativa 1 é a remoção total do maciço principal, diques e do rejeito, com posterior reconformação do relevo natural original e revegetação da área com espécies da flora nativa, conforme apresentado na Figura 6.

Apesar de se pretender a remoção total dos materiais, será necessário executar, primeiramente, a escavação de canais de drenagem pluvial periféricos ao reservatório para coleta e desvio das águas pluviais antes delas adentrarem o depósito, e os reforços da Barragem e do Dique 1, pois ambas estruturas se encontram em risco de colapso por liquefação, conforme evidenciado pelos estudos de estabilidade descritos anteriormente. O material para realizar este reforço deverá provir ou da própria praia atual de rejeitos, ou de outra área de servidão a ser definida. Para este caso foi admitido que o material de reforço tenha as mesmas características que o rejeito underflow drenado.

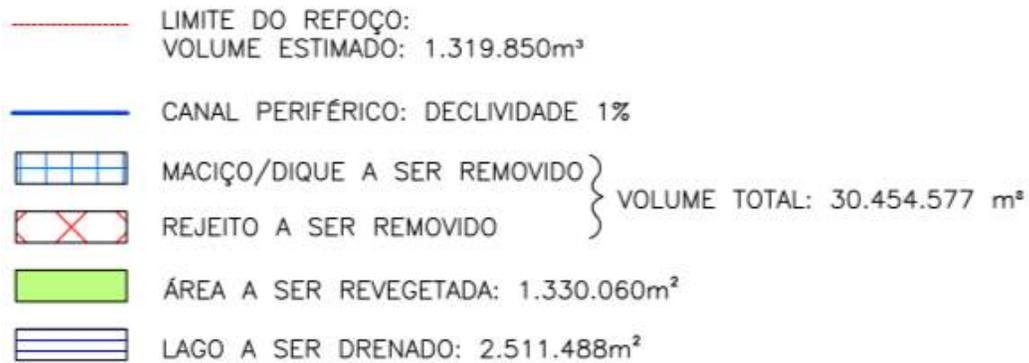
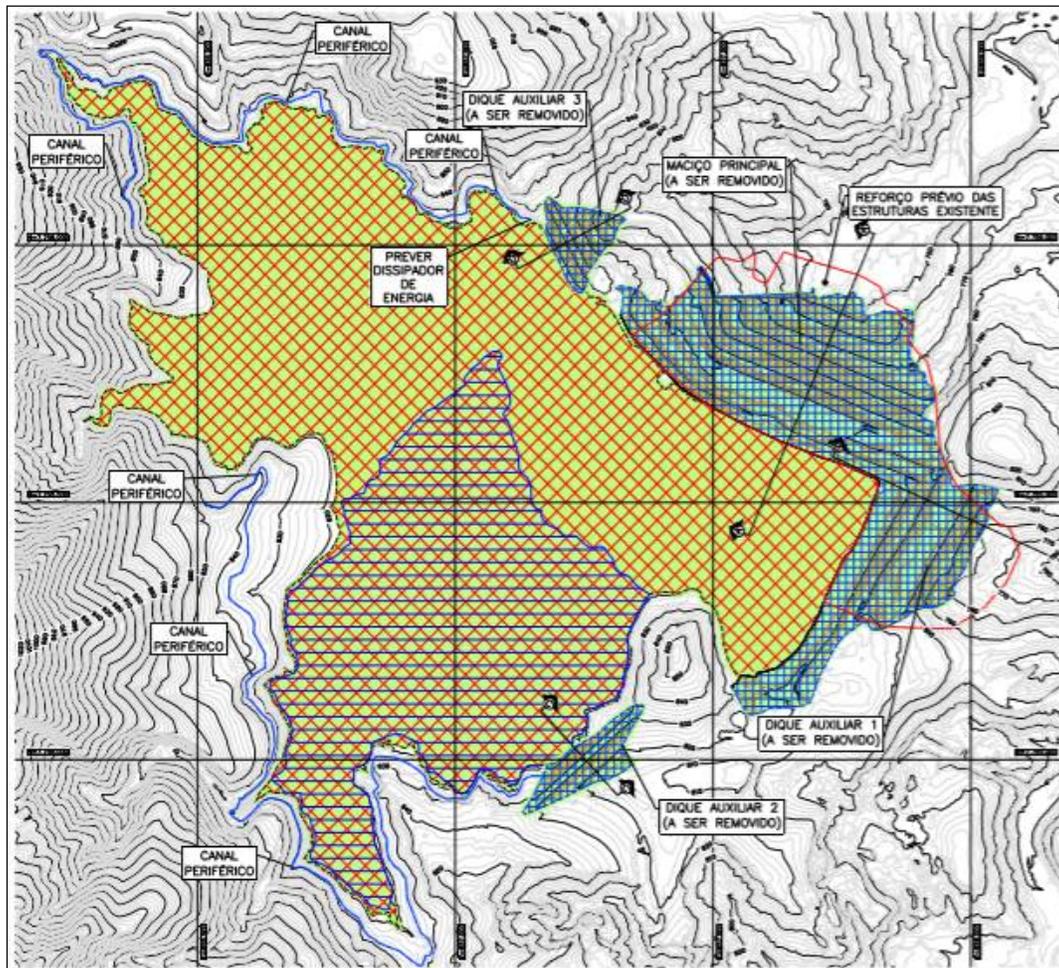


Figura 6 – Vista em planta da alternativa 1.

Concomitante a esse reforço será esgotada a água do lago, por meio do rebaixamento da soleira do extravasor atual e, posteriormente, com bombeamento a partir do local onde lago atual estiver mais profundo.

Os materiais que estiverem com baixa umidade poderão ser escavados com escavadeira e transportados com por caminhões para o aterro de reforço ou para o local de depósito final, onde será disposto em pilhas a serem adequadamente projetadas, com

arranjo estável e com drenagem superficial e de fundo. Durante toda a escavação será mantida a estabilidade do material remanescente, com taludes de escavação estáveis.

A situação final da remoção terá a saída de águas pluviais pelo ponto mais baixo da bacia, ou seja, onde atualmente é a Barragem. A topografia original do vale será restaurada assim como os caminhos das águas pluviais, prescindindo de canais ou extravasores. No entanto, é necessário que se retenha os sedimentos, originários das áreas em obras, para evitar o assoreamento do córrego existente.

A retenção dos sedimentos será feita por um dique de enrocamento no fundo do vale, a jusante das obras, que permite a passagem da água e retém os sedimentos. Esse dique deverá ser dimensionado no projeto básico.

## **6.2 Alternativa 2**

A Alternativa 2 é o rebaixamento parcial da Barragem, dos Diques e do Rejeito, e reforço da Barragem por jusante; implantação de drenagem superficial; capeamento do reservatório com solo vegetal, e vegetação da área, conforme apresentado na Figura 7.

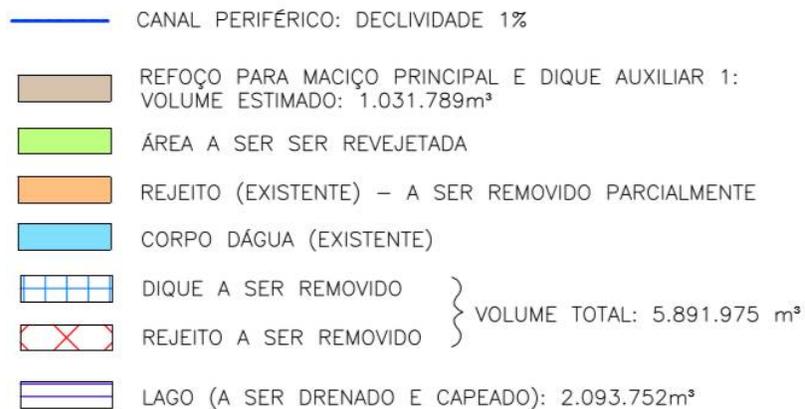
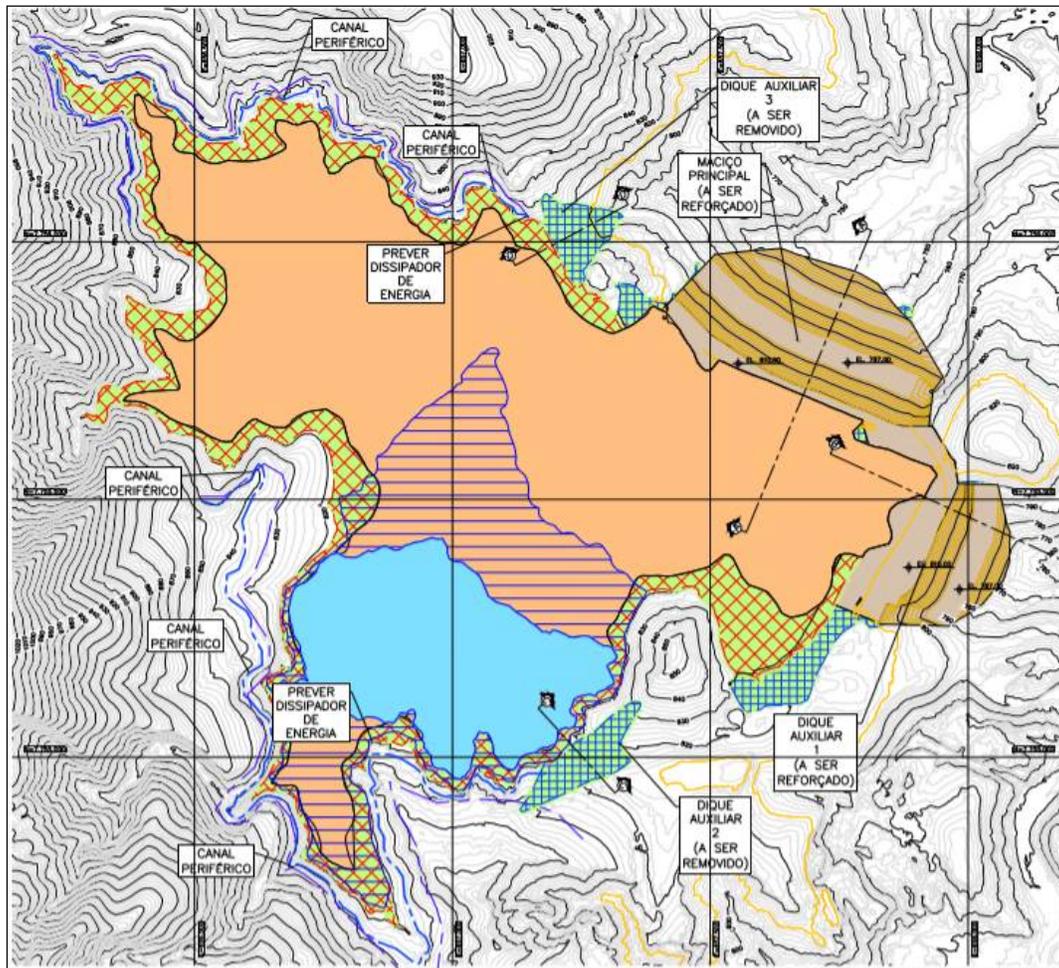


Figura 7 - Vista em planta da alternativa 2.

Do mesmo modo que para a Alternativa 1, será necessário executar primeiramente a escavação de canais de drenagem pluvial periféricos ao reservatório, com declividade de 1%, para coleta e desvio das águas pluviais antes delas adentrarem o depósito, e o reforço da Barragem e do Dique Auxiliar 1, pois ambas estruturas se encontram em risco de

colapso por liquefação, conforme evidenciado pelos estudos de estabilidade descritos anteriormente.

O material para realizar este reforço deverá provir ou da própria praia atual de rejeito, ou de área de servidão a ser definida. Para este relatório foi admitido que o material de reforço tem as mesmas características que o rejeito underflow drenado.

Atualmente o rejeito depositado nas proximidades do Dique Auxiliar 2 está na elevação 808 m. Assim, será eficaz construir um canal extravasor próximo a esta elevação, para a retenção dos sedimentos será feita por um dique de enrocamento no fundo do vale, a jusante das obras, que permite a passagem da água e retém os sedimentos. Esse dique deverá ser dimensionado no projeto básico uma primeira etapa de esvaziamento do lago.

### **6.3 Alternativa 3**

A Alternativa 3 é o reforço da Barragem e do Dique Auxiliar 1, implantação de drenagem superficial, capeamento da praia do reservatório com solo vegetal, e vegetação da área, apresentada na Figura 8.

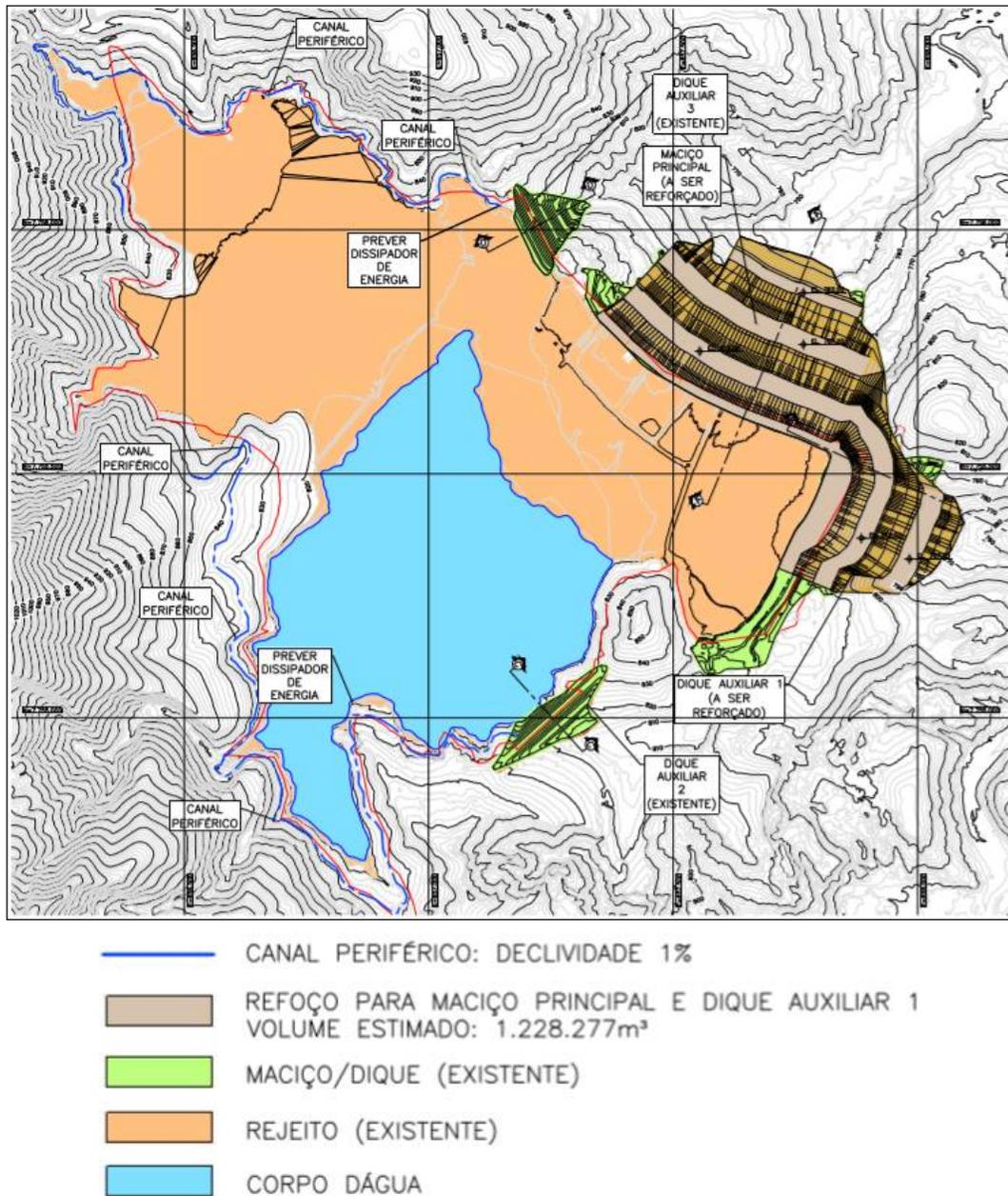


Figura 8 - Vista em planta da alternativa 3.

Do mesmo modo que para a Alternativa 1, será necessário executar primeiramente a escavação de canais de drenagem pluvial periféricos ao reservatório, com declividade de 1%, para coleta e desvio das águas pluviais antes delas adentrarem o depósito, e o reforço da Barragem e do Dique Auxiliar 1, pois ambas estruturas se encontram em risco de colapso por liquefação, conforme evidenciado pelos estudos de estabilidade descritos anteriormente neste relatório.

O material para realizar este reforço deverá provir ou da própria praia atual de rejeito, ou de área de servidão a ser definida. Para este relatório foi admitido que o material de reforço tenha as mesmas características que o rejeito underflow drenado.

Atualmente o rejeito depositado nas proximidades do Dique Auxiliar 2 está na elevação 808 m. Assim, será eficaz construir um canal extravasor próximo a esta elevação, para o esvaziamento do lago e continuidade de operação depois da desativação do depósito.

Este extravasor deverá ser dimensionado hidráulicamente, inclusive a elevação de sua soleira, bem como os produtos deste estudo, como a curva de descarga referente tanto ao vertedouro operante atual (2ª etapa) quanto ao sistema extravasor de desativação.

A escolha da elevação da soleira do vertedor é feita em função de não se reter água no lago desativado e minimizar as dimensões do vertedor.

Para a soleira na elevação 808m obtém-se os resultados mostrados na Tabela 7, variando-se a largura da soleira e do canal extravasor.

Tabela 7 - Elevação da soleira da alternativa 3.

Geometria	Larg. Base (m)	El. Máx. (m)	El. Crista (m)	Borda Livre (m)
Emboque Retangular	10,0	814,66	815,00	0,34
	15,0	814,51	815,00	0,49
	20,0	814,13	815,00	0,87
Emboque Trapezoidal (1V:1H)	10,0	814,51	815,00	0,49
	15,0	814,26	815,00	0,74
	20,0	814,08	815,00	0,92

A escolha recai no emboque retangular, pela facilidade de construção e na largura da base de 10 m, tendo em vista que os demais resultados são bastante próximos e resultam somente em uma altura de canal ligeiramente diferente.

#### 6.4 Alternativa 4

A Alternativa 4 é a construção de um barramento independente a jusante da atual e do Dique Auxiliar 1, por linha de centro, com sua porção jusante em enrocamento, implantação de drenagem superficial, capeamento da praia do reservatório com solo vegetal, e vegetação da área, conforme apresentado na Figuras 9.

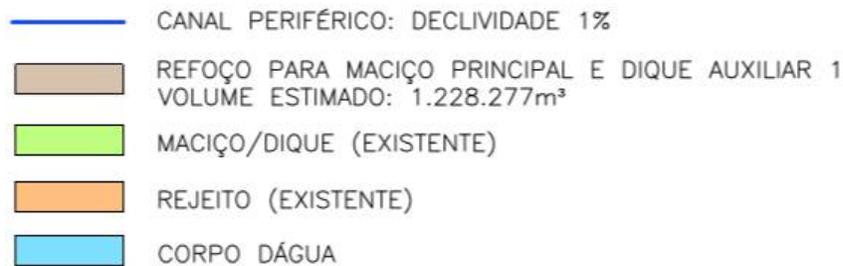
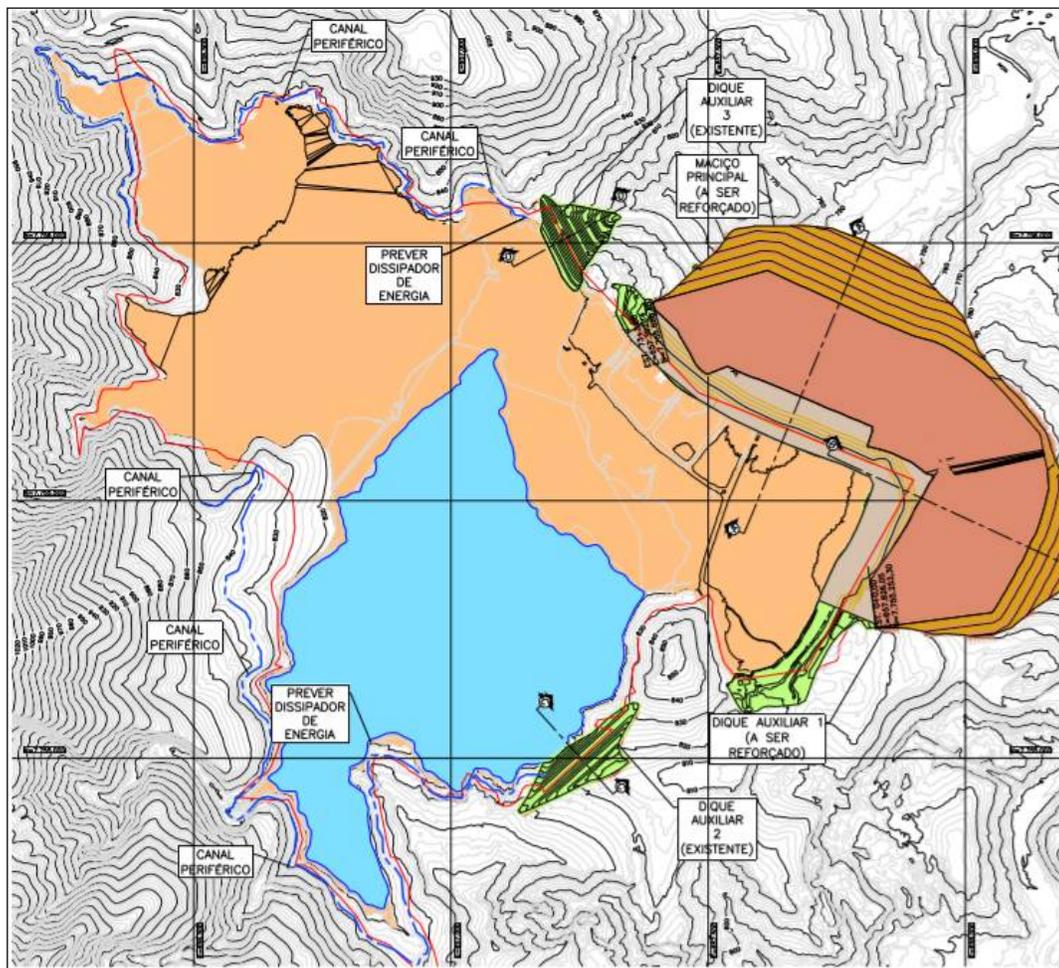


Figura 9 - Vista em planta da alternativa 4.

Atualmente o rejeito depositado nas proximidades do Dique Auxiliar 2 está na elevação 808,00 m. Assim, será eficaz construir um canal extravasor próximo a esta elevação, para o esvaziamento do lago e continuidade de operação depois da desativação do depósito.

Este extravasor deverá ser dimensionado hidráulicamente, inclusive a elevação de sua soleira, bem como os produtos deste estudo, como a curva de descarga referente tanto ao vertedouro operante atual (2ª etapa) quanto ao sistema extravasor de desativação.

A escolha da elevação da soleira do vertedor é feita em função de não se reter água no lago desativado e minimizar as dimensões do vertedor. Para a soleira na elevação 808,00 m obtêm-se os resultados mostrados na Tabela 9, variando-se a largura da soleira e do canal extravasor.

Tabela 8 - Elevação da soleira na alternatia 4.

Geometria	Larg. Base (m)	El. Máx. (m)	El. Crista (m)	Borda Livre (m)
Emboque Retangular	10,0	814,66	815,00	0,34
	15,0	814,51	815,00	0,49
	20,0	814,13	815,00	0,87
Emboque Trapezoidal (1V:1H)	10,0	814,51	815,00	0,49
	15,0	814,26	815,00	0,74
	20,0	814,08	815,00	0,92

A escolha recai no emboque retangular, pela facilidade de construção e na largura da base de 10 m, tendo em vista que os demais resultados são bastante próximos e resultam somente em uma altura de canal ligeiramente diferente.

## 6.5 Avaliações Das Alternativas

A Alternativa 1 é a de maior aceitação para as agências (ambiental e de mineração), assim como para as comunidades a jusante da barragem. Implica na “restauração” do vale. Como vantagem principal tem-se uma redução significativa das atividades e do tempo de manutenção e monitoramento da área pós-fechamento. Entretanto, a disponibilidade de um local para disposição dos materiais removidos é o limitante. Ademais, a operação de remoção do rejeito contido na barragem e no barramento em si, envolve uma operação de lavra com abertura de acesso e movimentação de equipamentos e um planejamento de extração do rejeito que tenha como foco principal a garantia de estabilidade do barramento. E, nesse caso, a necessidade de construção de um reforço à jusante é outra desvantagem, embora seja uma exigência das agências ambiental e de mineração.

A Alternativa 2 é uma solução intermediária e refere-se a manutenção da estrutura, garantido a estabilidade geotécnica via rebaixamento parcial da barragem, dos diques e do rejeito. Trata-se que demandará menos tempo de operação, mas que também demandará equipamentos trabalhando intensamente na praia de rejeitos assim como no barramento.

Requer um planejamento meticuloso das operações e, principalmente e inicialmente, a construção de um canal periférico para captação e desvio de toda a água superficial direcionada à barragem. A principal desvantagem é a necessidade de monitoramento e manutenção em longo prazo, possivelmente perpétuo, caso os critérios de fechamento não sejam alcançados. Desses critérios destacam-se a manutenção da condição drenada da estrutura remanescente e a estabilidade quanto a forças perpétuas como erosão eólica e hídrica.

A Alternativa 3 apresenta vantagens em relação à 2, por envolver menor movimentação de material e equipamentos na estrutura. Ou seja, a intervenção é mínima. Entretanto, apresenta as mesmas desvantagens que a 2 por necessitar de um programa de monitoramento e de manutenção por longo prazo com as mesmas prerrogativas.

A Alternativa 4, atende ao Art. 8 da Resolução n. 13 da ANM, que indica a construção de uma nova estrutura de contenção ou de segurança a jusante da Barragem. Essa opção tem como desvantagem a necessidade de licenciamento ambiental e depende das características da fundação do local a jusante da barragem para uma análise mais detalhada. Entretanto, o cumprimento do Art. 8 traz consigo a vantagem do aumento da segurança geotécnica da estrutura remanescente além de possibilitar a implantação das outras medidas de fechamento de uma forma mais segura. O preenchimento do interstício entre a barragem e a barragem de segurança poderá ser feito com material seco (estéril).

Tabela 9 - Pontos positivos e negativos das alternativas.

ALTERNATIVA	PONTOS FAVORÁVEIS	PONTOS DESFAVORÁVEIS
Alternativa 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Restauração quase total da área anteriormente à barragem;</li> <li>• Eliminação total do passivo da barragem;</li> <li>• Total atendimento da legislação quanto à descaracterização de barragem de rejeitos;</li> <li>• Maior facilidade de aceitação;</li> <li>• Menor tempo de monitoramento e atividade.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limitação de local apropriado para disposição do material da barragem;</li> <li>• Dificuldades operacionais para remoção do rejeito e do barramento;</li> <li>• Exigência de um planejamento de extração de rejeito;</li> <li>• Tempo necessário para fechamento total da barragem superior aos das outras alternativas;</li> <li>• Necessidade de construção de um reforço na barragem para garantir a segurança das operações;</li> <li>• Geração de poeira e ruído.</li> </ul>
Alternativa 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor movimentação de rejeitos;</li> <li>• Menor número de equipamentos mobilizados;</li> <li>• Menor intervenção na estrutura com ganhos em segurança,</li> <li>• Menor custo em comparação à alternativa 1; e</li> <li>• Menor tempo para se alcançar o fechamento proposto.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor aceitação pelas comunidades impactadas;</li> <li>• Necessidade de monitoramento e manutenção em longo prazo;</li> <li>• Necessidade de construção, monitoramento e manutenção de canais periféricos para drenagem de águas pluviais.</li> <li>• Geração de poeira e ruído.</li> </ul>
Alternativa 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor movimentação de rejeitos;</li> <li>• Menor número de equipamentos mobilizados;</li> <li>• Menor intervenção na estrutura com ganhos em segurança,</li> <li>• Menor custo em comparação à alternativa 1; e</li> <li>• Menor tempo para se alcançar o fechamento proposto.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor aceitação pelas comunidades impactadas;</li> <li>• Necessidade de monitoramento e manutenção em longo prazo;</li> <li>• Necessidade de construção, monitoramento e manutenção de canais periféricos para drenagem de águas pluviais;</li> <li>• Geração de poeira e ruído.</li> </ul>
Alternativa 4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maior segurança das operações de fechamento, comparada às alternativas 2 e 3;</li> <li>• Maior garantia de segurança da estrutura remanescente, comparada às alternativas 2 e 3;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necessidade de licenciamento para construção da barragem de segurança a jusante;</li> <li>• Disponibilidade de material para construção do barramento de jusante.</li> <li>• Grande movimentação de material</li> <li>• Geração de poeira e ruído quando da construção da barragem e preenchimento do interstício.</li> </ul>

## **7 CONCLUSÃO**

O presente estudo realizou uma análise nas alternativas para a descaracterização de uma barragem através da legislação vigente. O não conhecimento dos quantitativos e valores econômicos limita uma avaliação consistente das alternativas de fechamento da Barragem. Entretanto, pode-se fazer uma avaliação qualitativa a partir de dados da literatura.

A alternativa 1 se mostra mais condizente com a atual legislação e apresenta uma solução mais aceitável quanto aos parâmetros sociais e ambientais, porém necessita-se de um maior tempo e planejamento para execução.

Todavia deve-se ressaltar que em função da baixa quantidade de dados e informações disponíveis, sugere-se uma nova campanha complementar de campo (sondagens) e laboratorial, para que se realize investigações geológicas-geotécnicas para uma consolidação do estudo.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-11682: Estabilidade de Taludes. Rio de Janeiro. 2009.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-13028: Mineração – Elaboração e Apresentação de Projeto de Barragens para Disposição de Rejeitos, Contenção de Sedimentos e Reservação de Água. Rio de Janeiro. 2017.
- CDA, 2013. Daw Safety Guidelines 2007 (2013, revited). Canadian Daw Association – Associação Canadense de Barragens. www.cda.ca. ISBN:978-0-9936319-0-0
- CODEMIG, 2014. Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais. Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais.
- LOPES, A.E.V. 2010. Risco Sísmico no Brasil e seu impacto sobre grandes obras, Revista do Instituto de Engenharia, 58, 7.
- MINAS GERAIS. Lei 23.291, de 26 de fevereiro de 2019. Institui a política estadual de segurança de barragens. Belo Horizonte: Diário do executivo, [2019]. Disponível em:  
<https://www.almg.gov.br/consulte/legislacao/completa/completa.html?tipo=LEI&numero=23291&comp=&ano=2019>. Acesso em: 05/12/2019
- OLIVEIRA, W.C.; MARCHIORETO, A. 2013. Relatório Técnico Final de Monitoramento Sismológico. COPEL. São Paulo, SP; Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.
- PINHEIRO, Mário Cicareli. Diretrizes para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamentos hidráulicos em obras de mineração. Porto Alegre: ABRH, 2011.
- SCHORSCHER, H. D. Komatiitos na estrutura “Greenstone Belt”, série Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero. Minas Gerais, Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30, 1978, Recife. Resumo das Comunicações. Recife: SBG, 1978. Boletim n.1, p.292-293.