

**ABNT NBR 13028:20xx - Mineração — Elaboração e apresentação de projeto de estruturas para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água — Requisitos**

<b>Parte 1 – Escopo, Termos e definições</b>
--

**1. Introdução**

Ajustar a redação do texto original

**2. Escopo**

Ajustar a redação do texto original

**3. Termos e definições**

Completar o texto original com os novos termos provenientes da Parte 3

<b>Parte 2 – Barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água</b>
--

- 1. Considerações gerais**
  
- 2. Requisitos para a elaboração e apresentação do projeto**
  - 2.1 Sumário executivo**
  - 2.2 Introdução**
  - 2.3 Estudos e Caracterizações**
    - 2.3.1 Caracterização química dos rejeitos**
    - 2.3.2 Estudos locacionais**
    - 2.3.3 Estudos hidrológicos e hidráulicos**
    - 2.3.4 Estudos geológico-geotécnicos**
      - 2.3.4.1 Generalidades**
      - 2.3.4.2 Geologia regional e local**
      - 2.3.4.3 Fundações**
      - 2.3.4.4 Materiais de construção**
    - 2.3.5 Estudos sísmicos**
    - 2.3.6 Estudos de ruptura hipotética**
  - 2.4 Projetos da barragem**
    - 2.4.1 Generalidades**
    - 2.4.2 Premissas, hipóteses admitidas e critérios de projeto**
    - 2.4.3 Geometria e arranjo geral**
    - 2.4.4 Ocupação do reservatório**
    - 2.4.5 Balanço hídrico**
    - 2.4.6 Estruturas auxiliares**
    - 2.4.7 Desvio de curso de água**
    - 2.4.8 Tratamento das fundações**
    - 2.4.9 Drenagem interna do maciço**
    - 2.4.10 Impermeabilização da barragem**
    - 2.4.11 Maciço da barragem**
    - 2.4.12 Avaliação de segurança**
      - 2.4.12.1 Generalidades**
      - 2.4.12.2 Estabilidade dos taludes**

**2.4.12.3 Galgamento**

**2.4.12.4 Erosão interna (piping)**

**2.4.12.5 Liquefação**

**2.4.13 Sistema extravasor**

**2.4.14 Drenagem superficial**

**2.4.15 Instrumentação de controle**

**2.4.16 Plano de fechamento**

**2.4.17 Ficha técnica da barragem**

**2.4.18 Documentos a ser anexados ao relatório do projeto final**

## Parte 3 – Disposição de Rejeitos em forma de Pilha

### 1. Considerações gerais

*Em desenvolvimento*

### 2. Requisitos para a elaboração e apresentação do projeto

#### 2.1 Sumário executivo

Neste tópico deve-se relacionar as informações gerais sobre o projeto, de forma resumida, para permitir seu entendimento global e os principais resultados alcançado, como as principais características e especificidades do projeto.

#### 2.2 Introdução

Este tópico deve fornecer as informações básicas sobre:

- o empreendedor: identificação e endereço;
- o projeto: localização, acesso, finalidade, capacidade volumétrica e vida útil operacional da estrutura e características do material a ser disposto.

#### 2.3 Projeto da estrutura de disposição de rejeito

##### 2.3.1 Estudo de viabilidade

Estes estudos visam apresentar as alternativas estudadas para a implantação do projeto e as avaliações técnicas, econômicas, sociais e ambientais, incluindo as suas influências na área do entorno. Estes estudos deverão incluir minimamente: estudos locacionais e viabilidade geométrica da pilha e estruturas auxiliares, se necessário (Meio Ambiente, nascentes, cavidades, Avaliação de Impactos Social, Uso e Ocupação do Solo, Interferências e Uso de Direito Minerário); estudos de Método de Disposição; análise multicritérios da viabilidade (Técnica, Social, Ambiental, Legal, Econômico).

##### 2.3.2 Fases de projeto da estrutura de disposição de rejeito

Aprovada a viabilidade, o desenvolvimento de um projeto da estrutura para armazenamento de rejeito deve ser dividido em 3 fases: Projeto Conceitual, Projeto Básico, Projeto Detalhado, considerando os mínimos requerimentos aplicáveis para cada uma destas fases conforme listado a seguir. Os estudos mencionados serão pormenorizados nos itens que seguem este documento.

**Nota:** Alguns estudos relacionados podem ou não se aplicar, conforme a finalidade e a classificação da estrutura, de acordo com a regulamentação vigente ou guias

de boas práticas de reconhecimento internacional.

### **a) Projeto Conceitual**

Nesta fase de projeto deverão ser validadas e consolidadas as premissas estabelecidas na fase do estudo de alternativas, devendo justificar a viabilidade técnica da alternativa selecionada, onde deverá ser verificada a existência de falha fatal para a implantação do projeto, devendo conter minimamente:

- Estudos locacionais da área de implantação, considerando: fisiográficos, hidrográficos, morfológicos, geológico-geotécnicos, sísmológicos, hidrometeorológicos, hidrogeológicos e socioambientais;
- Estudos de Alternativas Tecnológicas de Empilhamento;
- Estudos geométricos;
- Definição da Área diretamente afetada incluindo acessos, drenagem superficial e estruturas auxiliares;
- Estudos Geológicos-Geotécnicos preliminares;
- Estudos hidrogeológicos preliminares
- Especificação Técnica para caracterização físico-químico dos rejeitos;
- Estudos Hidrológicos e Hidráulicos preliminares;
- Estudos de área de empréstimo;
- Estudos de ADME, ADML e Canteiro de Obras;
- Plano de instrumentação (definição dos tipos de instrumento aplicáveis e localização);
- Levantamento preliminar dos quantitativos;
- Plano de Investigação;
- Estudos sedimentológicos preliminares e projeto conceitual de estruturas de contenção de sedimentos.

### **b) Projeto Básico**

O projeto básico é a etapa subsequente ao projeto conceitual para consolidação e confirmação de parâmetros, especificações técnicas e dimensionamentos dos principais componentes, devendo conter minimamente:

- Consolidação dos estudos geométricos;
- Estudos Geológico-Geotécnicos;
- Estudos Hidrogeológicos e Hidrogeoquímicos (se pertinente);
- Caracterização reológica dos rejeitos;
- Caracterização físico-químico dos rejeitos;
- Estudos Hidrológicos e Hidráulicos;
- Estudos e arranjos de áreas de empréstimo;
- Arranjos de ADME, ADML e canteiro de obras;
- Estudos Sísmicos;
- Projeto de instrumentação (definição das seções instrumentadas, tipos de instrumentos e locação e diretrizes para monitoramento geotécnico);
- Sequenciamento construtivo;
- Especificação técnica construtiva;
- Especificação técnica de aterro experimental;

- Levantamento dos quantitativos;
- Especificação técnica complementar de ensaios de campo e laboratório (quando aplicável);
- Estudos Sedimentológicos;
- Estudo de Ruptura hipotética;
- Classificação de risco da estrutura;
- Plano conceitual de fechamento objetivando o fechamento progressivo da estrutura (quando aplicável).

### **c) Projeto Detalhado**

O projeto detalhado consiste em apresentar a nível construtivo todo o detalhamento do projeto para permitir sua implantação e operação, devendo conter minimamente:

- Detalhamento geométrico (notas de serviço);
- Execução de aterro Experimental;
- Consolidação dos estudos geotécnicos;
- Dimensionamentos estruturais;
- Detalhes construtivos;
- Detalhamento de instrumentação e controle para a etapa de construção;
- Detalhamento de instrumentação e controle para a etapa de operação;
- Consolidação do levantamento dos quantitativos;
- Programa de QA/QC;
- Definição dos níveis de controle para monitoramento geotécnico;
- Manual de Operação (Operação em condições de regimes hidrológicos).

### **d) Projeto “Como construído”**

O projeto “como construído” deve ser elaborado e atualizado ao longo do ciclo de vida da pilha. Esse projeto deve conter relatório técnico com o descritivo das atividades realizadas, levantamentos topográficos, registro de controle de qualidade, aderência aos controles operacionais, premissas e requisitos de projeto e desenhos de engenharia atualizados. Eventuais alterações do projeto executivo podem ser também relatadas nessa documentação.

## **2.4 Estudos e Caracterização**

### **2.4.1 Estudos locais**

Os estudos locais devem descrever as alternativas de locação da estrutura de armazenamento de rejeitos e estruturas auxiliares, tendo em vista as variáveis de engenharia, sociais e ambientais, justificando a escolha feita para o projeto.

A justificativa deve ser fundamentada considerando, quando aplicável, a regulamentação, características topográficas, geomorfológicas, geológicas, geotécnicas, hidrogeológicas, hidrometeorológicas, ambientais, os volumes de

armazenamento e potencial de expansão, o cadastro de interferências existentes e previstas, os possíveis impactos em áreas ou estruturas do entorno, os aspectos sociais e os possíveis impactos às comunidades, em uma avaliação comparativa entre as alternativas consideradas.

## **2.4.2 Estudos hidrológicos e hidráulicos**

### **2.4.2.1 Chuva de projeto**

Para a definição da chuva de projeto deverão ser considerados no estudo os seguintes itens:

- Estações pluviométricas representativas do local de implantação da pilha, com no mínimo de 20 anos de dados com ciclos hidrológicos completos para realização da análise de frequência estatística;
- Para séries com menos de 30 anos de extensão, atualizar os estudos de chuvas intensas pelo menos a cada 3 anos;
- Para séries com pelo menos 30 anos de extensão, atualização do estudo de chuvas intensas pelo menos a cada 5 anos ou a partir de evidência da alteração da tendência na série histórica;
- Avaliação da influência orográfica, quando pertinente, para a análise da precipitação de projeto;
- Mesmo para as estruturas de pilhas, categorizadas como temporárias, o dimensionamento deverá enquadrar o período chuvoso completo.

### **2.4.2.2 Vazão de projeto para drenagem superficial**

Para a definição da vazão de projeto deverão ser considerados no estudo os seguintes itens:

- Base topográfica com precisão suficiente para definição das áreas de drenagem e reconhecimento das estruturas hidráulicas e interferências existentes, de acordo com a fase de projeto específica;
- Avaliação do grupo hidrológico (pedologia, geologia local/regional e a hidrogeologia);
- Avaliação da umidade antecedente pelo projetista com justificativa técnica consolidada no estudo;
- O uso e ocupação do solo têm que estar aderente com o grupo hidrológico e a condutividade hidráulica estimada para o estudo (para a superfície de drenagem de contribuição da pilha);
- Tempo de concentração deve ser representativo das condições das calhas, declividades e área de abrangência
- Determinação de vazão – métodos indiretos – avaliar a área de contribuição e a necessidade de subdivisão de bacias, conforme a complexidade geográfica local;
- O método racional somente é recomendado para pequenas bacias com

- áreas de drenagem de até 1,0 km<sup>2</sup>;
- Verificar a possibilidade de calibração da bacia hidrológica para confirmação dos parâmetros hidrológicos;
  - Tempo de retorno mínimo para o dimensionamento das estruturas periféricas de drenagem superficial de 500 anos;
  - Tempo de retorno mínimo para o dimensionamento das estruturas de drenagem superficial na pilha de 100 anos;
  - Definição da rugosidade das estruturas hidráulicas (coeficiente de Manning) compatível com o revestimento;
  - Avaliar os segmentos em degraus e rápidos de acordo com a característica do escoamento;
  - Apresentar análise em termos de borda livre, considerando trechos em curva, baixas declividades e transições no Número de Froude quando há a possibilidade de formação de ressalto hidráulico;
  - Definir, dado a fase de operação e fechamento, um critério de borda livre para as estruturas levando em conta as características do escoamento;
  - Avaliar as velocidades médias máximas compatíveis para cada revestimento e de acordo com o risco de dano à estrutura;
  - Prever no desemboque, quando pertinente, estruturas de dissipação.

### **2.4.3 Estudos hidrogeológicos**

#### **2.4.3.1 Caracterização Hidrogeológica**

- Análise Geológica e Hidrogeológica: Estudo detalhado da geologia local para compreender as características do solo, rochas e aquíferos presentes na área;
- Determinação das Propriedades do Solo e Mapeamento Hidrogeológico: Avaliação da permeabilidade, porosidade e condutividade hidráulica do solo, mapeamento das áreas de recarga e descarga, bem como a direção do fluxo da água subterrânea para entender como a mesma se move no subsolo.
- Mapeamento Geológico-Geotécnico: Envolve a análise das características geológicas e geotécnicas da área, como a composição das rochas, estruturas geológicas, e processos de intemperismo. Este mapeamento fornece informações cruciais sobre a natureza do subsolo, que influencia diretamente o comportamento hidrogeológico da região.
- Análise de Unidades Hidroestratigráficas: As unidades hidroestratigráficas são camadas de rochas ou sedimentos que possuem propriedades hidráulicas distintas. Identificá-las envolve o estudo de suas características como porosidade, permeabilidade, e capacidade de armazenamento de água. Essas unidades determinam como a água se move e é armazenada no subsolo.

- Estudos de Fluxo de Água Subterrânea
- Modelagem Hidrogeológica: Utilização de software de modelagem para simular o movimento da água subterrânea e entender padrões de fluxo anterior e posterior a implantação da estrutura;
- Ensaios Hidráulicos: Realização de testes hidráulicos para determinar as características hidrodinâmicas dos aquíferos, incluindo a taxa de recarga e a transmissividade.

#### **2.4.3.2 Avaliação da Qualidade da Água Subterrânea**

- Amostragem de Água Subterrânea: Coleta de amostras de água subterrânea para análises laboratoriais, incluindo pH, metais pesados, íons e substâncias químicas que podem indicar contaminação.

#### **2.4.3.3 Avaliação do Impacto da Hidrogeologia**

- Influência na Estabilidade de Estruturas: A hidrogeologia local afeta diretamente a estabilidade de estruturas construídas, como barragens, pilhas de rejeitos, e edificações. A presença de água subterrânea pode alterar as propriedades do solo, como a resistência e a capacidade de suporte, o que pode levar a assentamentos ou falhas estruturais.
- Design de Fundações: A compreensão da hidrogeologia é crucial no design de fundações. Áreas com níveis de água subterrânea altos ou variáveis requerem técnicas especiais de fundação para evitar problemas como erosão ou instabilidade do solo.
- Gestão de Águas Subterrâneas em Projetos de Construção: Durante a construção, o manejo eficaz das águas subterrâneas é vital para prevenir inundações e erosão, garantindo a segurança do local e a integridade da construção.
- Contaminação dos Recursos Hídricos: A movimentação da água subterrânea pode transportar contaminantes de áreas poluídas para aquíferos e corpos d'água superficiais. Isto é particularmente preocupante em locais próximos a pilhas de rejeitos ou instalações industriais.
- Alterações nos Ecossistemas Aquáticos: Mudanças no fluxo da água subterrânea podem afetar ecossistemas aquáticos, alterando o regime hídrico de rios, lagos e zonas úmidas, o que pode impactar a biodiversidade e a saúde dos ecossistemas.
- Risco de Escassez de Água: A extração excessiva de água subterrânea para uso industrial ou agrícola pode levar à diminuição dos níveis dos aquíferos, afetando a disponibilidade de água para ecossistemas e comunidades.

#### **2.4.4 Estudos geológico-geotécnicos**

Os estudos geológico-geotécnicos devem possibilitar um entendimento adequado das características dos materiais de fundação, dos materiais de construção e dos rejeitos, e respectivos comportamentos perante as solicitações que serão impostas

pela estrutura ao longo de todo o ciclo de vida. As características de resistência, deformabilidade e permeabilidade devem ser determinadas por meio de ensaios de laboratório e de investigações “*in situ*”.

#### **2.4.4.1 Geologia regional e local**

A geologia regional e local deve apresentar o mapeamento geológico-geotécnico de superfície das áreas destinadas às fundações da infraestrutura inicial e das áreas situadas no entorno, para orientar a programação das investigações de campo e de laboratório, necessárias ao estudo das fundações e áreas de empréstimos.

#### **2.4.4.2 Fundações**

O estudo das fundações deve apresentar os principais resultados do mapeamento geológico-geotécnico, das investigações de campo e de laboratório realizados para se conhecerem as características geotécnicas dos materiais constituintes e das condições hidrogeológicas das fundações da pilha. O estudo de fundações subsidiará o projeto de limpeza e/ou tratamento das fundações e as análises estruturais, se aplicável. O programa de investigações de campo e laboratório deve permitir o completo entendimento do contexto geológico-geotécnico no local.

#### **2.4.4.3 Materiais de Construção**

Deverão ser apresentados os estudos realizados para a definição dos materiais de construção disponíveis (por exemplo da infraestrutura inicial da pilha, estruturas auxiliares internas e periféricas, tapetes drenantes, drenos, transições, filtros, entre outros), considerando suas características de resistência, deformabilidade e permeabilidade.

Os materiais de construção devem obedecer aos requisitos definidos em projeto, considerando as características dos materiais e seus usos.

Os estudos de caracterização geotécnica, química e mineralógica dos rejeitos serão descritos no item 5.5.

#### **2.4.5 Estudos Sísmicos**

Os projetos de pilhas de rejeito deverão considerar estudos de ameaça sísmica. O estudo de ameaça sísmica deve avaliar o perigo sísmico (natural) na área de implementação da estrutura, com base em estudos de abrangência regional ou estudos específicos para o local. Quando aplicável, deverão ser verificadas as vibrações induzidas.

NOTA:

Sugere-se a realização de estudos de ameaça sísmica probabilísticos (PSHA) que possibilite o correlacionar o sismo de projeto de acordo com a classificação

de consequência da estrutura, conforme definido por padrões legais ou internacionalmente aceitos, como CDA, GISTM e ICOLD.

## **2.5 Caracterização dos rejeitos**

Para os rejeitos devem ser apresentados e analisados os resultados da caracterização mineralógica, geoquímica e geotécnica - considerando suas características de resistência, deformabilidade e permeabilidade. As caracterizações geotécnicas devem abranger as condições previstas em todo o ciclo de vida da estrutura, tal como o estado de tensão final.

### **2.5.1 Caracterização geotécnica**

O projeto deve prever a realização de ensaios de campo e laboratório que permitam o entendimento das propriedades do material

O tipo e quantidade de ensaios devem considerar a fase que o projeto se encontra (estudo de alternativa, projetos conceitual, básico e detalhado), a critério da projetista. Os ensaios deverão ser suficientes para garantir a compreensão do comportamento do material, possibilitando, inclusive, a avaliação do potencial de liquefação.

### **2.5.2 Caracterização geoquímica e mineralógica**

Os rejeitos devem ser amostrados, caracterizados em relação a sua composição química global e de elementos traços, suas características mineralógicas, ao seu potencial para geração de drenagem ácida e de lixiviação de metais e ou radionuclídeos.

Deverá ser considerada a caracterização e definição dos valores de referência prévios à implantação do empreendimento, visando verificar as vulnerabilidades do aquífero e a definição da necessidade e do tipo de revestimento e/ou o controle a ser aplicado ao projeto.

## **2.6 Projeto de estrutura de disposição de rejeito em pilha**

O projeto de estrutura de disposição de rejeito em pilha deve ser desenvolvido considerando as fases de viabilidade, conceitual, básico e detalhado, incluindo também projeto de fechamento durante a fase de operação e ao final de vida útil.

Os aspectos geotécnicos do projeto de pilhas de rejeitos devem levar em consideração os materiais construtivos (disposição de material único, co-disposição de materiais ou disposição compartilhadas de materiais) .

Caso seja aplicável, alguma destas fases pode ser suprimida, desde que devidamente justificado

### **2.6.1 Critérios e premissas de projeto**

Os critérios e premissas de projeto devem estar compatíveis com as consequências e os possíveis impactos no entorno da estrutura, no sentido de minimizar riscos para os modos de falha aplicáveis durante todo o ciclo de vida da estrutura. Os critérios e premissas definidos em projeto devem, sempre que possível, objetivar a construção de uma pilha não saturada, e com ausência de lago na pilha.

É desejável que seja realizado aterro experimental objetivando definir aspectos construtivos da estrutura (número de passadas, tipo de equipamento, espessura de camada, controle de compactação teor de umidade, inclinação da superfície, trafegabilidade, entre outros).

### **2.6.2 Projeto Geométrico**

O projeto geométrico deve contemplar o arranjo geral da pilha, com plantas e seções, além de toda a infraestrutura e instalações necessárias para sua operação, como acessos, dispositivos de drenagem superficial e controle da qualidade da água, etc. Nas seções deverão vir destacados os diversos materiais e possíveis zoneamentos para a construção da estrutura.

A geometria da pilha deverá ser definida dentro dos limites do arranjo do projeto contendo minimamente altura e inclinação dos taludes ou, quando se tratar de projetos em pilhas existentes, apresentar os levantamentos topográficos atualizados.

Devem ser consideradas as interferências e restrições físicas para definições da geometria da estrutura, tais como acessos existentes, unidades industriais e comerciais, unidades residenciais, áreas de preservação, limites de cavas, características topográficas, dentre outros.

Os acessos devem obedecer a geometria definida em projeto e o seu o sequenciamento construtivo (raios, rampas, larguras, leiras de proteção entre outros), atendendo às exigências quanto à segurança operacional, drenagem, proteção dos taludes e manutenção durante o período de utilização.

O projeto geométrico deve trazer destacado a capacidade e curva cota volume.

### **2.6.3 Tratamento das fundações e impermeabilização**

O tratamento da fundação contempla as atividades de limpeza geral da área que será implantada a estrutura, remoção de materiais indesejáveis que deverá englobar escavações superficiais, solo orgânico e/ou colúvio que apresentar baixa capacidade de suporte, controle de água superficial e subterrânea, execução dos tratamentos necessários, mapeamento geológico-geotécnico por profissional especializado e liberação para implantação da estrutura sobre o local tratado.

Os procedimentos requeridos para execução do tratamento das fundações devem ser apresentados com base nos estudos geológico-geotécnicos e nos requisitos do projeto da estrutura. As soluções devem ser confirmadas na fase de construção, com base nas observações das características verificadas nos materiais revelados pelas escavações. No projeto deverão ser apresentados os critérios para aceitabilidade da limpeza e tratamento da fundação.

#### **2.6.4 Drenagem Interna**

Os critérios de dimensionamento da drenagem interna devem ser apresentados, assim como as locações dos drenos, a geometria e transições. O dimensionamento deve considerar as vazões máximas obtidas nos estudos de percolação pela pilha e fundação ou por medições locais, se pertinentes, aplicando-se o fator de segurança mínimo de 10 aos valores das vazões calculadas ou medidas.

O dimensionamento do sistema de drenagem deve considerar a geometria final da pilha, incorporando as deformações esperadas, e as características do rejeito, tais como granulometria, permeabilidade, grau de saturação, índice de vazios e anisotropia. Os materiais tanto de fundação, como de composição dos drenos e o próprio rejeito devem ser ensaiados a depender da fase do projeto.

#### **2.6.5 Avaliação da Segurança**

Para avaliação de segurança devem ser considerados nas análises diversos modos de falha plausíveis, caso a caso, conforme julgamento de engenharia apropriado (estabilidade de taludes, liquefação, erosão interna, etc).

##### **2.6.5.1 Estabilidade dos taludes**

As análises de estabilidade devem envolver, para cada etapa, isoladamente e em conjunto, sua fundação, ombreiras e o material disposto. Para tanto, as superfícies potenciais em análise devem considerar possibilidades de ruptura local e global, como:

- os taludes entre bermas devem ser construídos para inclinações que garantam os fatores de segurança recomendados na Tabela 1;
- as bermas devem ter largura suficiente para atender às considerações de drenagem e instalação de instrumentos, e devem garantir o acesso dos equipamentos de manutenção com segurança;
- para seções representativas, o ângulo geral da estrutura deve ser tal que atenda aos fatores de segurança recomendados na Tabela 1;

- as determinações de estabilidade devem ser efetuadas para cada estágio de implantação do projeto.

Os valores mínimos de fator de segurança a serem calculados pelas análises determinísticas de estabilidade devem considerar as condições de carregamento, drenado ou não drenado, de cada um dos materiais envolvidos.

Para condições drenadas de carregamento, as análises de estabilidade devem ser efetuadas em tensões efetivas, com a utilização de parâmetros efetivos de resistência ao cisalhamento e poropressões estimadas por rede de percolação. Parâmetros de resistência de pico ou residual podem ser utilizados para as diferentes situações encontradas, desde que devidamente justificados em projeto.

Na hipótese da ocorrência de materiais com comportamento não drenado ao carregamento, as análises de estabilidade podem ser executadas em tensões totais, com a utilização de parâmetros de resistência não drenada ou em tensões efetivas, com a utilização de parâmetros efetivos de resistência e poropressões estimadas.

Os fatores de segurança mínimos, conforme Tabela 1, devem ser obtidos, independentemente do tipo de análise e das condições de carregamento:

**Tabela 1 – Fatores de segurança mínimos para estruturas de disposição de rejeito (\*)**

Avaliação de Estabilidade	Talude	
	Operacional	Definitivo
Ruptura talude global - condição drenada	1,5	
Ruptura talude entre bermas - condição drenada	1,3	1,5
Ruptura talude global - condição não drenada	1,3	

- Compatibilizar com NBR 13.028 após consulta pública

Considerando as boas práticas de engenharia e com base nos dados experimentais obtidos (ensaios de campo e de laboratório), as análises baseadas em Métodos de Equilíbrio Limite podem, sempre que necessárias, ser complementadas por análises que considerem a não linearidade entre tensão e deformação por meio de métodos

baseados em relações constitutivas Tensão-Deformação (T-D), devendo seu emprego e utilização serem feitos com julgamento de engenharia apropriado.

### 2.6.5.2 Liquefação

#### Liquefação Estática

Para avaliar a suscetibilidade à liquefação, recomenda-se utilizar metodologias baseadas em:

classificações dos materiais, como uma metodologia simplificada, utilizando limites nas curvas de granulometria, os limites de Atterberg e o teor de umidade;

- ensaios de campo com base em correlações consagradas e representativas dos materiais em análise;

- utilização do parâmetro de estado para caracterização de solos e rejeitos, com determinação da Linha de Estados Críticos (LEC, Figura 1), objetivando alimentar modelo constitutivos representativos para análise tensão-deformação. O parâmetro de estado ( $\psi$ ) pode ser estimado a partir de laboratório ou de campo, por meio de técnicas consagradas disponíveis na literatura.

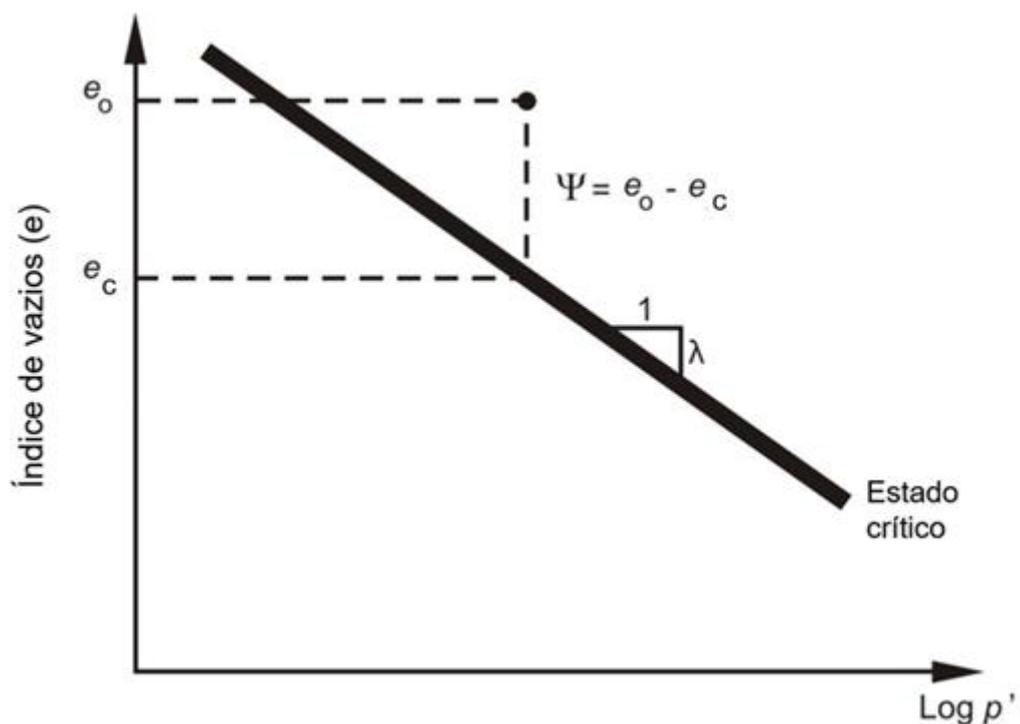


Figura 1 - Representação da Linha de Estados Críticos (LEC) e do Parâmetro de Estado ( $\psi$ )

Recomenda-se, nomeadamente para estruturas com grau de complexidade alto considerar a realização de análises tensão-deformação com recurso a modelos

constitutivos que consigam reproduzir condições de *strain-softening* sob carregamento não drenado. Tais análises podem ser realizadas usando técnicas numéricas diversas (Método dos Elementos Finitos, Métodos das Diferenças Finitas, etc.), idealmente acopladas a modelos que considerem o fluxo em consolidação hidrodinâmica, de maneira que o carregamento não drenado seja uma resposta do modelo face às taxas de carregamento impostas.

A Linha de Estados Críticos pode ser definida, no plano  $e\text{-log}p'$ , por dois modelos:

- Idealização convencional da LEC (linear no espaço semi-log):

$$e_c = \Gamma - \lambda_{10} \log(p'_c)$$

- Idealização aperfeiçoada da LEC (curvatura):

$$e_c = a - b \left( \frac{p'_c}{p'_{ref}} \right)^\alpha$$

onde  $e_c$  é o índice de vazios crítico,  $r$  é o índice de vazios no estado crítico para pressão de referência de 1 kPa,  $p'$  é a tensão média efetiva, e  $\lambda_{10}$  a inclinação da LEC no espaço semi-logarítmico ( $e\text{-log}p'$ ). Os parâmetros  $a$ ,  $b$  e  $\alpha$  são parâmetros de regressão ajustados para corresponder aos resultados dos ensaios, e  $p'_{ref}$  é adotado como 1 atm (101,32 kPa).

A partir de ensaios de laboratório é, em teoria, possível avaliar o estado de instabilidade do material, no qual o início da liquefação estática induz aumento súbito de deformações e poropressões. A velocidade de cisalhamento na Linha de Instabilidade ( $n_{IL}$ ) usando o plano  $p'\text{-}q$  de Cambridge é comparada às condições *in situ* ( $n_0$ ) no mesmo plano para garantir que:

$$n_0 < n_{IL}$$

sendo  $n = q/p'$  a razão de tensões,  $q$  o invariante da tensão desviadora ( $q = r'1 - r'3$ ) e  $p'$  a tensão média efetiva ( $p' = (r'1 + 2r'3)/3$ ).

As propriedades do solo envolvidas neste tipo de abordagem são medidas em ensaios convencionais de laboratório combinados com dados de ensaios *in situ*, usando duas estratégias distintas:

- Extração de amostras indeformadas para medir o comportamento tensão-deformação e a variação volumétrica dos materiais em ensaios triaxiais para estimar todas as propriedades necessárias para um determinado modelo constitutivo; ou
- Medição das propriedades intrínsecas dos materiais (que não variam com a densidade) em ensaios triaxiais e de cisalhamento direto executados

em amostras reconstituídas e, em paralelo, avaliar o estado do solo in situ a partir de ensaios de campo.

Uma série de ensaios triaxiais drenados (CID ou CK<sub>0</sub>D) e não drenados (CIU ou CK<sub>0</sub>U) executados em laboratório (um mínimo de cinco ensaios, onde cada ensaio representaria um ponto) são tipicamente necessários para determinar a LEC para cada tipo de material. Em algumas aplicações é recomendável repetir esta série para mais de um índice de vazios.

Detalhes do programa de ensaios para definir os parâmetros de estado crítico dos materiais podem ser obtidos no Apêndice A de Jefferies e Been (2016).

A avaliação da susceptibilidade à liquefação do maciço e de eventuais eventos deflagradores do fenômeno pode ser feita pelas seguintes etapas:

ETAPA 1: Definição de um modelo geomecânico representativo da geometria e do zoneamento (distribuição de materiais) da estrutura;

ETAPA 2: Definição de um modelo constitutivo representativo, devidamente calibrado por meio de ensaios de laboratório e de campo, modelos físicos e/ou demais dados disponíveis, com a devida parametrização dos diferentes materiais (Linhas de Estados Críticos);

ETAPA 3: Estimativa da distribuição do parâmetro de estado nas diferentes zonas da estrutura;

ETAPA 4: Simulação dos possíveis tipos de carregamento, condições de contorno, cenários distintos, etc;

ETAPA 5: Avaliação das possíveis zonas de concentração de tensão com base nos limites para as diferentes zonas da estrutura por meio do parâmetro , tomando ações de projeto no sentido de mitigar possíveis situações indesejáveis. Idealmente a razão deve ser limitada àquela conducente à Linha de Instabilidade à liquefação dos materiais, ou seja, não deve ultrapassar o valor máximo .

### **Liquefação Cíclica**

Recomenda-se que a liquefação cíclica seja avaliada usando o procedimento baseado em tensões, originalmente desenvolvido por Seed e Idriss (1971), que compara a relação entre a tensão cíclica induzida pelo terremoto (CSR – do inglês, *Cyclic Stress Ratio*) e a razão de resistência cíclica (CRR – do inglês, *Cyclic Resistance Ratio*) do solo ou do depósito de rejeitos. A liquefação deverá ocorrer quando as tensões cisalhantes induzidas por um terremoto excederem a resistência ao cisalhamento cíclica dos solos ou rejeitos.

A avaliação é baseada em quatro etapas:

ETAPA 1: Estimar CSR, que representa a tensão cisalhante cíclica induzida pelos eventos sísmicos característicos do projeto.

ETAPA 2: Estimar CRR, que representa a razão de resistência cíclica

do material mobilizadas durante um carregamento sísmico.

ETAPA 3: Calcular o fator de segurança contra liquefação cíclica ( ).

ETAPA 4: Estimar a resistência ao cisalhamento não drenada pós-liquefeita dos materiais susceptíveis à liquefação.

A ANCOLD (2019) sugere superior à faixa entre 1,0 e 1,2, sem desconsiderar os demais Fatores de Segurança definidos neste documento para análise de estabilidade de taludes em condições estáticas.

Recomenda-se ainda, caso seja avaliado como necessário, o desenvolvimento de modelos tensão-deformação para a análise do potencial de liquefação cíclica da estrutura, seguindo procedimentos similares aos já apresentados para o caso da liquefação estática, porém com os ajustes necessários ao cenário que se pretende simular (cargas cíclicas).

### **Níveis Elevados de Tensões**

Estruturas de disposição de rejeitos podem atingir alturas que as colocam entre as maiores estruturas geotécnicas já construídas, impondo estados de tensão média efetiva ( ) superiores, em várias ordens de magnitude, às tensões normalmente aplicadas em outras estruturas. Em níveis elevados de tensão, os efeitos da taxa de dilatação e quebra de partículas devem ser avaliados no projeto:

- **Taxa de dilatação:** tanto a tensão efetiva quanto a densidade relativa dos geomateriais particulados influenciam a sua taxa de dilatação e assim controlam a resistência ao cisalhamento. À medida que as tensões aumentam, a dilatação é gradualmente suprimida e o ângulo de atrito interno diminui progressivamente do pico para o residual.
- **Quebra de partículas:** os grãos podem sofrer quebra ou alteração na forma geral (morfologia) dos grãos sob altas tensões, o que resulta em uma mudança gradativa da granulometria. A quebra causa mudanças na compressibilidade, no volume, dilatação e ângulo de atrito interno, e incerteza na definição das condições de estado crítico.

Assim, o desconhecimento dos aspectos acima descritos pode levar a erros significativos na seleção dos parâmetros constitutivos apropriados à descrição da resistência ao cisalhamento e, conseqüentemente, na previsão do Estado Limite Último (ELS) e de problemas de estabilidade. Ensaios triaxiais ou de deformação plana devem ser realizados sob tensões média efetivas compatíveis com as esperadas para a configuração final da estrutura, caso contrário o ângulo de atrito interno pode ser superestimado.

### **2.6.6 Drenagem superficial**

Os seguintes tempos mínimos de recorrência das vazões de projeto e riscos hidrológicos são recomendados:

a) 100 anos para os dispositivos: canaletas de berma, canaletas de topo, drenagens de acesso sobre a pilha e descidas de água entre taludes;

b) 500 anos para os canais periféricos definitivos de coleta e condução de águas superficiais;

c) Para os dispositivos temporários, considerar riscos hidrológicos máximos de:

- 5% para os dispositivos: canaletas de berma, canaletas de topo, drenagens de acesso e descidas de água entre taludes;
- 2% para os canais periféricos de coleta e condução de águas superficiais.

### **2.6.7 Estruturas auxiliares ou temporárias**

São estruturas auxiliares e/ou temporárias:

- Canais e bacias para controle de cheias e retenção de sedimentos
- Pilhas de transferência para manejo (estocagem temporária e retomada) do rejeito
- Áreas de contingência para destinação de material durante condições não operacionais
- Acessos de serviço e operacionais

Estas estruturas deverão ser parte integrante do projeto e seguir os critérios definidos nesta norma. [\(Citação nova\)](#)

A retenção de sedimentos é uma medida importante para controle ambiental. Por isso, o projeto de pilhas de rejeitos de mineração deve prever sistemas de retenção de sedimentos adequados ao tipo, à quantidade e à granulometria dos rejeitos, bem como às condições hidrológicas, topográficas e climáticas da área.

Para uma efetiva escolha e dimensionamento dos sistemas de retenção de sedimentos em projetos de pilhas de rejeitos de mineração, é necessário considerar diversos aspectos fundamentais:

- a) **Caracterização dos Rejeitos:** Deve-se analisar a granulometria, densidade, composição química e mineralógica dos rejeitos, além do seu potencial de geração de ácido.
- b) **Caracterização Hidrológica:** Envolve a análise da precipitação, vazão, nível de água, frequência e duração das chuvas na área.
- c) **Caracterização Topográfica:** A inclinação do terreno, a forma, a orientação e a extensão das bacias hidrográficas afetam diretamente a movimentação da água e dos sedimentos.
- d) **Caracterização Ambiental:** Deve-se considerar a qualidade da água atual, a legislação ambiental aplicável, os usos múltiplos da água na região e a sensibilidade dos ecossistemas locais.

- e) **Análise de Risco:** É importante avaliar a probabilidade e a magnitude dos impactos ambientais, sociais e econômicos decorrentes da liberação de sedimentos.

Ao levar em consideração esses aspectos, o projeto de pilhas de rejeitos de mineração deverá desenvolver sistemas de retenção de sedimentos eficientes e adequados às especificidades da área e do material envolvido, reduzindo assim o impacto ambiental e aumentando a segurança da operação mineira.

Para a avaliação adequada dos sistemas de retenção de sedimentos em projetos de empilhamento de rejeito de mineração, é necessário apresentar uma série de documentos detalhados:

- a) **Descrição dos Sistemas de Retenção de Sedimentos:** Este documento deve incluir informações detalhadas sobre o tipo, localização, capacidade e funcionamento dos sistemas propostos, além de detalhes sobre manutenção e operação.
- b) **Memórias de Cálculo:** Devem apresentar as hipóteses assumidas, as metodologias utilizadas, as equações aplicadas, os parâmetros considerados e os resultados obtidos.
- c) **Desenhos e Plantas dos Sistemas de Retenção de Sedimentos:** Incluem dimensões, cotas, materiais utilizados e detalhes construtivos.
- d) **Relatórios Técnicos:** Estes devem incluir análises de eficiência, sensibilidade, custo-benefício e alternativas.

Na escolha das medidas estruturais, deve se preocupar em escolher a estrutura com menor risco associado levando-se os critérios referentes a potencial de risco a vida, potencial de risco socioambiental e potencial de risco econômico. De acordo com a escolha da estrutura de retenção de sedimentos os critérios de dimensionamento são alterados de acordo com suas classificações de risco. No caso de barragens e diques devem atender a normas e legislações específicas e no caso de sumps devem atender aos critérios de dimensionamento da macrodrenagem onde se encontram, ambos associados aos critérios ambientais de retenção de sedimentos.

Diques/Barragens podem ser utilizadas com dimensionamento de Volume de Residência para retenção de sedimentos:

- Verificar volumes disponíveis e frequência de limpeza por avaliação analítica;
- Verificar ocupação do reservatório por avaliação hidrodinâmica (não pode acumular junto ao(s) sistema(s) extravasor(es)).
- Verificar a classificação da estrutura segundo legislação vigente e necessidade de estudos adicionais referentes a estas estruturas de acordo

- com sua classificação, normas e legislações específicas.
- Verificar volumes disponíveis e frequência de limpeza por avaliação analítica;
  - Verificar ocupação do reservatório por avaliação hidrodinâmica (não pode acumular junto ao(s) sistema(s) extravasor(es)).
  - Verificar a classificação da estrutura segundo legislação vigente e necessidade de estudos adicionais referentes a estas estruturas de acordo com sua classificação, normas e legislações específicas.

Sumps são bacias escavadas no terreno para armazenamento de água e contenção de sedimentos levados pela chuva, quando devidamente dimensionados com volume de residência para este fim:

- Verificar classe CONAMA do corpo hídrico de destino
- Verificar volumes disponíveis e frequência de limpeza por avaliação analítica;
- Verificar a concepção evitando barramento acima do desnível mínimo do terreno natural, de forma que o “sump” de armazenamento não possua possibilidade de mecanismos de falha de diques e barragens, e não possa ser reenquadrado nestas categorias.

Em termos gerais, ao dimensionar uma estrutura de contenção de sedimentos deve-se considerar o seguinte:

- Apresentar as taxas de geração de sedimentos de cada tipologia discorrendo em relação à origem delas;
- Avaliar um cenário de máxima ocupação, no caso de diques, apresentando o resultado do trânsito de cheias, com borda livre e os controles que devem ser seguidos por meio de topobatimetrias;
- Definir o período de limpeza da estrutura, para estruturas escavadas do tipo sumps;
- Determinar os volumes de produção de sedimentos, de retenção de sedimentos e para amortecimento das cheias;
- Avaliar a eficiência de retenção de sedimentos não-coloidais;
- Dimensionar o sistema extravasor. Para estruturas do tipo sumps adotando no mínimo um período de retorno (TR) de 500 anos;

A estrutura de contenção de sedimentos deve apresentar borda livre mínima de 0,5 m.

## **2.6.8 Instrumentação e monitoramento**

*Em desenvolvimento*

## **2.6.9 Sequenciamento construtivo**

*Em desenvolvimento*

## **2.6.10 Classificação da estrutura**

*Em desenvolvimento*

## **2.6.11 Construção e controle de qualidade**

*Em desenvolvimento*

### **2.6.11.1 Especificações construtivas e diretrizes operacionais da pilha**

### **2.6.11.2 Especificação e construção de aterros experimentais**

### **2.6.11.3 Controle e acompanhamento de qualidade (QA/QC)**

## **2.7 Análise de risco**

*Em desenvolvimento*

## **2.8 Estudos de Ruptura Hipotética**

Estudos de ruptura hipotética podem ser realizados para as pilhas de estéril visando determinar o alcance da massa rompida, suas consequências em relação as estruturas adjacentes (por exemplo, reservatórios de barragens, acessos etc.) e classificação de risco. A definição das metodologias a serem empregadas, sejam analíticas ou numéricas, bem como a avaliação do volume rompido ficam a cargo do projetista, que deve avaliar o nível de detalhamento de informações conforme a fase do estudo.

A elaboração de um Estudo de Ruptura Hipotética para Pilhas (ERHP) deve ser utilizada para a avaliação dos danos potenciais associados à estrutura, em caso de rompimento, e para a definição de ações emergenciais para essas situações, caso necessário.

De maneira geral, a elaboração do estudo tem como objetivo a definição da área que pode ser impactada em caso de uma ruptura, denominada Mancha de Impacto. A delimitação dessa mancha permite identificar os possíveis impactos, gerir os riscos, planejar os sistemas de alerta, elaborar planos de emergência e definir usos, ocupações e atividades a jusante da estrutura.

Para a realização do estudo e caracterização da mancha de impacto é necessário conhecer (i) o volume mobilizável, que será determinado a partir da definição do modo de falha a ser considerado, dos cenários que devem ser analisados e da localização das rupturas, (ii) os aspectos que envolvem as áreas passíveis de serem atingidas, tais como topografia e uso e ocupação das áreas a jusante, além (iii) da análise de propagação, que envolve a definição da metodologia a ser adotada para a propagação da ruptura, os cenários hidrológicos a serem considerados e a sinergia com outras estruturas.

### 2.8.9 Dados Básicos

Entre os principais dados básicos necessários para o desenvolvimento dos estudos destacam-se (i) a topografia/cartografia de toda a pilha e das áreas adjacentes, (ii) os projetos da pilha, (iii) a caracterização dos materiais, tanto os dispostos quanto os de fundação e de estruturas de drenagem interna e (iv) os dados de estruturas que podem ser afetadas pela ruptura, tais como barragens de contenção de sedimentos ou outras pilhas, por exemplo.

As informações a serem adquiridas devem contemplar, mas não se limitar a:

- Topografia/Cartografia: A obtenção de levantamentos topográficos acurados da área de estudo é fundamental para o resultado dos ERHP e devem estar de acordo com o descrito no item 4.3.1 – Topografia e Cartografia;
  - Os levantamentos topobatimétricos devem ser realizados em todos os cursos d'água da área potencialmente impactada. A quantidade de seções deverá ser definida de acordo com as características dos vales e estruturas existentes a jusante. É recomendável, no mínimo, duas seções (início e fim) em regiões com características semelhantes (largura, declividade, meandros etc.) e quando houver alteração de uma das características, um novo conjunto de seções deverá contemplar novo trecho uniforme. Também é necessário o levantamento topobatimétrico em pontes ou outras estruturas que possam estrangular o escoamento no talvegue;
  - Devem ser executados levantamentos topobatimétricos também em estruturas de contenção de sedimentos a jusante das pilhas, ou outras estruturas em que essa informação se faça necessária.
- Projetos da pilha: A depender da etapa de projeto em que a estrutura se encontra ou se ela é uma estrutura já existente, devem estar disponíveis todos os projetos necessários para a adequada compreensão da estrutura, tais como o projeto geométrico e as seções típicas, o detalhamento da drenagem interna, o zoneamento de materiais etc. Para estruturas existentes, mas sem projeto executivo e As Built, deve ser realizado um As Is;
- Caracterização geotécnica e reológica dos Materiais;
  - Caracterização dos materiais, conforme descrita no item 4.3.3 – Caracterização dos Materiais;
  - A depender da metodologia adotada para os estudos (método empírico, analítico ou numérico) os parâmetros solicitados podem variar, devendo ser adequados para a necessidade de cada metodologia;
  - Para pilhas em fase de projeto conceitual, os parâmetros dos materiais podem ser estimados a partir de materiais similares e informações bibliográficas. Nas fases seguintes, os parâmetros deverão ser reavaliados com base em ensaios reais dos materiais a serem dispostos;
  - Para pilhas existentes, a caracterização dos materiais deverá ser realizada por meio do próprio material disposto, com a execução de sondagens, coleta de amostras e ensaios de laboratório. A determinação dos parâmetros reológicos deve ser realizada para a faixa de variação da concentração volumétrica determinada pelos cenários hidrológicos definidos para o estudo e deve ser preferencialmente apoiada na realização de ensaios como o Slump test, Vane test (ensaio de palheta) e o ensaio com Reômetro

- rotacional, a critério do engenheiro responsável pelo estudo.
- Para pilhas em construção, é imprescindível a caracterização contínua do material disposto ao longo da operação da pilha, até o seu fechamento.
- Dados de outras estruturas: deverão ser coletados dados como projetos de engenharia, contendo plantas, seções típicas, características técnicas e dados do reservatório (curva cota x volume), das estruturas que podem ser afetadas pela possível ruptura da pilha.

### **2.8.10 Volume Mobilizado**

Os aspectos que envolvem a definição da possível ruptura para determinação do volume mobilizável estão relacionados à aspectos como (i) modos de falha que serão considerados, (ii) cenários críticos que devem ser analisados para que a ruptura ocorra, e (iii) localização da seção crítica e da cunha de ruptura.

### **2.8.11 Modos de Falha**

Para os estudos de rupturas hipotéticas, devem ser avaliados todos os mecanismos de falha possíveis, mesmo que sejam pouco prováveis, buscando os cenários mais críticos com relação geração da mancha de impacto. Para pilhas já existentes, caso tenha sido identificada a presença de materiais de comportamento contrátil no aterro da pilha, deve ser avaliada a ruptura por liquefação, desde que haja possibilidade de saturação destes materiais.

### **2.8.12 Cenários Críticos**

A critério da empresa projetista, devem ser avaliados diferentes cenários que possam levar à ruptura da pilha, inclusive, casos de desconformidade da operação com o projeto e não funcionamentos, tais como lançamento de materiais indevidos, deficiência de compactação, falhas dos sistemas de drenagem interna e superficial, entre outros.

As análises de estabilidade devem considerar as condições mais críticas às quais a estrutura possa estar sujeita ao longo de sua existência, tais como sismos, elevações de nível freático, geração de poropressões, incertezas dos parâmetros de resistência etc. Nesses casos, os modos de falha podem ser avaliados por meio de análises de sensibilidade, podendo contemplar, mas não obrigatoriamente:

- Variações dos parâmetros de resistência dos materiais do aterro ou da fundação;
- Variações dos pesos específicos e saturação dos materiais;
- Liquefação de materiais em condição contrátil;
- Comportamento não drenado de materiais da fundação e aterro em função de carregamentos construtivos, sismos ou outras ocorrências;
- Deformações diferenciais da fundação e aterros;
- Variações geométricas na pilha, em especial a inclinação dos taludes durante o período de operação;
- Elevação dos níveis freáticos em função da colmatação dos sistemas de drenagem interna;
- Elevação dos níveis freáticos em função de condições hidrogeológicas ou

de recarga superiores às previstas em projeto. Após a realização das análises de estabilidade contemplando os diferentes modos de falha e cenários, devem ser obtidas diferentes superfícies de ruptura. Contudo, é provável que a superfície com menor fator de segurança seja de dimensões reduzidas em relação às demais. Nesse caso, cabe a projetista avaliar quais cenários serão adotados para o estudo de propagação, mesmo que não implique no menor fator de segurança.

Outro aspecto que deve ser considerado é a formação de superfícies de ruptura sucessivas após a primeira instabilização. Dessa forma, após a primeira falha, deve ser avaliado se a superfície remanescente permanece estável (fator de segurança  $> 1$ ). Caso contrário, deve ser avaliada a formação de uma segunda cunha de ruptura e, assim, sucessivamente até a estabilização teórica ( $FS > 1$ ).

### **2.8.13 Seção Crítica e Setorização da Pilha**

#### **2.8.13.1 Análises bidimensionais**

Devido à configuração espacial e às características topográficas e construtivas de uma pilha, podem existir diversas seções críticas que, em caso de ruptura, podem gerar diferentes áreas impactadas, portanto deve ser considerado que a ruptura pode ocorrer em qualquer local da estrutura, não somente na seção mais crítica. Para que isso seja possível, deve ser realizada a setorização da pilha, que deve buscar definir regiões com características homogêneas dentro de certos critérios, tais como:

- Geometria (altura e inclinação dos taludes);
- Material disposto;
- Condições de fundação;
- Condição topográfica a jusante;
- Conformação da topografia primitiva; e
- Condições de estabilidade e modos de falha.

Para cada setor deve ser avaliada a localização da seção crítica considerando os modos de falha possíveis e a mancha de impacto a ser gerada. Entretanto, sempre que houver a indicação da presença de um talvegue na topografia primitiva dentro de um setor, recomenda-se considerar a locação da seção crítica passando por ele. As análises devem definir a mancha de impacto mais crítica de cada setor.

#### **2.8.13.2 Análises Tridimensionais**

Outra abordagem possível, é a realização de análises de estabilidade em modelos tridimensionais (3D) para avaliação das condições de estabilidade e definição do volume mobilizável. Entretanto, recomenda-se que, também nessa abordagem, a avaliação não considere apenas a ruptura mais crítica, mas que seja feita a busca de outras rupturas possíveis nas diversas faces ou setores da pilha, para definição das manchas esperadas para cada setor.

### **2.8.14 Análise de Propagação**

O movimento da massa se dá, principalmente, devido às forças gravitacionais. Entretanto, a análise da propagação é um fenômeno de maior complexidade física

e que sofre influência de outras variáveis, tais como topografia, clima, propriedades geológicas, geotécnicas e reológicas, nível freático etc.

A escolha do modelo a ser utilizado e a parametrização dos dados para a análise deve levar em consideração o modo de falha, a concentração volumétrica e a saturação da massa mobilizada.

### **2.8.15 Métodos de Análise**

Os métodos para análise de propagação de rupturas de pilhas podem ser divididos em dois grupos principais: (i) empírico-estatísticos e (ii) analíticos. Para o projeto de uma pilha ou a avaliação de uma pilha existente, pode-se recorrer aos dois métodos, conforme a evolução do projeto, a critério do engenheiro responsável pelo estudo.

#### **- Métodos Empírico-Estatísticos**

Os métodos empíricos-estatísticos utilizam correlações com eventos históricos para determinação do volume mobilizado e alcance esperado a jusante. Pela simplicidade de aplicação, podem ser utilizados para estimativas preliminares em fases iniciais de projeto ou licenciamento.

#### **- Métodos Analíticos**

Os métodos analíticos envolvem a solução das equações que descrevem o deslocamento de massas, geralmente com o uso de modelos numéricos ou analíticos, que consideram a geometria e o mecanismo do potencial escorregamento. Podem apresentar informações como a velocidade do fluxo, as profundidades e a distribuição da mancha de ruptura.

### **2.8.16 Cenários Hidrológicos**

Avaliar os cenários hidrológicos a serem considerados nos estudos de ERHP é importante, tanto para os estudos de recarga quanto para a definição da chuva torrencial a ser incorporada na hipótese de ruptura, afetando diretamente a análise de propagação do material a ser mobilizado e escoado.

A jusante da pilha, podem existir barragens para contenção de sedimentos ou para outras finalidades. Caso seja crível ou possível, deve ser avaliado o cenário de ruptura em cascata da pilha e do barramento a jusante. Nesses casos, para a avaliação do cenário com maior dano possível, recomenda-se considerar pelo menos um cenário de ruptura com condições hidrológicas severas, considerando uma chuva torrencial com TR 10.000 anos ou a Precipitação Máxima Provável (PMP), na bacia de contribuição a montante e uma cheia natural no vale a jusante, considerando um TR de 10 a 100 anos para o Rainy Day e TR 2 anos para o Sunny Day. Recomenda-se utilizar a premissa de sobreposição do hidrograma de ruptura sobre o pico da cheia natural de referência, uma vez que não é possível prever se haverá ou não a sobreposição desses dois hidrogramas, ou onde ele aconteceria.

### **2.8.17 Sinergia com Outras Estruturas**

A avaliação da sinergia com outras estruturas é um dos aspectos que envolvem as áreas passíveis de serem atingidas, além da caracterização topográfica e do levantamento do uso e ocupação, já detalhados no item 4.12.1 – Dados Básicos.

O movimento de massa gerado pela ruptura da pilha pode atingir estruturas a jusante, e quando estas estruturas afetadas possuírem volumes mobilizáveis, ocorre uma sinergia entre o movimento de massa originado na pilha e o movimento da nova massa mobilizada. Um exemplo de estruturas a jusante que podem ser afetadas são barramentos e/ou outras pilhas. A ruptura de outras pilhas a jusante pode ocorrer devido ao impacto de uma onda de ruptura, sismo, erosão e instabilidades devido ao choque. No caso das barragens, o trânsito da massa rompida pelo reservatório poderá instabilizar e/ou galgar o maciço, causando a ruptura da mesma e mobilização do volume contido em seu reservatório.

O caso mais crítico para mobilizações sinérgicas é o de barragens e/ou diques de contenção de sedimentos, pois, geralmente, estão situadas a jusante e muito próximas das pilhas. Para os casos em que seja crível a mobilização em cascata de uma barragem, o ERHP deverá incorporar a ruptura da barragem ao modelo, sendo necessária a reavaliação dos parâmetros de escoamento, volume mobilizado, concentração volumétrica, modelo de propagação e premissas associadas ao modelo.

### **2.8.18 Mancha de Impacto**

A mancha de impacto deve representar cartograficamente o resultado do estudo de ruptura hipotético e corresponde à envoltória de máximos ao redor da pilha. No caso de sinergia com outras estruturas, deverá ser feita nova análise do impacto gerado e, tratando-se de barragens afetadas, devem ser seguidas as diretrizes e boas práticas de estudos de dam break , levando-se em consideração o aporte de materiais da pilha rompida no reservatório da barragem.

A mancha de impacto final da pilha será correspondente ao somatório das envoltórias das diversas manchas de impactos definidas para cada um dos setores analisados e as decorrentes de impacto secundário em outras estruturas.

Os mapas de impacto devem fornecer as informações de modo intuitivo e preciso, e o conjunto das informações presentes pode contribuir para análises da mancha. Posto isso, é importante que os mapas contenham os contornos topográficos, as imagens aéreas com resolução adequada e a identificação de rodovias, ferrovias, pontes, travessias, áreas industriais e comunidades.

De maneira geral sugere-se que os mapas sejam elaborados em escalas adequadas, geralmente maiores que 1:10.000 a critério do engenheiro responsável, podendo ser necessários mapas mais detalhados no caso de locais com maior densidade de estruturas e pessoas.

## **2.9 Plano de fechamento**

O plano de fechamento conceitual da estrutura de disposição de rejeito deve apresentar descrição dos processos, atividades e alternativas de uso futuro, buscando integração ao meio ambiente local e o plano de fechamento da mina, atendendo a legislação aplicável e boas práticas reconhecidas nacionalmente e internacionalmente.

A geometria final dos taludes intermediários e globais deve considerar a melhor configuração que assegure a estabilidade física e química da estrutura e partes associadas a longo prazo.

Sempre que possível, deve-se dar preferência ao fechamento progressivo da estrutura, considerando a implantação de drenagem e proteção superficial adequada às características da vegetação local e eventual uso futuro da área.

O plano de fechamento conceitual deve ainda contemplar todas as atividades após o fim da vida útil operacional da estrutura, como medidas de monitoramento e instrumentação, revestimentos, sistema de drenagem superficial e garantia de estabilidade física e química.

A cada alteração substancial do projeto, mesmo na fase de construção, o plano de fechamento deverá passar por análise e, se aplicável, revisão de modo a minimizar riscos e custos adicionais no longo prazo.

## **2.10 Documentos anexados ao projeto**

Os seguintes documentos devem estar anexados ao relatório:

### **a) Projeto Conceitual**

Nesta fase de projeto deverão ser validadas e consolidadas as premissas estabelecidas na fase do estudo de alternativas, devendo justificar a viabilidade técnica da alternativa selecionada, onde deverá ser verificada a existência de falha fatal para a implantação do projeto, devendo conter minimamente:

- Estudos locacionais da área de implantação, considerando: fisiográficos, hidrográficos, morfológicos, geológico-geotécnicos, sísmológicos, hidrometeorológicos, hidrogeológicos e socioambientais;
- Estudos de Alternativas Tecnológicas de Empilhamento - Métodos de desaguamento, métodos de transporte, métodos de disposição (espalhamento, compactação);
- Estudos geométricos (Arranjo Geral, acessos operacionais, diretrizes preliminares da área e possíveis soluções de limpeza e tratamento de fundação, sistema de impermeabilização quando necessário, drenagem interna, sistema de drenagem superficial, instrumentação mínima, estrutura de contenção de sedimentos, sistema extravasor);
- Estudos Geológicos-Geotécnicos (Mapa Geológico-Geotécnico, sondagens

- preliminar, podendo ser empregados métodos de investigação geofísica, quando aplicável);
- Estudos hidrogeológicos preliminares (mapeamento nascentes e medição de vazão e qualidade da água, identificação de zonas de recarga e descarga)
  - Estudos Geotécnicos do rejeito e materiais de construção (Definição preliminar da capacidade de suporte da fundação e das atividades de limpeza e tratamento de fundação, Definição preliminar de parâmetros geotécnicos em condições drenadas e não-drenados (quando aplicável) a partir de dados bibliográficos e/ou análise de informações existentes, sismicidade natural e induzida (quando aplicável), Avaliação das Seções Críticas, Avaliação de Estabilidade Geotécnica, Drenagem interna);
  - Especificação Técnica para caracterização físico-químico dos rejeitos;
  - Estudos Hidrológicos e Hidráulicos preliminares;
  - Estudos sedimentológicos;
  - Estudos de área de empréstimo;
  - Estudos de ADME, ADML e Canteiro de Obras;
  - Plano de instrumentação (definição dos tipos de instrumento aplicáveis e localização);
  - Levantamento preliminar dos quantitativos;
  - Plano de Investigação (Obrigatório);
  - Projeto conceitual de estruturas de contenção de sedimentos.

## **b) Projeto Básico**

O projeto básico deve ser o detalhamento do projeto conceitual para a consolidação da maturidade do projeto para confirmação de expectativas conceituada e estimadas inicialmente, devendo conter minimamente:

- Caracterização físico-químico dos rejeitos;
- Consolidação dos estudos geométricos (base topográfica, arranjo geral, acessos operacionais, limpeza e tratamento de fundação, sistema de impermeabilização quando necessário, drenagem interna, sistema de drenagem superficial, instrumentação mínima, estrutura de contenção de sedimentos, sistema extravasor);
- Estudos Geológicos (Avaliação técnica do Mapeamento e campanhas existentes);
- Estudos Geotécnicos (Definição de parâmetros geotécnicos em condições drenadas e não-drenados (quando aplicável) a partir de investigações e ensaios representativos, sismicidade natural e induzida (quando aplicável), Avaliação das Seções Críticas, Avaliação de Estabilidade Geotécnica, Drenagem interna, estudo de tensão x deformação);
- Estudos Hidrológicos e Hidráulicos;
- Estudos Sedimentológicos;
- Estudos Hidrogeológicos e Hidrogeoquímicos (quando necessário);
- Estudos e arranjos de áreas de empréstimo;
- Projeto de instrumentação (definição das seções instrumentadas, tipos de instrumentos e locação e diretrizes para monitoramento geotécnico);
- Especificação técnica para aterro experimental;

- Especificação técnica complementar de ensaios de campo e laboratório (quando aplicável);
- Levantamento dos quantitativos;
- Estudo de Ruptura hipotética;
- Análise de Risco do projeto.

### **c) Projeto Detalhado**

O projeto detalhado consiste em apresentar a nível construtivo todo o detalhamento do projeto para permitir sua implantação, posterior operação e diretrizes de fechamento, devendo conter minimamente:

- Caracterização físico-químico complementar dos rejeitos (caso necessário);
- Estudos geométricos (Arranjo Geral, acessos operacionais, limpeza e tratamento de fundação, sistema de impermeabilização quando necessário, drenagem interna, sistema de drenagem superficial, instrumentação mínima, estrutura de contenção de sedimentos, sistema extravasor);
- Estudos Geológicos (Mapa geológico-geotécnico, geologia regional e local, sondagens existentes e definição das seções geológicas);
- Estudos Geotécnicos (Definição das atividades de limpeza e tratamento de fundação, Definição de parâmetros geotécnicos em condições drenadas e não-drenadas (quando aplicável) a partir de ensaios de laboratório e/ou campo, sismicidade natural e induzida (quando aplicável), Avaliação das Seções Críticas, Avaliação de Estabilidade Geotécnica, Drenagem interna);
- Estudos Hidrológicos e Hidráulicos;
- Estudos sedimentológicos;
- Execução de aterro Experimental;
- Sequência Construtiva;
- Detalhamento de instrumentação e controle para a etapa de construção;
- Detalhamento de instrumentação e controle para a etapa de operação;
- Programa de QA/QC;
- Definição dos níveis de controle para monitoramento geotécnico;
- Manual de Operação (Operação em condições de regimes hidrológicos);
- Levantamento dos quantitativos;
- Estudo de Ruptura hipotética;
- Critérios para As Built;
- Plano de Ação Emergencial;
- Plano conceitual de fechamento, considerando a necessidade do fechamento progressivo da estrutura;
- Análise de Risco da implantação e operação;
- Revisão do CAPEX/OPEX;