COPPE UFRJ
Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

ASPECTOS CONCEITUAIS E FRAGILIDADES DE BARRAGENS DE REJEITOS

Mauricio Ehrlich
COPPE, UFRJ

ÍNDICE

- Rejeitos de mineração
- Barragens de Rejeito
- Tipos de Alteamento
- Acidentes em Barragens de rejeitos
- Análises de estabilidade e mecanismos de falha
- Comentários Finais

Rejeitos de mineração

Mauricio Ehrlich

Rejeitos de mineração 1996-2005
(Ipea, 2012)

Ferro	Ouro	Titânio	Fosfato	Estanho	Zircônio	Calcário	Alumínio	Cobre	Níquel	Nióbio	Caulim	Zinco	Manganês	Total
766 35%	295 14%	276 13%	244 11%	149 7%	116 5%	89 4%	70 3%	54 2,5%	36 1,6%	36 1,6%	24 1,1%	13 0,6%	12 0,6%	2.180 100%

(Em milhões de ton)

Mauricio Ehrlich

Proporção entre material beneficiado e rejeito gerado em 2005 (Ipea, 2012)

ferro	cobre	ouro
3:1	1:40	1:750.000

Mauricio Ehrlich

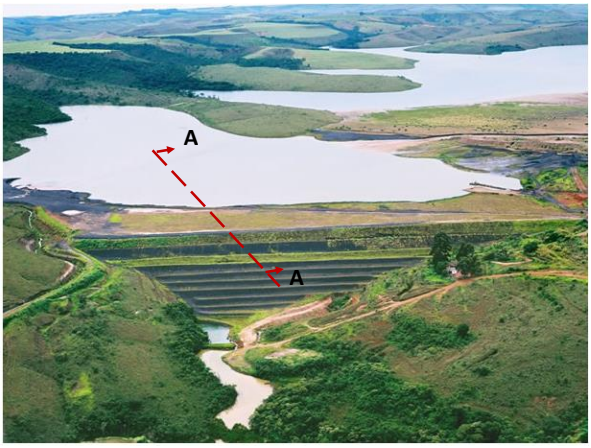
Riscos Potenciais de Contaminação do Meio Ambiente

- Classe I ou Perigosos
- Classe II ou Não-Inertes
- Classe III ou Inertes

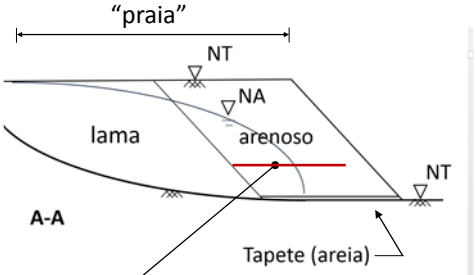
Mauricio Ehrlich

Barragens de Rejeitos

Mauricio Ehrlich



"praia": distância entre a linha d'água no reservatório e a crista do dique de alteamento.



Por vezes ocorre a presença de línguas de lama junto à face, em função da operação

Mauricio Ehrlich

Espigotamento/ ciclonagem

Os rejeitos usualmente são separados por ciclonagem e lançados na barragem por bombeamento com elevada quantidade de água (~8x vol. sólidos)*

* *Existem técnicas de beneficiamento de minérios e transporte de rejeitos por via seca ou pastosa, mas são menos empregadas em função dos maiores custos*

Características do materiais (Lama)

- Material fino de baixa permeabilidade (k=~10^{-8} m/s) com índice de vazios (e) elevado e comumente saturado;
- As lamas apresentam-se em estado fluido ou semissólido em função do processo beneficiamento do minério e das condições de deposição e drenagem;

Características do materiais (Lama)

- Em geral, é necessário muito tempo para que ocorra o adensamento das lamas*, em condições normais de operação das barragens;
- Tal ocorre em função das grandes alturas de material estocado que dificulta a drenagem.

* *variação de volume com expulsão da água intersticial*

Mauricio Ehrlich

Características do materiais (Arenoso)

- Material mais grosseiro com permeabilidade mais elevada (k=~10^{-5} m/s);
- Sujeito à liquefação quando pouco compacto, saturado e sob solicitações rápidas (estática ou dinâmica).

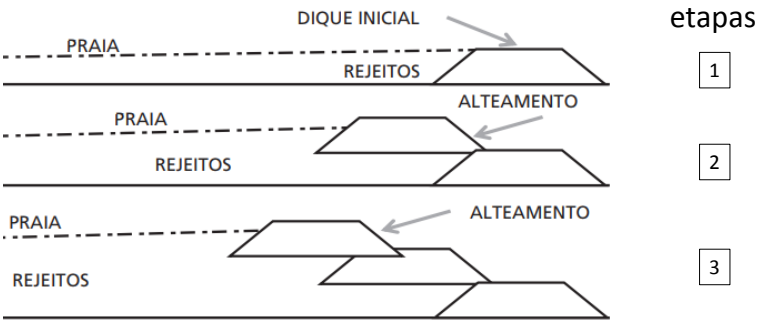
Mauricio Ehrlich

Tipos de Alteamento

Vick 1983

Mauricio Ehrlich

Por montante*

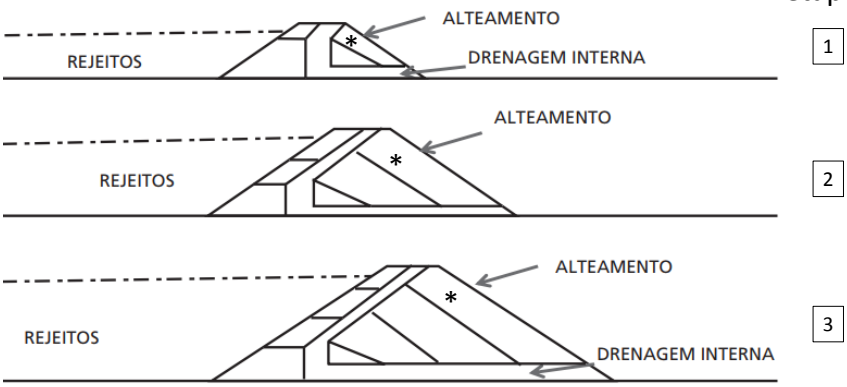


* *Técnica usualmente adotada por ser de menor custo*

Mauricio Ehrlich

Por jusante

etapas

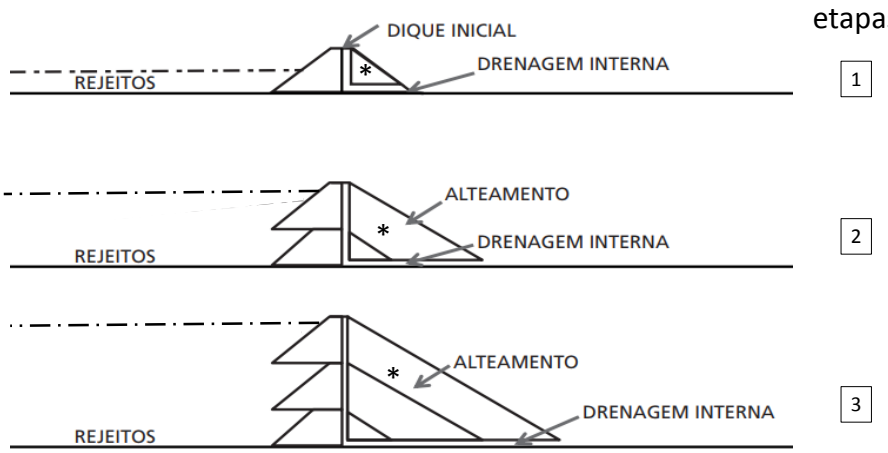


* *A base da próxima etapa do alteamento é material compactado e bem drenado*

Mauricio Ehrlich

Por linha de centro

etapas



* *A base da próxima etapa do alteamento é material compactado e bem drenado*

Mauricio Ehrlich

Viabilidade técnica do alteamento por montante (Vick 1983)

- Os rejeitos devem formar uma praia competente para suportar os diques de alteamento;
- As condições do local e a operação devem permitir um bom controle da posição da superfície freática e da capacidade de armazenamento de água no reservatório;
- Para tal a água de contribuição por drenagem das bacias hidrográficas a montante e adjacentes deve ser desviada quase totalmente do reservatório para as condições normais de operação, evitando o seu armazenamento. Essa condição visa evitar a saturação do rejeito e assim melhorar a estabilidade;
- O procedimento não deve ser adotado em locais com sismicidade relevante.

Acidentes em Barragens de rejeitos

Vazamentos de lama

PERÍODO	MILHÕES de m^3
1955 e 1965	6
2005 e 2015	107*
2015 e 2025	123 (estimativa)

Bowker Associates (Levantamentos e estimativa)

* Mariana/MG: 40 milhões de m^3

Mauricio Ehrlich

Acidentes com Mortes

ANO	BARRAGEM / PAÍS	NUM. DE MORTES
1970	Mufilira / Zambia	89
1972	Buffalo Creek/ USA	125
1974	Bakofeng / África do Sul	12
1978	Arcturus / Zimbabwe	1
1985	Stava / Itália	269
1986	**Fernandinho / Brasil**	7
1994	Merriespruit / África do Sul	17
1995	Placer / Filipinas	12
2001	**Rio Verde / Brasil**	5

(dados segundo ICOLD-2001)

Mauricio Ehrlich

Acidentes com Mortes

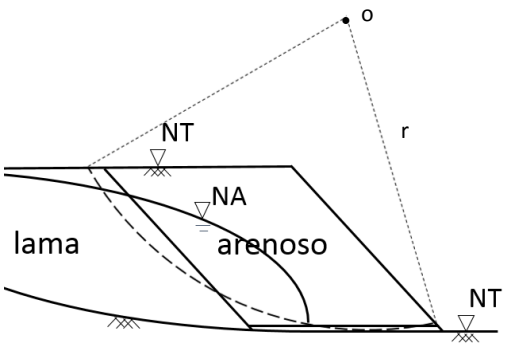
ANO	BARRAGEM / PAÍS	NUM. DE MORTES
2015	**Mariana/ Brasil**	19
2018	Urique/México	3
2019	**Brumadinho/ Brasil**	210 (+96 desap.)

Mauricio Ehrlich

Análises de estabilidade e mecanismos de falha

Mauricio Ehrlich

Análise de estabilidade



Usualmente considera-se:

- arenoso: condição "drenada"
- lama: "não drenada"*

* *rotura sob umidade constante*

$$FS = \frac{S}{t}$$

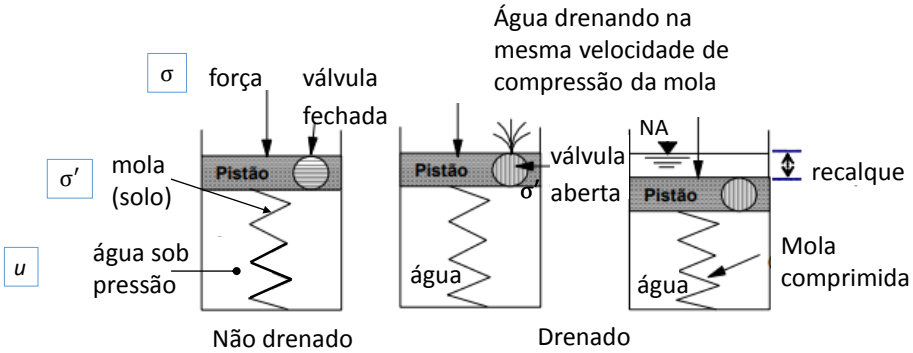
$$S = \sigma' \tan(\phi')$$

$$\sigma' = \sigma - u$$

FS: Fator de segurança
S : Resistência ao cisalhamento
σ : Tensão total

σ′: Tensão efetiva
u : Poro pressão (pressão na água)
t : Tensão cisalhante atuante

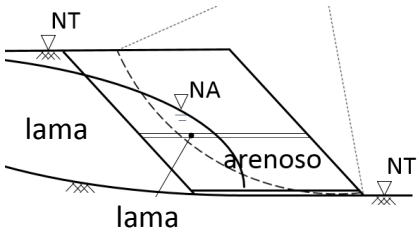
Comportamento "drenado" vs. "não drenado"



$$\sigma' = \sigma - u$$

Mauricio Ehrlich

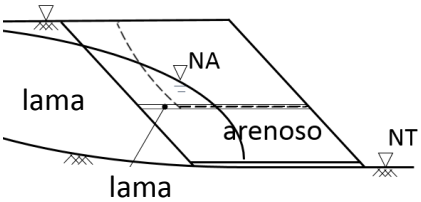
Presença camada de lama junto a face



Rotura circular*[1]

- Modelagem não realista do mecanismo de deslizamento

*[1] *considerando esta modelagem a camada de lama pouco influenciaria nos resultados*



Rotura não circular

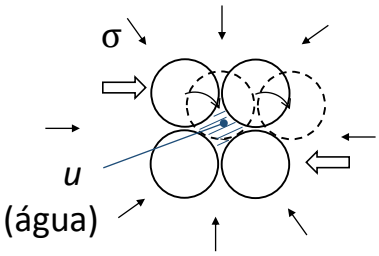
- Mecanismo provável de deslizamento*[2]

*[2] *a camada de lama mostra-se influenciando os resultados*

Mecanismo de falha

Exemplos

Liquefação



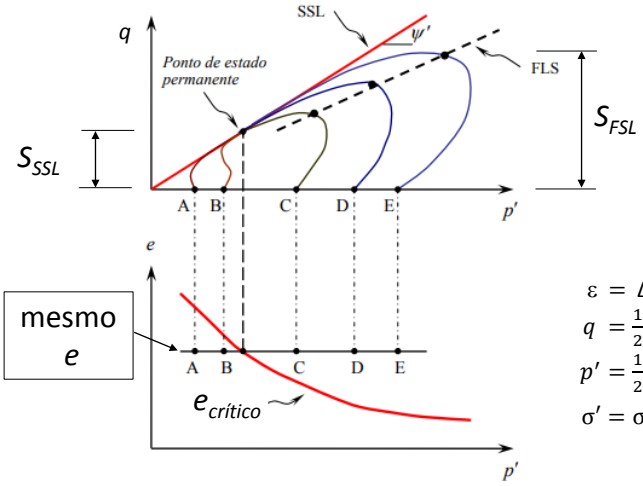
$$\sigma' = \sigma - u$$
$$S = \sigma' \tan(\phi')$$

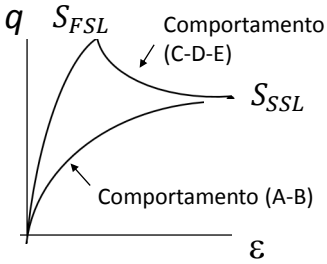
- Materiais pouco compactos (não compactados) tendem a diminuir de volume quando cisalhados ($e > e_{crítico}$*);
- Se cisalhados a velocidades acima da capacidade de drenagem da água intersticial, a poro pressão (u) aumenta e a resistência (S) diminui consideravelmente.

* *O índice de vazios crítico é função da compacidade e tensão confinante efetiva (σ'). Nesta condição o solo não varia de volume quando cisalhado.*

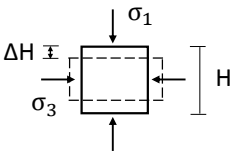
Mauricio Ehrlich

Liquefação (Kramer 1996)



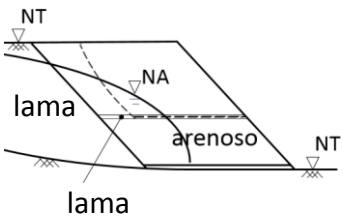


$$\varepsilon = \Delta H/H$$
$$q = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$$
$$p' = \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3)$$
$$\sigma' = \sigma - u$$



Mauricio Ehrlich

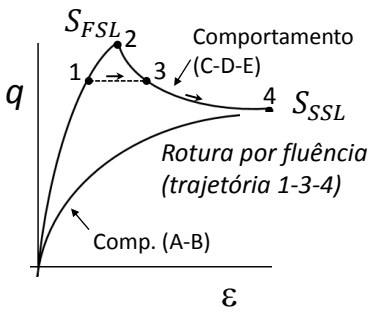
Liquefação estática



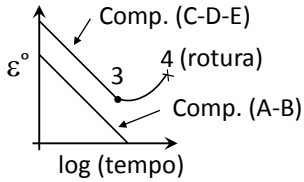
- Pode iniciar-se por uma rotura convencional. Deflagrado o processo, a velocidade aumenta e não possibilita mais a livre drenagem da água. Daí a poro pressão também aumenta e o material se "liquefaz";
- Uma camada a grande profundidade pode se liquefazer, enquanto outras situadas mais acima não. Pois a tendência à liquefação é função das tensões confinantes, isto é da altura da barragem;
- Um processo de fluência ("creep") também pode levar à liquefação estática.

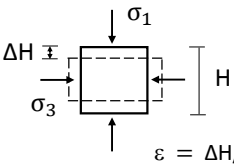
Mauricio Ehrlich

Fluência (*não drenada*)



(Singh & Mitchell, 1969)



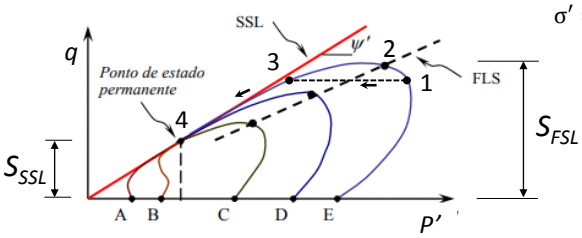


$\varepsilon = \Delta H/H$

$q = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$

$p' = \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3)$

$\sigma' = \sigma - u$



Mauricio Ehrlich

Comentários Finais

Mauricio Ehrlich

Projeto

- É importante ter um projeto robusto e flexível, capaz de acomodar variações e imprevistos durante a operação da barragem. Os dispositivos de drenagem devem ter redundância, a drenagem é uma questão central neste tipo de projeto;
- Deve-se efetuar estudo de Balanço Hídrico, que permita um dimensionamento adequado dos sistemas de drenagem (de fundo e superficial);
- O projeto deve garantir a drenagem completa do reservatório próximo a face e a formação de uma “praia” com largura adequada durante a operação da barragem;
- Uma drenagem eficiente, garante que os rejeitos arenosos não estejam saturados junto a face, aumentando sua resistência e evitando uma liquefação potencial;

Mauricio Ehrlich

Construção e Operação

- Falhas nos sistemas de drenagem superficial (sistema extravasor) e interno (drenos de fundo) podem comprometer todo o empreendimento;
- O sistema de drenagem deve estar em condições de viabilizar a “praia” de projeto de forma permanente;
- Níveis d’água elevados podem prejudicar a estabilidade das barragens de rejeitos induzindo sua liquefação;

Mauricio Ehrlich

Construção e Operação

- Além da menor resistência a presença de lama junto a face compromete a eficiência da drenagem devido à sua menor permeabilidade;
- No caso de presença de lamas na região de “praia”, as velocidades de alteamento devem ser muito reduzidas, pois as condições de drenagem ficam prejudicadas. As velocidades de alteamento devem ser compatíveis para garantir “condições drenadas”;
- Alteamentos lentos, favorecem a drenagem, maior resistência da lama e do material arenoso e a estabilidade da barragem;

Mauricio Ehrlich

Estabilidade da barragem

- No Brasil, a sismicidade é baixa, apesar de não ser a causa principal da ruptura em barragens de rejeitos, podem, no entanto, contribuir de forma secundária num processo de ruptura já avançado;
- Análises de estabilidade por equilíbrio limite são usualmente adotadas para avaliação da estabilidade de barragens;
- Estas análises permitem compreender o gatilho da ruptura, com possível liquefação dos rejeitos arenosos e corrida de lama. As lamas, em geral, não se apresentam em estado sólido (inclusive antes da ruptura);
- Deve-se atentar para a presença de camadas contínuas de lama junto à face. No caso, se fazem necessárias análises considerando roturas não circulares.

Grato

me@coc.ufrj.br

Mauricio Ehrlich