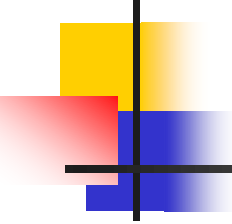


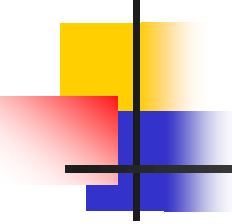
Rejeitos de mineração e barragens de rejeito

PEF-3409 Geotecnia e Recuperação Ambiental



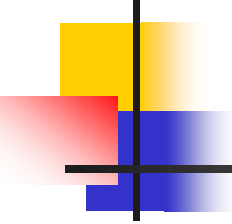
Alguns conceitos

- Minério: rocha, constituída de um único mineral ou de um conjunto de minerais, que contém um mineral valioso que pode ser explorado economicamente.
- Mineração: conjunto de processos e atividades para obtenção de minerais.



Alguns conceitos

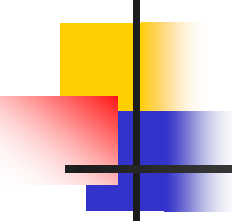
- A obtenção do minério compreende as etapas de lavra e beneficiamento.
- Lavra: processo de retirada do minério da jazida.
- Beneficiamento: tratamento para preparar granulometricamente, concentrar ou purificar minérios, visando extrair o mineral de interesse econômico, que é o produto final da atividade mineradora.



Produção mineral brasileira

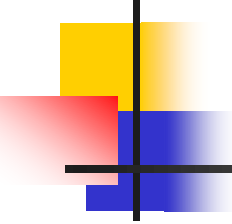
- aço, água mineral, alumínio, areia, barita, bentonita, berílio, cal, calcário bruto, carvão mineral, caulim, chumbo, cimento, cobre, crisotila, cromo, diamante, diatomita, enxofre, estanho, feldspato, ferro, fluorita, fosfato, gás natural, gipsita, grafita natural, granitos e mármore, lítio, magnesita, manganês, metais do grupo platina, mica, molibdênio, nióbio, níquel, ouro, pedra britada, petróleo, potássio, prata, quartzo, rochas ornamentais, sal, sal-gema, talco e pirofilita, tantalita, terras raras, titânio, tungstênio, vanádio, vermiculita, zinco e zircônio.

(Departamento Nacional de Produção Mineral, 2006)



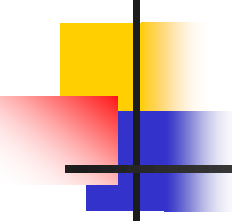
Resíduos das atividades mineradoras

- Estéreis: gerados pelas atividades de extração ou lavra no decapeamento da mina; materiais escavados e retirados para atingir os veios do minério; não têm valor econômico e são geralmente dispostos em pilhas.
- Rejeitos: resultantes dos processos de beneficiamento a que são submetidos os minérios; são geralmente compostos de partículas provenientes da rocha, de água e de outras substâncias adicionadas no processo de beneficiamento.



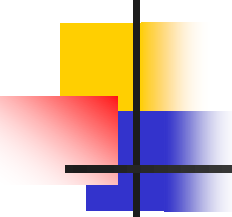
Processos de beneficiamento

- Têm a finalidade de regularizar o tamanho dos fragmentos, remover minerais associados sem valor econômico e aumentar a qualidade, pureza ou teor do produto final.
- Procedimentos empregados: britagem (fragmentação), moagem (pulverização), peneiramento (classificação) e concentração (por densidade, separação magnética, separação eletrostática, ciclonagem, aglomeração, flotação, lavagem, secagem, pirólise, calcinação).



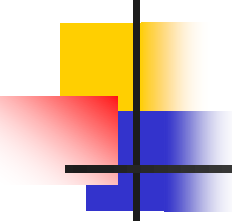
Razão média gravimétrica entre o produto final e rejeitos gerados (Braga 2007)

Minério	Razão gravimétrica entre produto final e rejeitos
Ferro	2:1
Alumina	1:1-1:2,5
Carvão	1:3
Fosfato	1:5
Cobre	1:30
Ouro	1:10.000



Disposição dos rejeitos

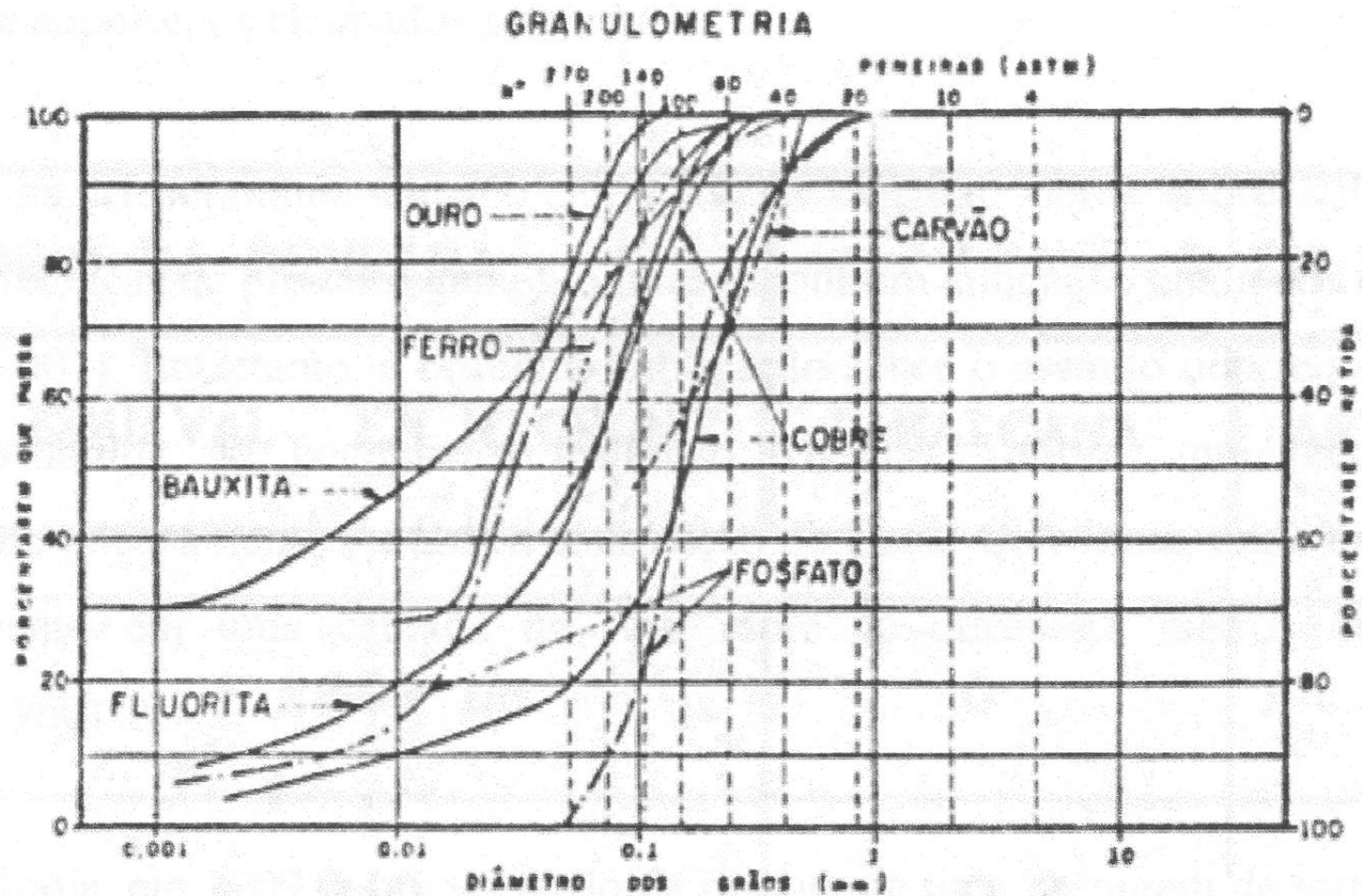
- Os rejeitos são geralmente depositados sobre a superfície do terreno, em bacias de disposição formadas por barragens ou diques, para evitar que percolados atinjam águas superficiais e subterrâneas e que o material particulado cause assoreamento de cursos de água.
- Denominam-se diques as estruturas construídas em áreas planas ou de pouca declividade, e barragens as estruturas que fecham o trecho mais estreito de um vale.
- Os diques e as barragens que formam bacias de disposição de rejeitos são chamados genericamente de barragens de rejeitos.

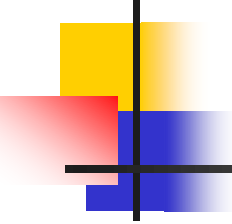


Características dos rejeitos

- As características geotécnicas, físico-químicas e mineralógicas dos rejeitos dependem fundamentalmente do tipo de minério e do processo de beneficiamento a que foi submetido.
- Quanto à distribuição granulométrica, os rejeitos podem variar de areias finas a colóides.
- Os rejeitos finos, com grãos de diâmetro menor ou igual a 0,074 mm, são denominados lamas e os de textura mais grossa, rejeitos granulares.

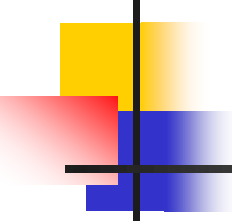
Curvas granulométricas de alguns rejeitos brasileiros (Abrão 1987)





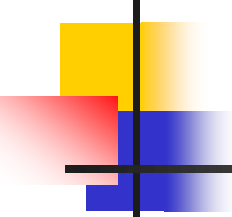
Transporte dos rejeitos

- A forma de transportar os rejeitos das usinas de beneficiamento até os locais de disposição depende das suas características geotécnicas.
- Uma mistura com maior teor de sólidos, como uma pasta, é transportada para a estrutura de contenção por caminhões e/ou correias transportadoras.
- Uma mistura mais fluida é transportada por tubulações, por gravidade ou bombeamento, o que é uma alternativa de menor custo operacional.



Transporte dos rejeitos

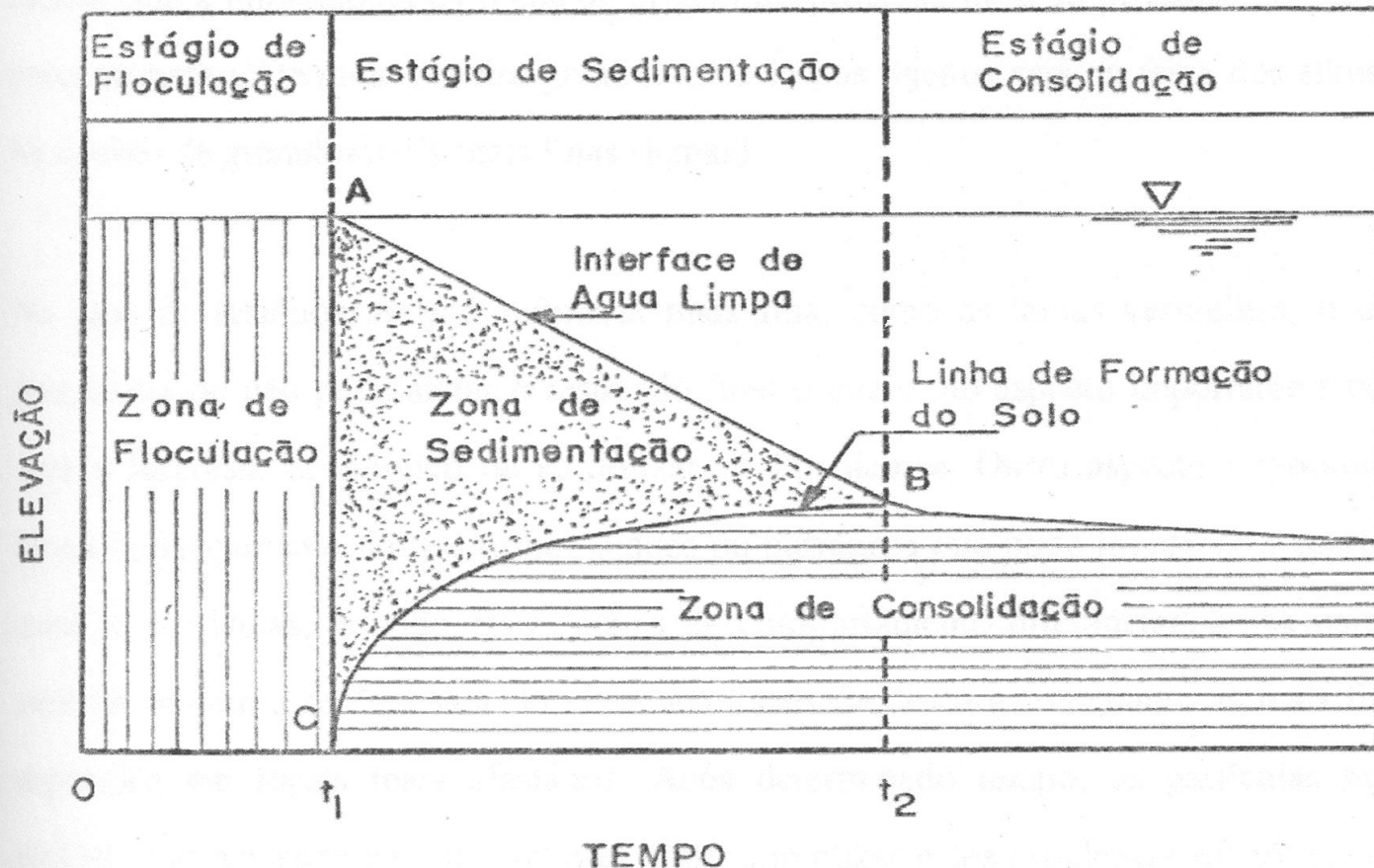
- A suspensão de rejeitos e água na qual a porcentagem de água é de aproximadamente 70% é denominada polpa.
- Quando a polpa é depositada a montante da barragem de rejeitos, ocorre segregação entre a água e as partículas sólidas.
- As partículas sólidas mais pesadas sedimentam, enquanto as coloidais se mantêm em suspensão, adensando com o tempo.
- Nos rejeitos granulares predomina a sedimentação, e nas lamas, o adensamento.

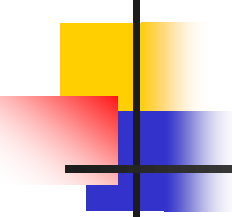


Propriedades geotécnicas dos rejeitos

- As propriedades geotécnicas da massa de rejeitos (resistência, deformabilidade e permeabilidade) dependem da natureza do minério e de como se processa a deposição.
- Fases de formação de um depósito de rejeitos lançados a montante de uma barragem de rejeitos: floculação, sedimentação e adensamento. Na floculação as partículas aumentam de tamanho, na sedimentação as partículas se depositam no fundo do reservatório sob a ação da gravidade, e no adensamento, as partículas depositadas interagem, transmitindo as tensões devidas ao peso próprio.

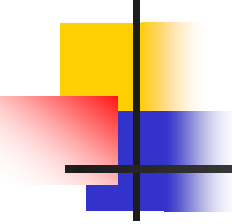
Etapas da formação de um depósito de rejeitos (modificado de Imai 1981)





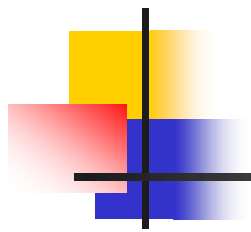
Rejeitos finos

- As propriedades geotécnicas de maior importância para o projeto de disposição dos rejeitos finos são a compressibilidade e a permeabilidade.
- Ambas se modificam consideravelmente com o tempo, devido ao adensamento dos rejeitos.
- Como no momento da disposição o teor de sólidos é baixo, durante o adensamento ocorrem deslocamentos muito elevados, a ponto de mudar significativamente o comportamento do material.
- A permeabilidade e a compressibilidade devem, portanto, ser referidas ao índice de vazios ou à tensão efetiva correspondente.



Rejeitos finos

- A teoria de adensamento de Terzaghi não é adequada aos rejeitos, por não ser aceitável a hipótese de deformações desprezíveis.
- Teorias do adensamento a grandes deformações começaram a ser desenvolvidas a partir da década de 60, com Mikasa (1963) e Gibson (1967), assim como ensaios de campo e de laboratório adequados para determinar os parâmetros derivados dessas teorias.



Compressibilidade:

$$e = A \sigma^{-B}$$

e = índice de vazios

σ = tensão efetiva

A, B = coeficientes de ajuste

Permeabilidade:

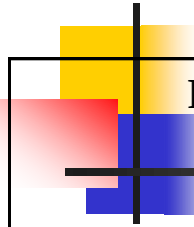
$$k = C e^D$$

k = coeficiente de permeabilidade

e = índice de vazios

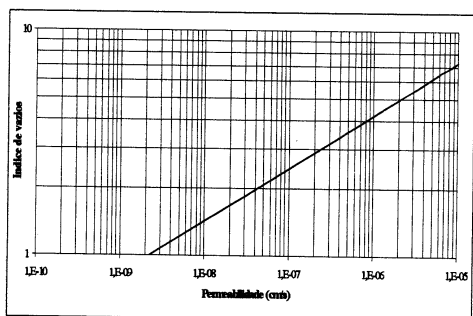
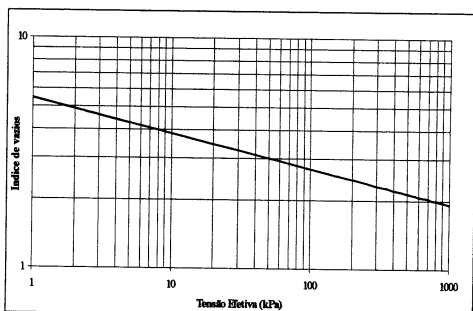
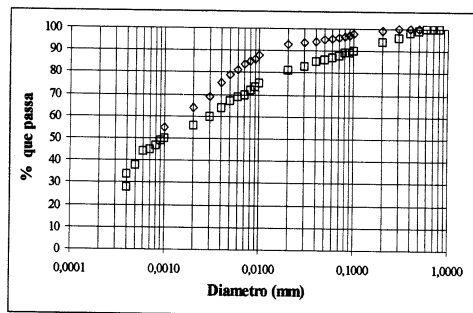
C, D = coeficientes de ajuste

Características e propriedades geotécnicas de três tipos de rejeitos finos brasileiros (Padula 2004).

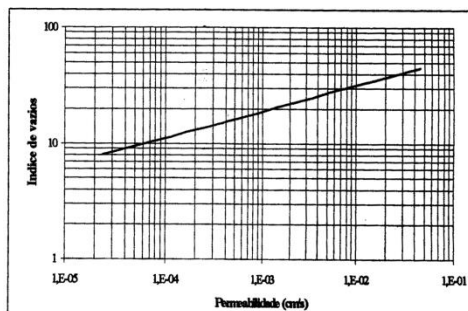
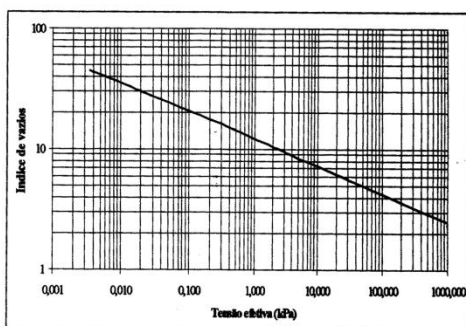
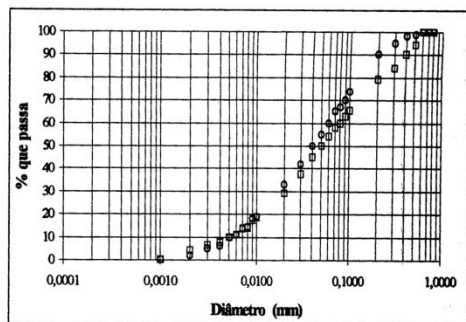


Processo produtivo		Processamento da bauxita para obtenção da alumina	Mineração de estanho	Lavra e beneficiamento para obtenção do minério de ferro
Empresa		ALCAN	*	Samarco
Limite de liquidez LL (%)		37 a 60	38 a 70	*
Limite de plasticidade LP (%)		23 a 41	14 a 38	*
Índice de plasticidade IP (%)		3 a 24	18 a 32	NP
Peso específico aparente γ (kN/m ³)		13,0 a 16,0	*	19,5 a 26,0
Teor de umidade w (%)		83 a 214	*	*
Teor de sólidos (%)		32 a 55	*	20 a 63
Peso específico dos grãos γ_s (kN/m ³)		32,0 a 36,0	26,5 a 38,5	34,0 a 39,0
Índice de vazios inicial e_i		2,3 a 7,3	*	0,6 a 5,6
Compressibilidade (kPa)	A	5,5	4,4	1,75
	B	-0,15	-0,25	-0,18
Permeabilidade (m/s)	C	$2,25 \times 10^{-11}$	$2,10 \times 10^{-11}$	$1,70 \times 10^{-8}$
	D	4,25	3,00	4,15

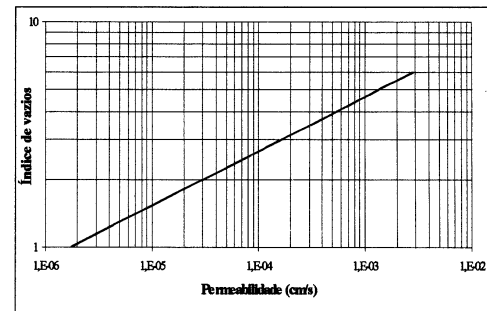
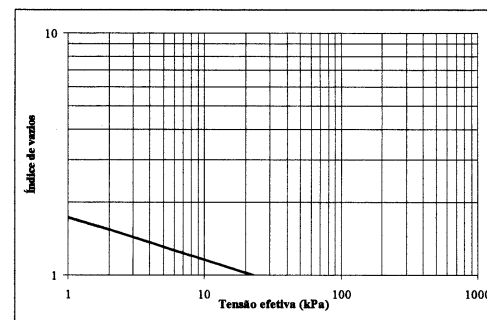
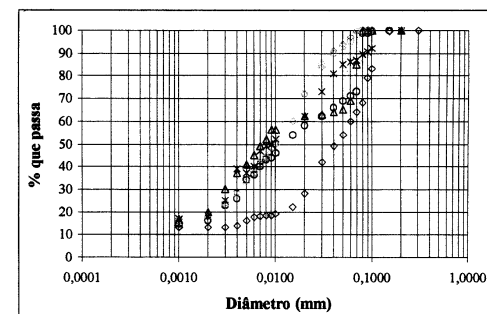
Alumina



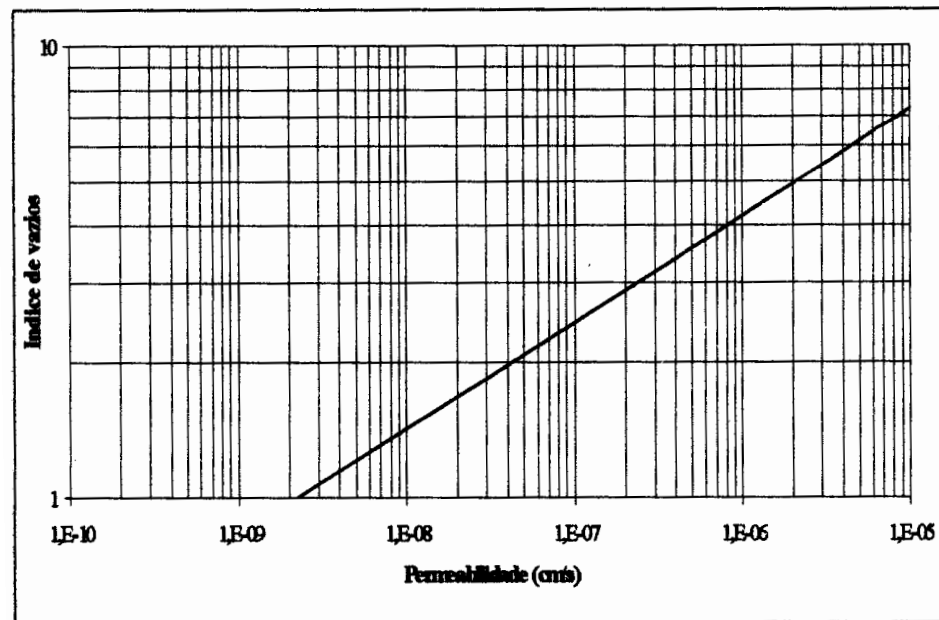
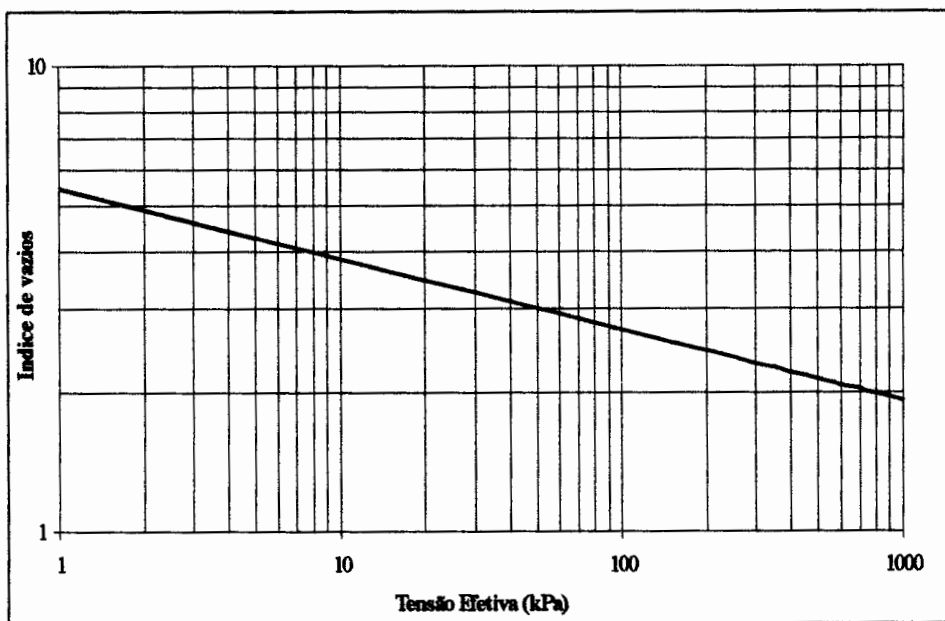
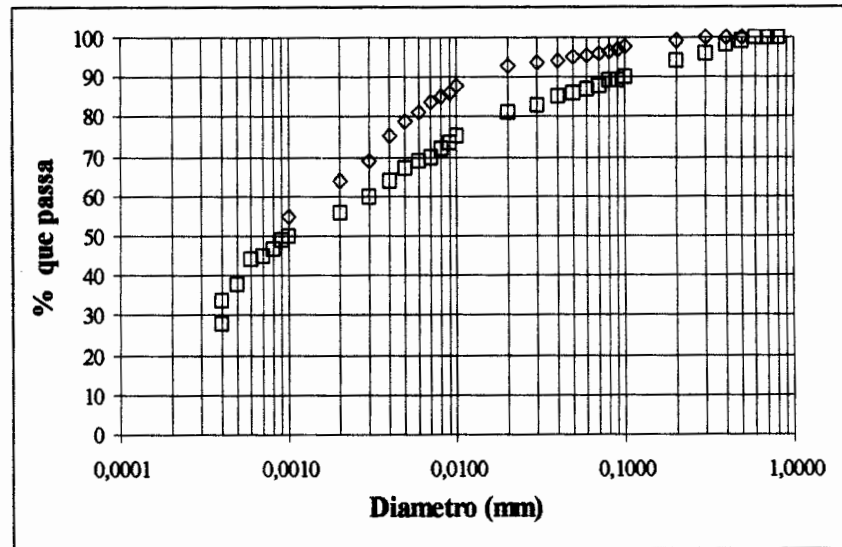
Estanho

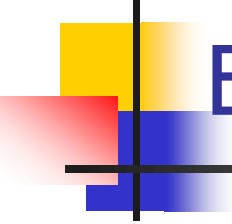


Ferro



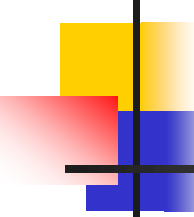
Alumina





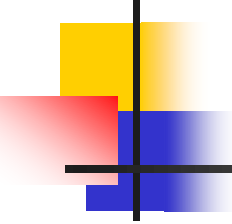
Empilhamento a seco (“dry stacking”)

- Consiste em pré-espessar os rejeitos, obtendo um material altamente viscoso, mas que pode ser bombeado.
- Ao ser descarregado na bacia de disposição, o material flui e se deposita em camadas finas, que ficam expostas à secagem ao sol.
- A secagem resulta em uma densidade mais elevada, tornando mais estável a pilha de rejeitos.
- Para espessamento dos rejeitos usam-se espessadores ou adicionam-se floculantes.



Empilhamento a seco (“dry stacking”)

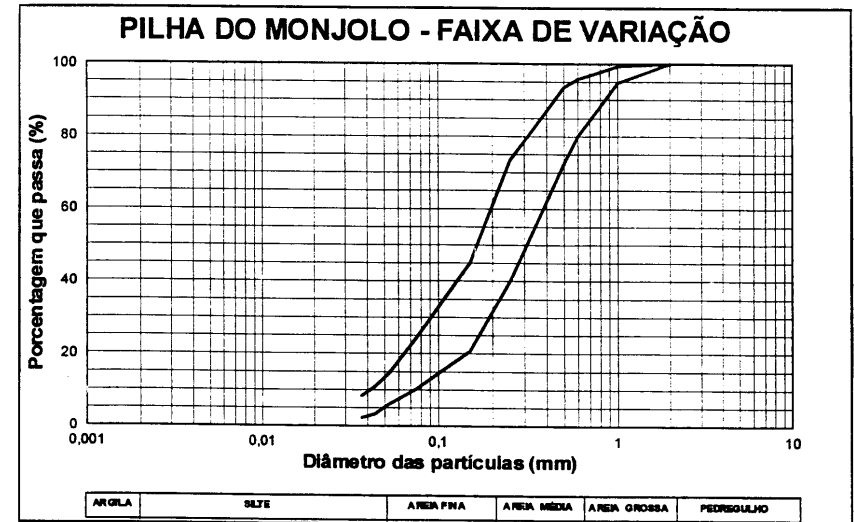
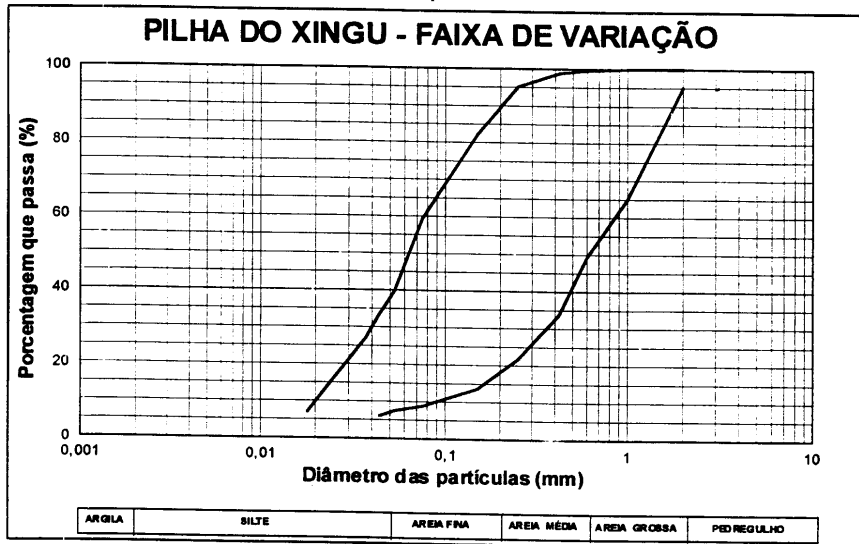
- Também é comum lançá-los em reservatórios ou tanques para que adensem sob peso próprio por algum tempo, aumentando assim o teor de sólidos antes da exposição à secagem.
- Ávila et al. (1995) relataram um aumento do teor de sólidos de 12% para acima de 50% em lamas de lavagem de bauxita com esse tratamento.
- Pode-se também lançar os rejeitos em camadas de no máximo 20 cm de espessura em áreas inclinadas, o que facilita o escoamento do excesso de líquido ao mesmo tempo em que se expõe o material à secagem.



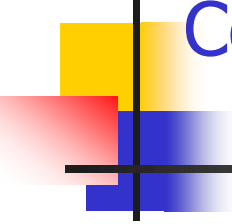
Rejeitos granulares depositados hidraulicamente

- A deposição por canhões acarreta a segregação hidráulica (partículas são selecionadas pelo peso).
- Se a densidade dos rejeitos for homogênea, quanto mais próximas dos canhões, maiores as partículas.
- Nos rejeitos de minério de ferro, 10 a 50% são formados por hematita ($\gamma = 52,5 \text{ kN/m}^3$) e o restante por quartzo (γ entre 26,5 e 27,0 kN/m^3). Nas proximidades dos pontos de lançamento há predominância de partículas de hematita de menor diâmetro, e em maiores distâncias, de partículas silicosas de maiores diâmetros.

Faixa de variação das curvas granulométricas dos rejeitos de mineração de ferro (Esposito 2000)

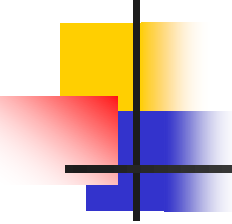


Os pesos específicos dos grãos obtidos nas pilhas foram, respectivamente, $(40,9 \pm 3,9) \text{ kN/m}^3$ e $(31,6 \pm 1,4) \text{ kN/m}^3$.



Coeficiente de permeabilidade médio dos rejeitos de mineração de ferro (Esposito 2000)

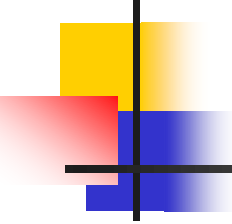
Pilha	Empírico		Medido in situ
	Fórmula de Terzaghi (1)	Fórmula de Hazen (2)	
Xingu	$6,7 \times 10^{-5} \text{ m/s}$	$2,3 \times 10^{-5} \text{ m/s}$	$6,5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$
Monjolo	$5,3 \times 10^{-5} \text{ m/s}$	$3,3 \times 10^{-5} \text{ m/s}$	$5,1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$



Fórmula de Hazen

$$k = CD_{10}^2$$

- k = coeficiente de permeabilidade em cm/s
- C = coeficiente entre 90 e 120
- D_{10} = diâmetro efetivo (10% em peso dos grãos têm diâmetro menor ou igual a esse valor)



Fórmula de Terzaghi

$$k = C_0 \left(\frac{n - 0,13}{\sqrt{1 - n}} \right) D_{10}^2 (0,7 + 0,03T)$$

- k = coeficiente de permeabilidade em cm/s
- C_0 = coeficiente que depende do tamanho das partículas (variando entre 460 para grãos angulosos e 800 para grãos arredondados)
- n = porosidade
- D_{10} = diâmetro efetivo (10% em peso dos grãos têm diâmetro menor ou igual a esse valor)
- T = temperatura

Correlações entre coeficiente de permeabilidade e porosidade e entre ângulo de atrito efetivo e porosidade para os rejeitos de mineração de ferro (Esposito 2000)

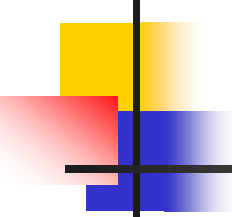
Parâmetro	Pilha	Modelo	Equação	R ²
Coeficiente de permeabilidade (x10 ⁻² m/s)	Xingu	Linear	K = 0,0003n-0,0083	98
		Exponencial	K=0,0006e ^{0,0467n}	98
	Monjolo	Linear	K = 0,0002n-0,0055	73
		Exponencial	K=0,0001e ^{0,0672}	86
Ângulo de atrito efetivo	Xingu	Linear	$\phi' = -0,3748n+56,599$ (CIS)	70
			$\phi' = -0,5065n+61,153$ (TCD)	89
		Exponencial	$\phi' = 60,859-0,0095n$ (CIS)	72
			$\phi' = 316,44-0,0136n$ (TCD)	90
	Monjolo	Linear	$\phi' = -0,4329n+53,633$ (CIS)	90
			$\phi' = -0,4947n+59,935$ (CIS)	93
		Exponencial	$\phi' = 223,79-0,012n$ (CIS)	91
			$\phi' = 316,44-0,0138n$ (TCD)	93

CIS = Ensaio de cisalhamento direto, TCD = ensaio de compressão triaxial adensado drenado









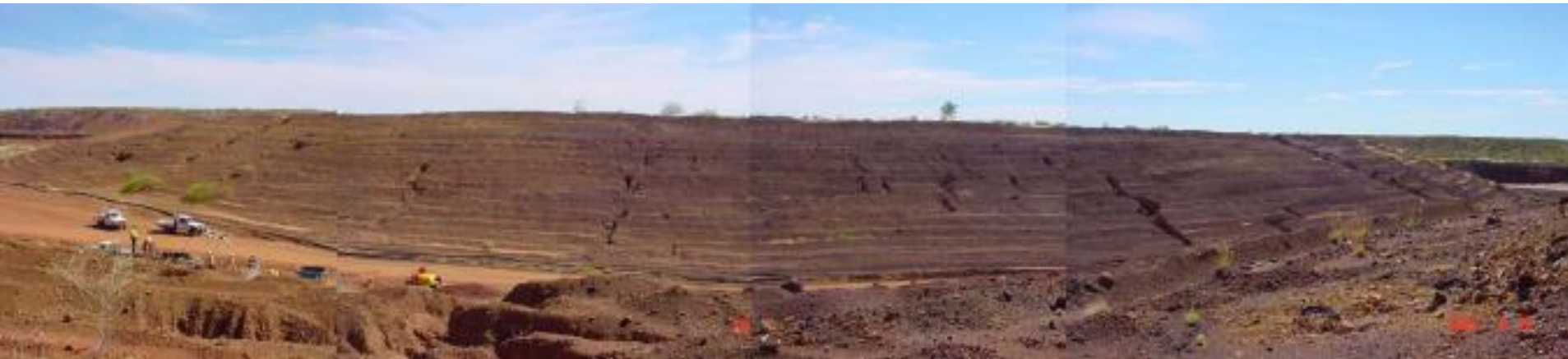
Disposição de resíduos de mineração

- Alteração da superfície topográfica e da paisagem, perda de solos superficiais, instabilização de taludes de corte ou aterro, alteração de corpos de água e níveis freáticos e exposição de áreas a erosão e assoreamento (grandes quantidades geradas).
- Esses problemas podem ser evitados ou minimizados por meio do projeto adequado (segurança estrutural e ambiental).

Pilhas de estéreis



Pilhas de estéreis

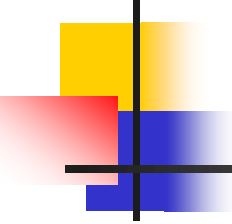


Pilhas de estéreis



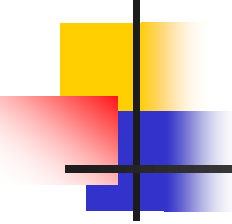






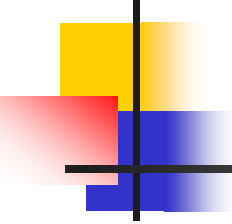
Pilhas de estéreis

- Como os estéreis são compostos basicamente de fragmentos de rochas e solos, as pilhas de estéreis, se projetadas segundo os conceitos da Geotecnia, não apresentam maiores problemas de segurança estrutural. Com um fechamento adequado e cobertura vegetal, podem ainda ser integradas à paisagem.

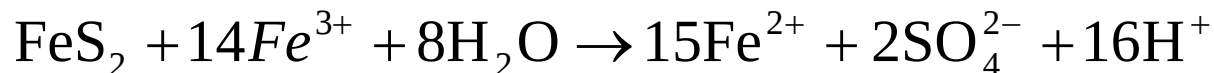
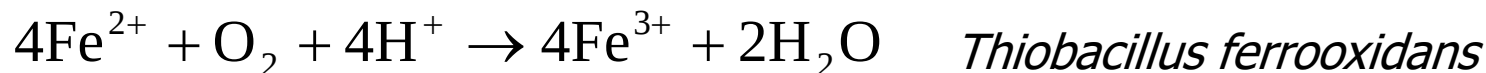
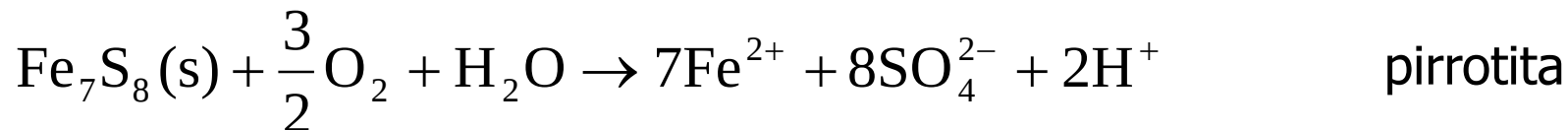
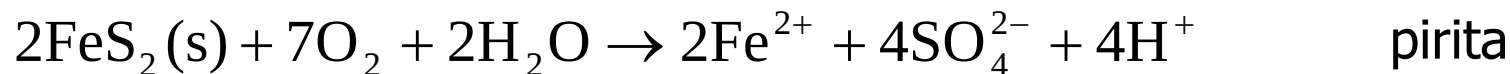


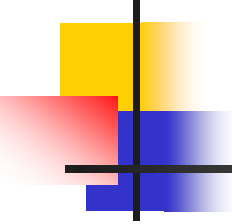
Pilhas de estéreis

- Alguns estéreis, contudo, são fontes potenciais de poluição devido à sua composição mineralógica.
- Rochas com sulfetos de ferro: formação de drenagem ácida.



Drenagem ácida





Disposição de rejeitos

- Em superfície, a céu aberto
 - Subterrânea
 - Subaquática
-
- Barragens (fechamento de vale) ou diques (em áreas planas): barragens de rejeitos

Barragens de rejeitos



Barragens de rejeitos





CORTESIA:



(a)

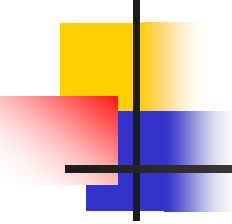


(b)

Figura 3.8 – Disposição da lama vermelha: a) no momento de lançamento. b) após um certo tempo de exposição ao sol.

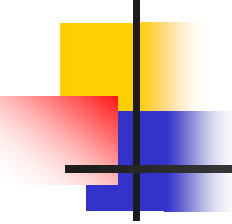
(Braga, 2009)





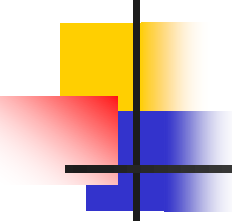
Peculiaridades das barragens de rejeito

- o material contido é uma suspensão de grãos minerais em grande quantidade de água ou uma pasta com elevado teor de umidade (elevado adensamento ao longo de tempo); as barragens de rejeitos retêm materiais semi-sólidos a sólidos.
- é generalizada a prática de alteamento ao longo do tempo; constrói-se inicialmente um dique de partida e, à medida que a empresa mineradora obtém lucros e resíduos são acumulados, a altura da barragem vai sendo aumentada.



Vida útil de uma barragem de rejeitos

- seleção do local
- projeto da instalação
- construção
- operação
- e fechamento definitivo (com plano de reabilitação).



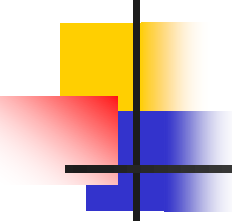
Vida útil de uma barragem de rejeitos

- seleção do local
- projeto da instalação
- construção
- operação
- e fechamento definitivo (com plano de reabilitação).

Etapas fortemente relacionadas quando a barragem é construída por alteamentos sucessivos.



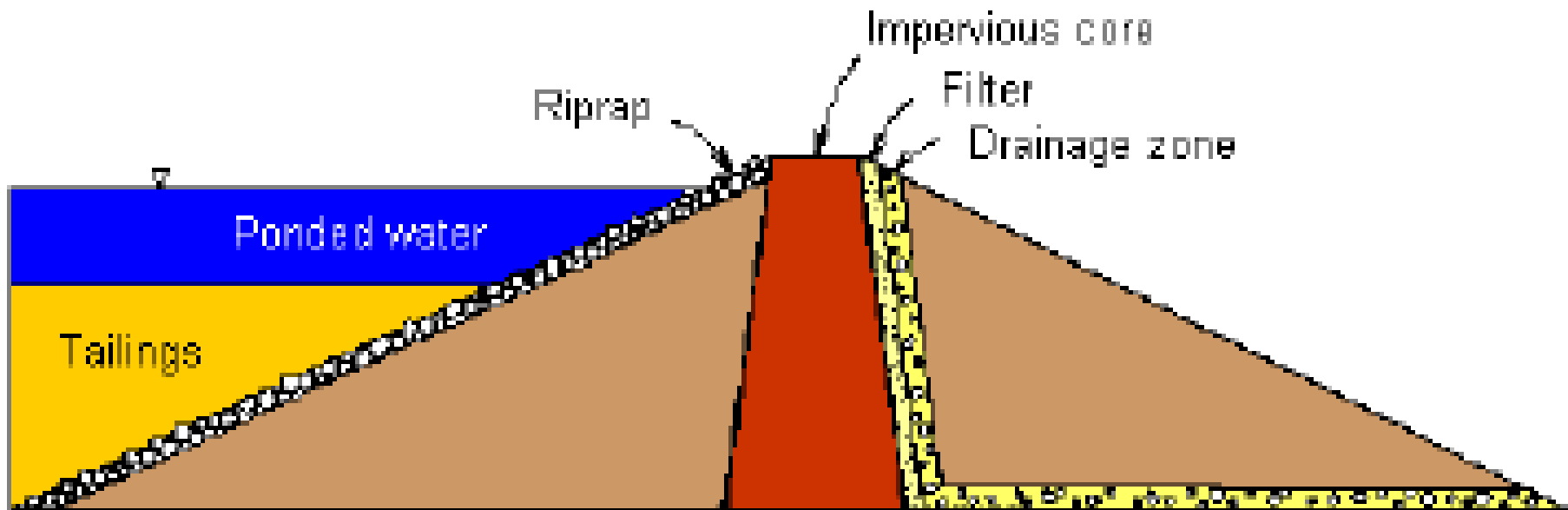




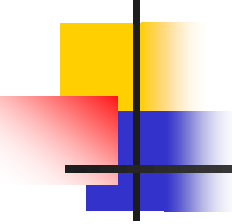
Materiais de construção

- As barragens de rejeitos podem ser construídas com materiais de empréstimo ou com resíduos das atividades mineradoras.
- Levanta-se inicialmente um dique de partida com solo de empréstimo.
- Os estágios posteriores (alteamentos) podem ser construídos com material de empréstimo, com estéreis, por deposição hidráulica de rejeitos ou por ciclonagem dos mesmos rejeitos.

Barragem de rejeitos com material de empréstimo

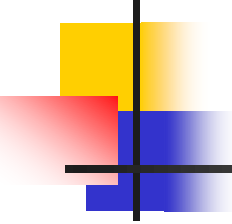


after Webb (1997)



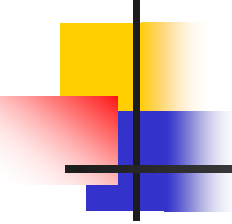
Barragem de rejeitos com estéreis

- A utilização de estéreis visa substituir o material granular de maiores dimensões geralmente empregado em barragens tradicionais.
- Estéreis: resíduos provenientes de escavação e explosão das camadas minerais sobrejacentes ao minério de interesse (solos e fragmentos de rochas).
- Projeto e construção de aterros compactados de solos e rochas, convencional do ponto de vista da Geotecnia.



Deposição hidráulica ou por ciclonagem de rejeitos

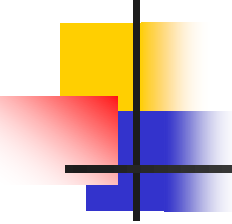
- Conceitos de aterros hidráulicos.
- O ciclone separa granulometricamente, por efeito da força centrífuga, partículas com diferentes densidades e tamanhos.
- O meio fluido é submetido a um enérgico movimento de rotação ao ser injetado no ciclone sob forte pressão.



Deposição hidráulica ou por ciclonagem de rejeitos

A polpa de rejeitos é separada em:

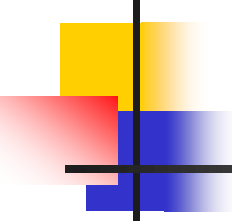
- “overflow”, composto de partículas mais finas e menos densas que saem pela parte superior do ciclone.
- “underflow”, de partículas mais grossas e mais densas que saem pela parte inferior do ciclone (material de construção dos alteamentos).



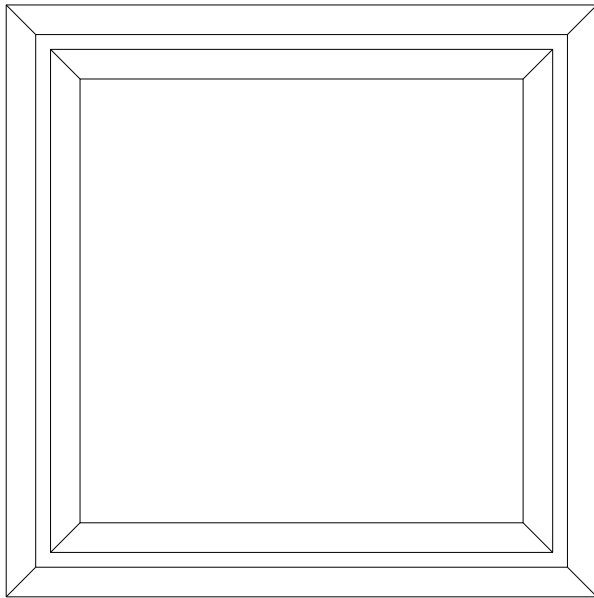
Represamento

Depende da topografia local

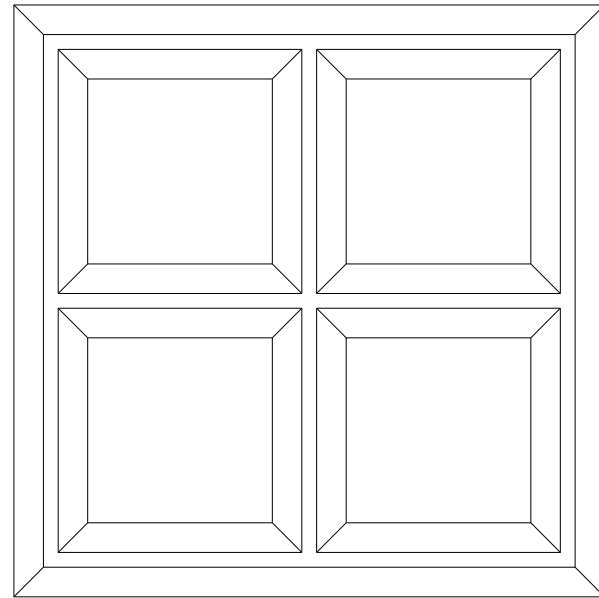
- Anel
- Bacia
- Meia encosta
- Vale



Represamento em anel



(a)

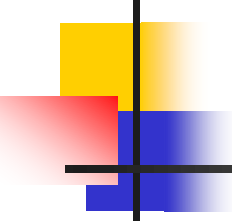


(b)

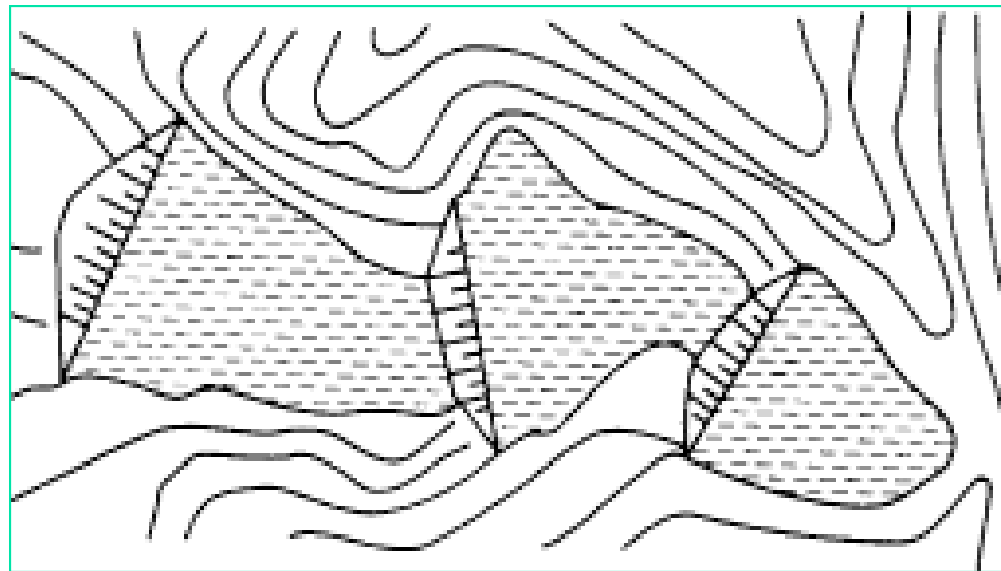
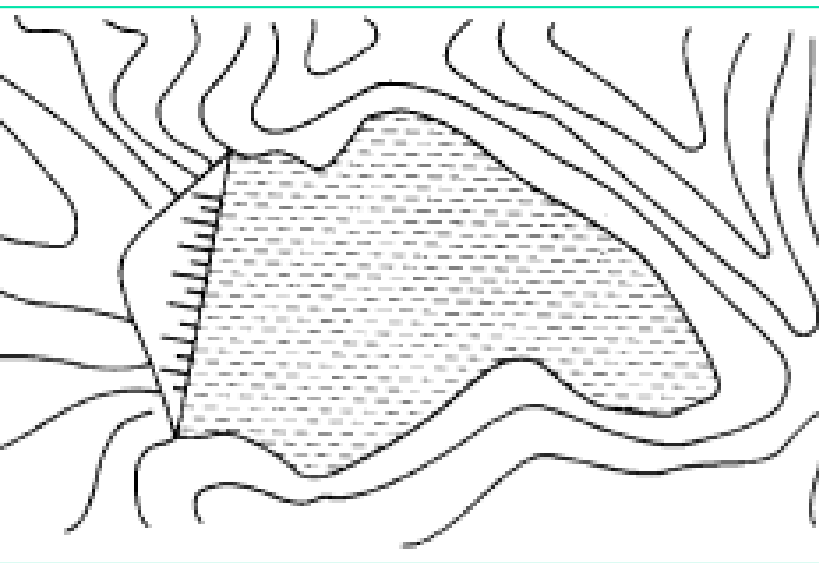
Represamento em anel



Figure 2.

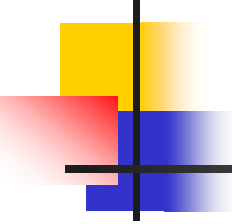


Represamento em bacia



Represamento em bacia

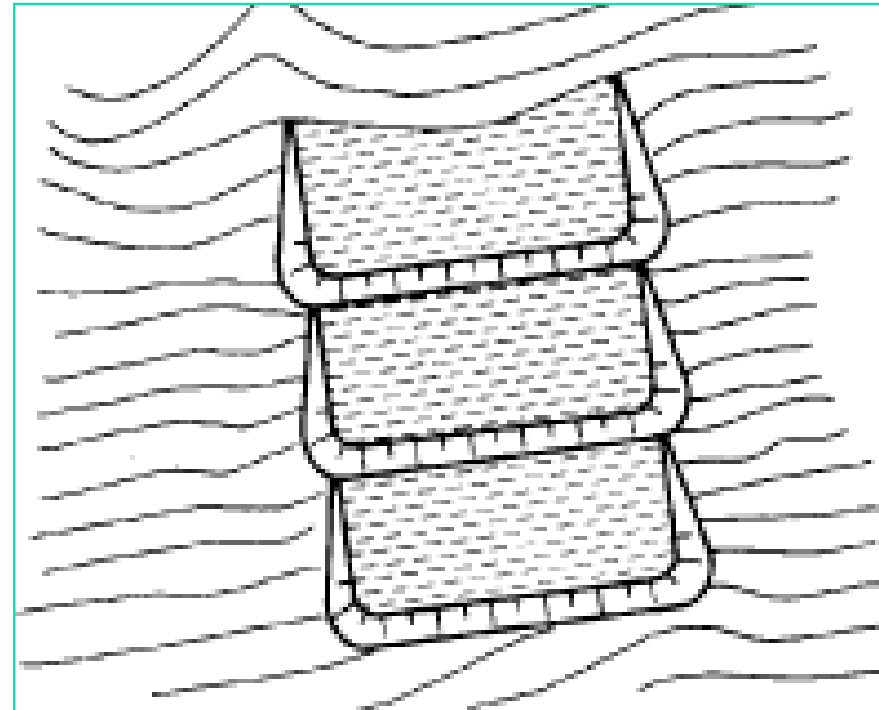
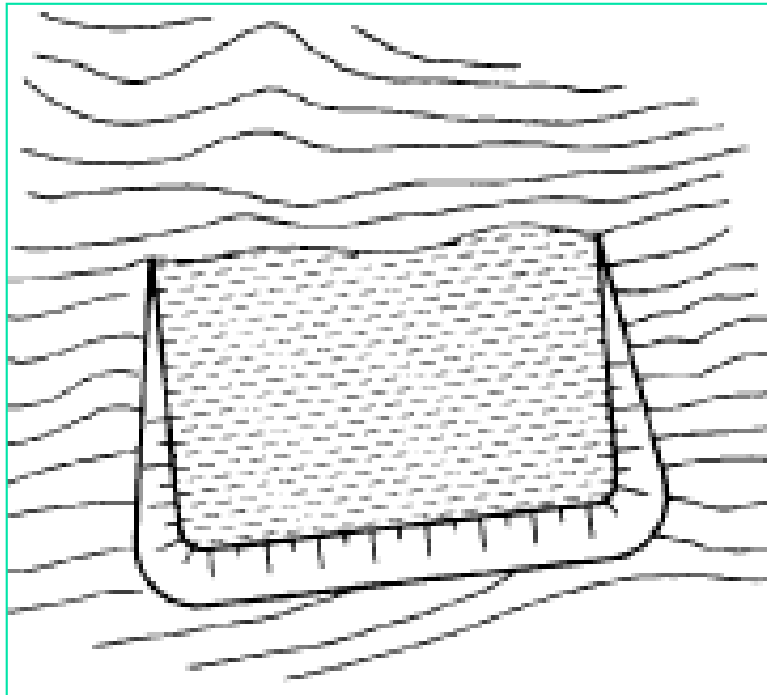


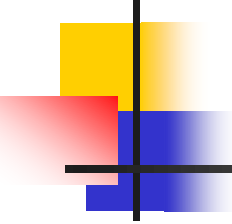


Represamento a meia encosta

- Quando não há drenagem natural na zona de deposição dos rejeitos e os taludes mais íngremes da encosta têm inclinação menor do que 10%.

Represamento a meia encosta





Represamento em vale

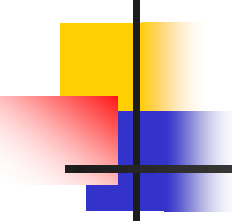
- Combinação do represamento em bacia e a meia encosta.
- Vales muito largos, quando existem nas margens áreas adequadas para a construção da barragem que não interferem com a drenagem natural.
- Obras de proteção no pé da barragem, já que as cheias do rio podem causar erosão e afetar a estabilidade da obra.

Represamento em vale



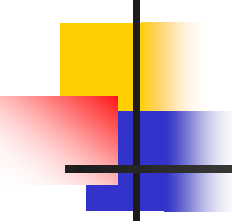






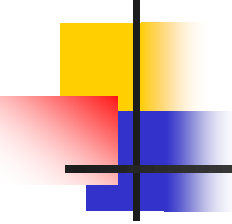
Aterro hidráulico

- As barragens construídas com rejeitos se comportam como aterros hidráulicos, ou seja, aterros construídos por transporte e deposição de solo em meio aquoso.



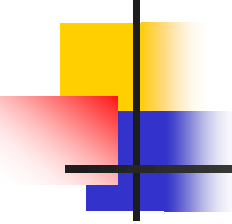
Aterro hidráulico

- As propriedades do aterro hidráulico dependem do método de deposição e da composição da polpa.
- Composição da polpa: tipo de fluido de transporte, porcentagem de sólidos, distribuição granulométrica, geometria e densidade dos grãos.



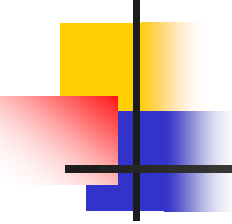
Segregação na deposição

- A composição define o comportamento de segregação da polpa na deposição.
- Polpas que não permitem segregação hidráulica produzem praias mais íngremes com características granulométricas constantes e baixas densidades.
- Depósitos de polpas que segregam são mais planos, apresentando praias mais densas com distribuição granulométrica média variando com a distância do ponto de descarga.



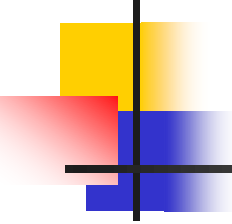
Método de deposição

- Espaçamento, posição e número dos canhões,
- Velocidade de descarga
- e outros detalhes construtivos.



Segregação hidráulica

- É mais acentuada para altas vazões, baixas concentrações da polpa e baixas velocidades de fluxo.
- Devido à segregação, ocorre uma zona de alta permeabilidade perto do ponto de descarga, uma zona de permeabilidade baixa distante do ponto de lançamento e uma zona de permeabilidade intermediária entre as anteriores.



Construção

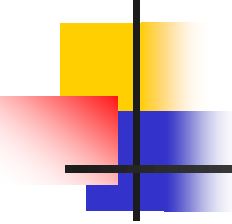
- Dique de partida de material de empréstimo (capacidade de retenção de rejeitos para 2 ou 3 anos de operações da lavra).
- A polpa é descarregada ao longo do perímetro da crista do dique, formando uma praia.
- Descarga feita com ciclones ou com uma seqüência de tubulações menores perpendiculares à tubulação principal, chamados “spigots”, que permitem uma melhor uniformidade na formação da praia.

Descarga de rejeitos



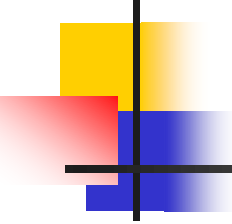
"Spigots"





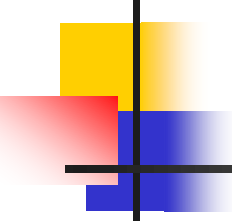
Construção

- Nas etapas posteriores, são construídos diques em todo o perímetro da bacia. O tamanho dos diques nos alteamentos é uma variável que depende das necessidades operacionais da mina.
- O dique inicial geralmente é sempre maior que os diques das etapas seguintes.



Construção

- Como os rejeitos têm uma distribuição granulométrica ampla, as partículas mais grossas e mais pesadas sedimentam mais rapidamente, ficando nas zonas perto do dique, e as partículas menores e menos densas ficam em suspensão e são transportadas para as zonas internas da bacia de sedimentação.

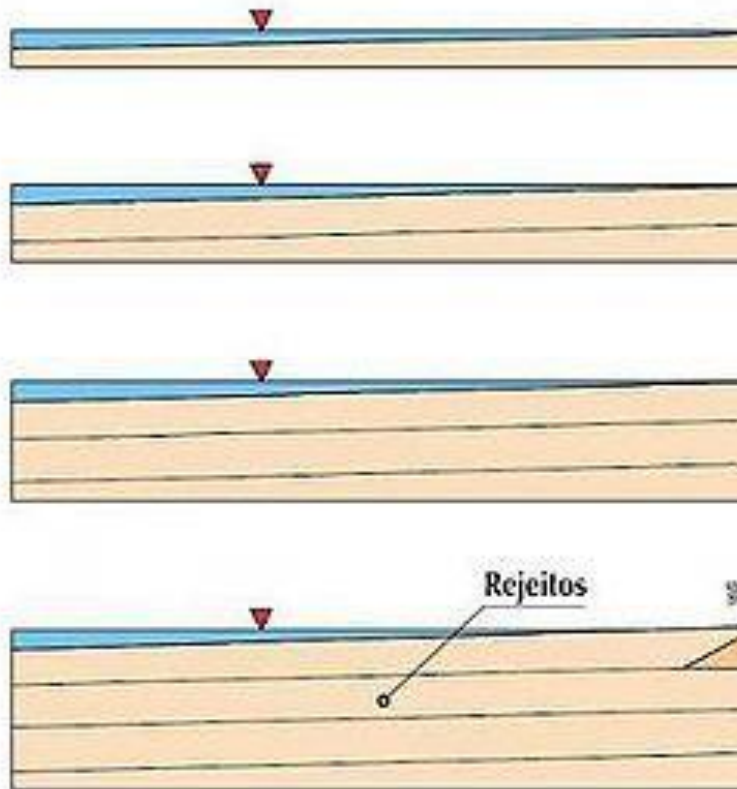


Métodos construtivos para alteamentos sucessivos

- método de montante
- método da jusante
- método da linha de centro

direção em que os alteamentos são feitos em relação
ao dique inicial

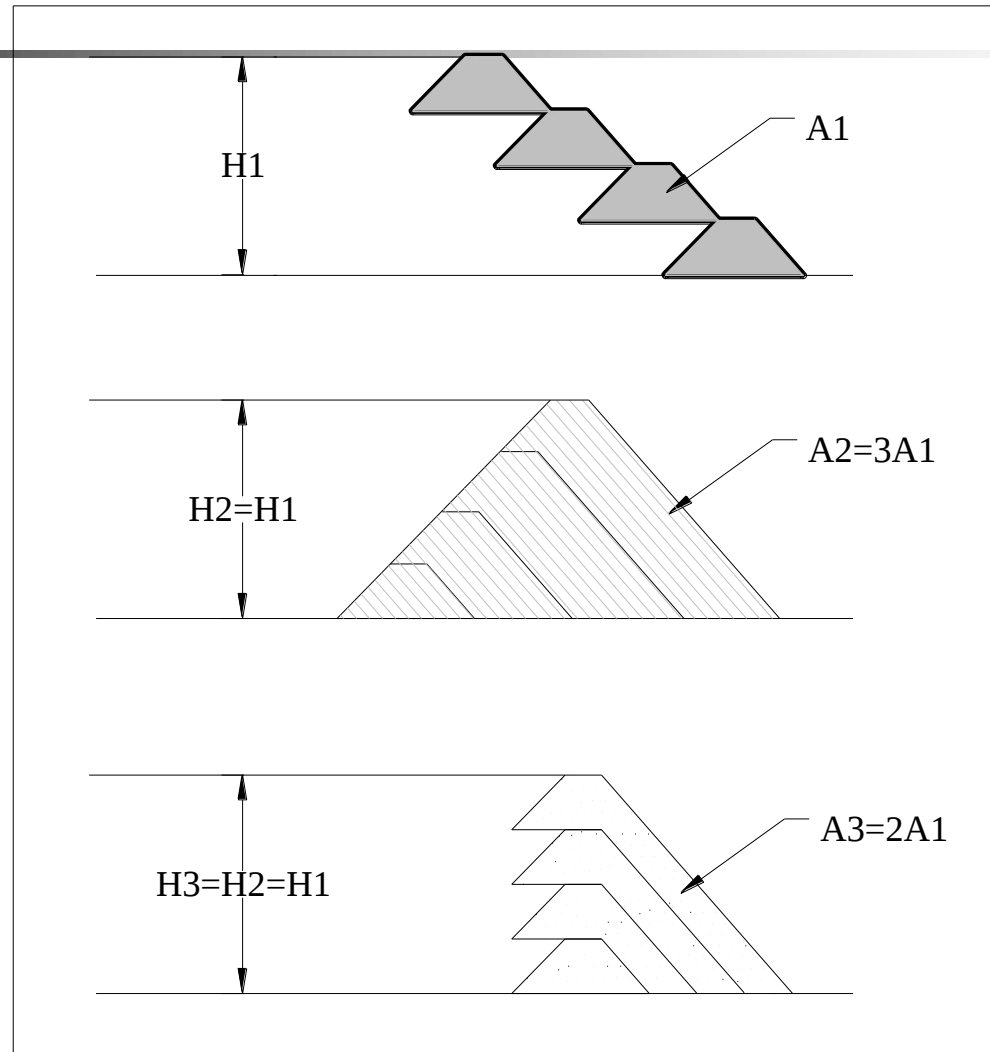
"Spigots"





BARRAGENS DE REJEITOS

COMPARAÇÃO DE VOLUMES



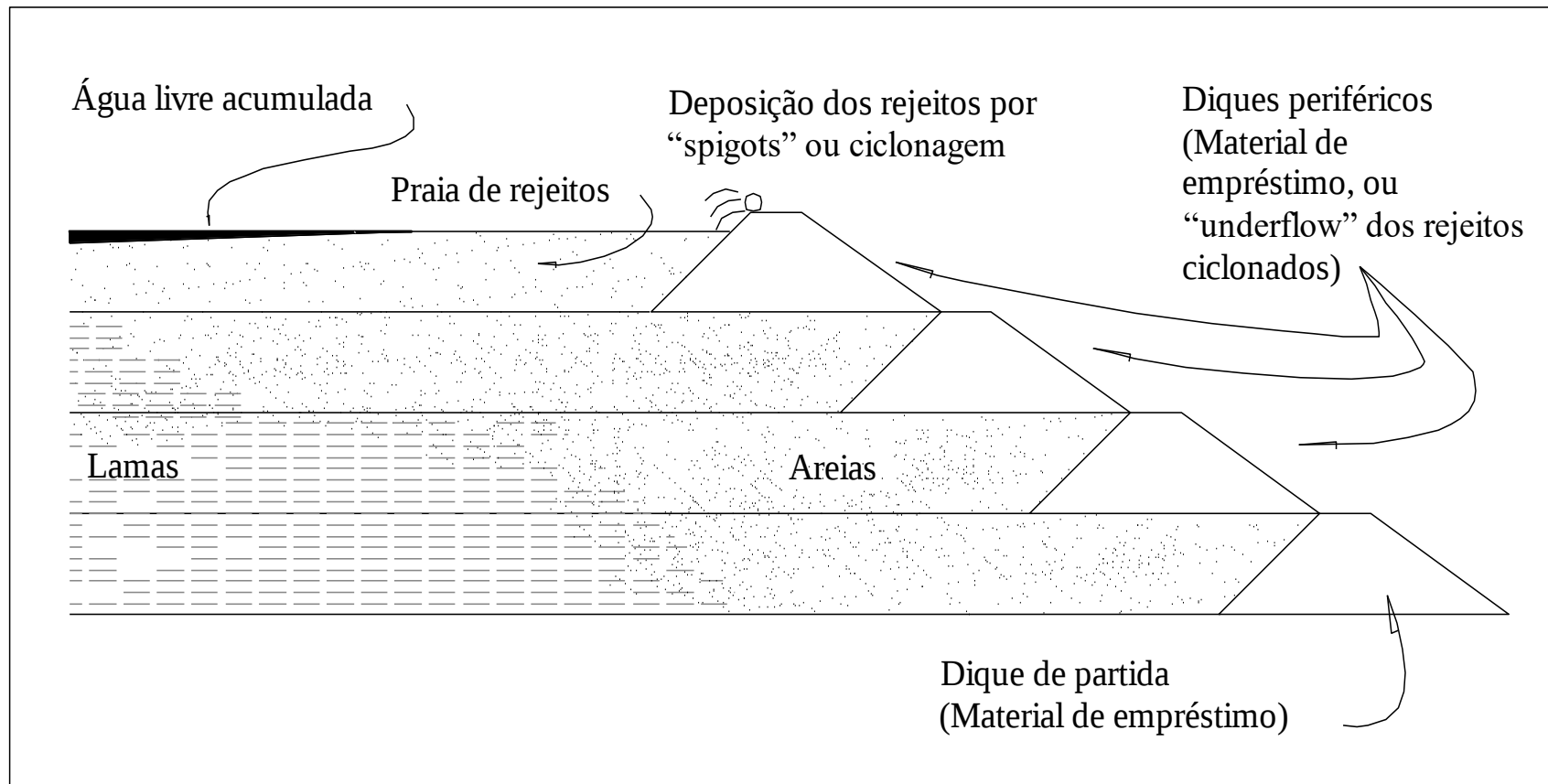
**MÉTODO DE
MONTANTE**

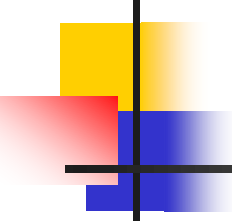
**MÉTODO DE
JUSANTE**

**MÉTODO DA
LINHA DE
CENTRO**



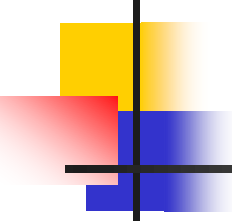
Método de montante





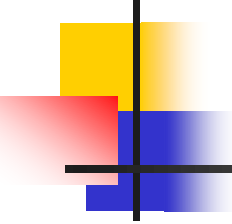
Vantagens do método do montante

- Menor volume de material necessário.
- Custo da construção é menor.
- Pode ser construída em topografias acidentadas com terrenos íngremes, pois o crescimento da mesma se dá sobre o material depositado no reservatório, não demandando mais área a jusante.
- Este método é interessante onde o limitante principal é a área de deposição.



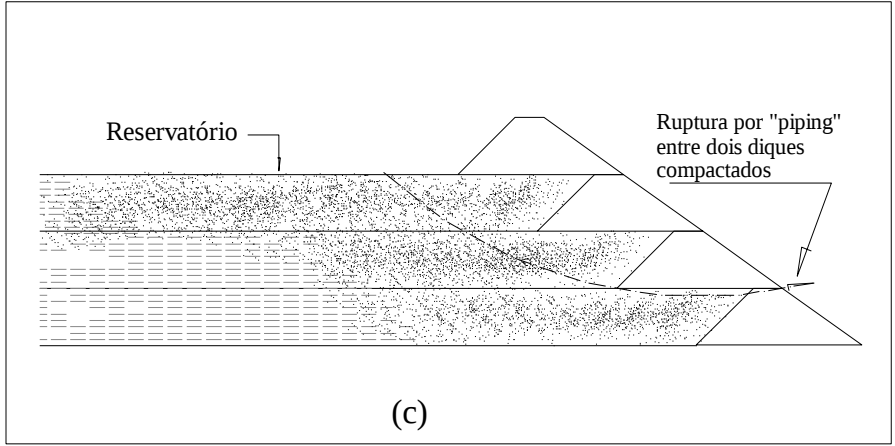
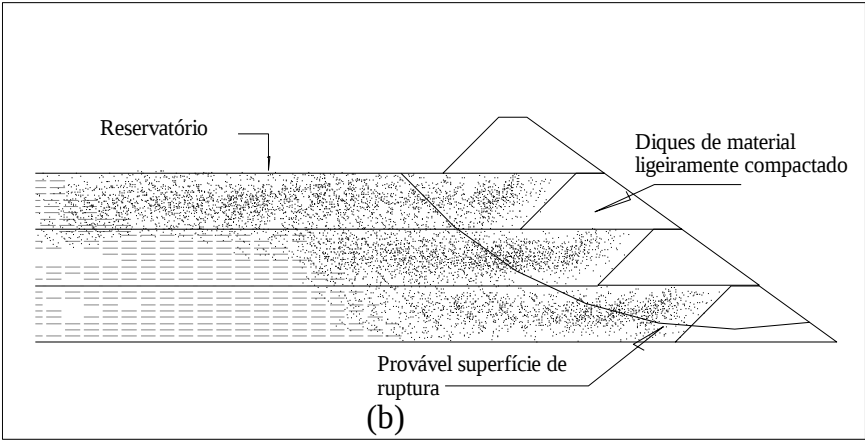
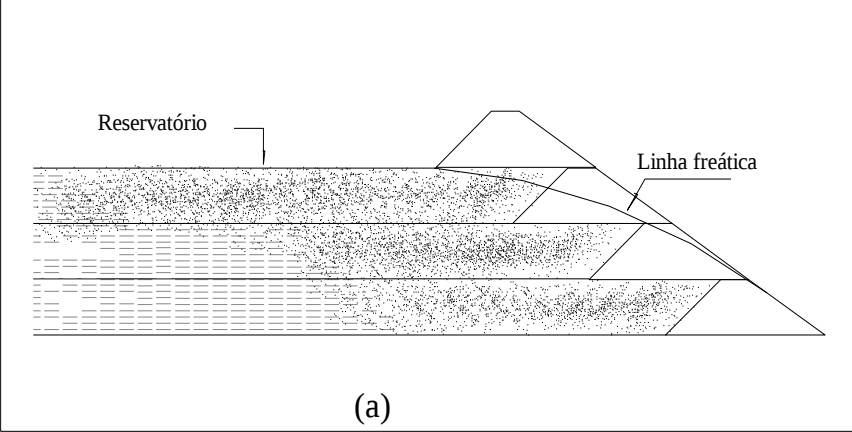
Desvantagens do método do montante

- Capacidade de armazenamento do reservatório vai-se reduzindo com os sucessivos alteamentos.
- Segurança:
 - a fundação dos alteamentos é a praia de rejeitos (material heterogêneo e com elevado índice de vazios).
 - linha freática pode ficar muito próxima ao talude da jusante

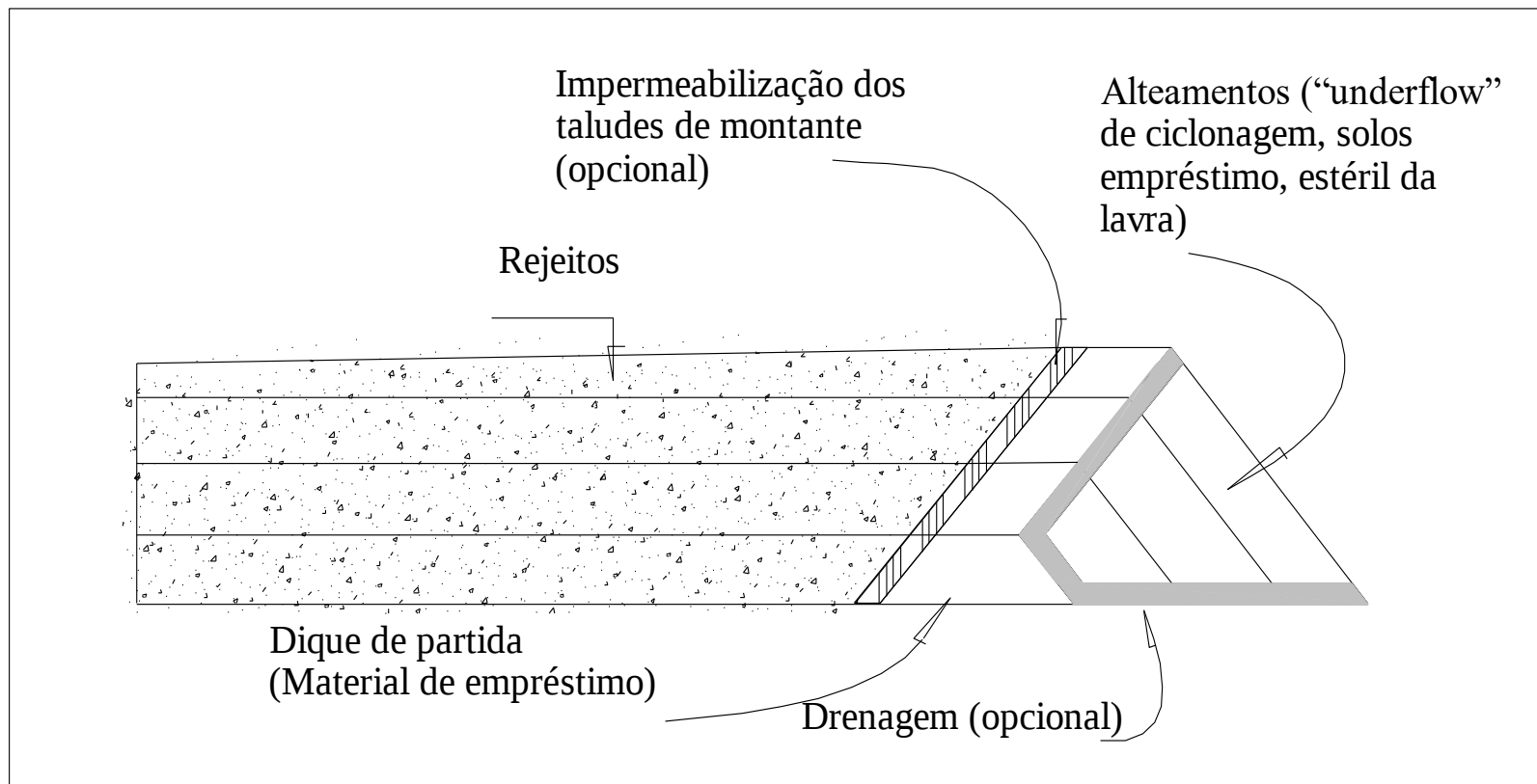


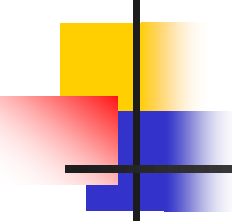
Desvantagens do método do montante

- fundação constituída de areias saturadas fofas, com grande susceptibilidade à liquefação por sismos naturais ou vibrações decorrentes do movimento de equipamentos.
- a superfície crítica de deslizamento passa pelos rejeitos sedimentados.
- existe a possibilidade de ocorrência de “piping” (linha freática muito próxima do talude da jusante, rejeitos fofos ou concentração de fluxo entre dois diques compactados).



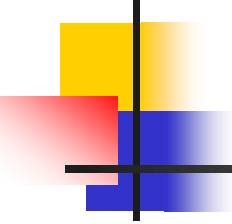
Método de jusante





Vantagens

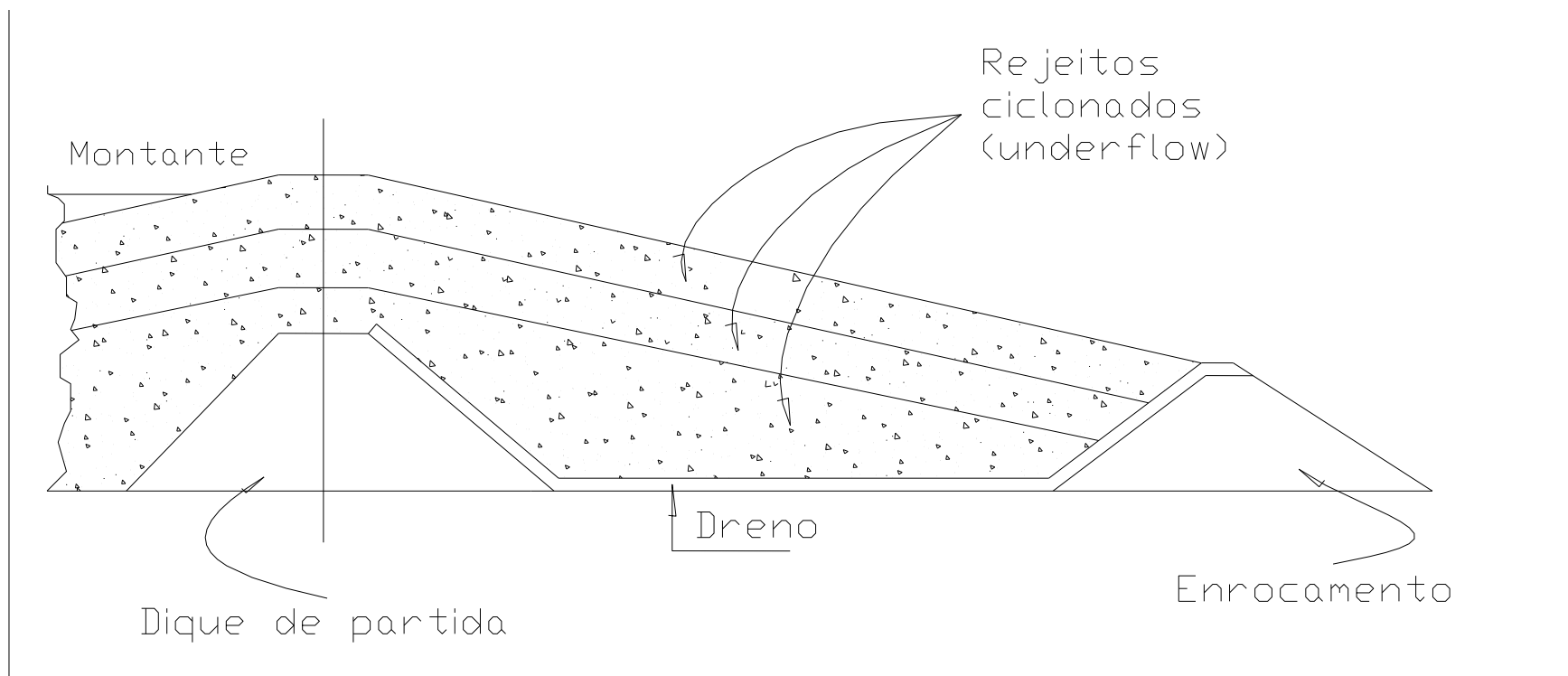
- Controle da linha freática devido ao sistema de drenagem
- Possibilita a compactação do corpo da barragem
- Menor probabilidade de piping e liquefação



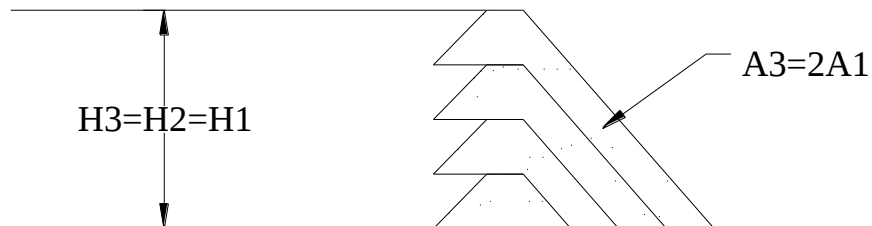
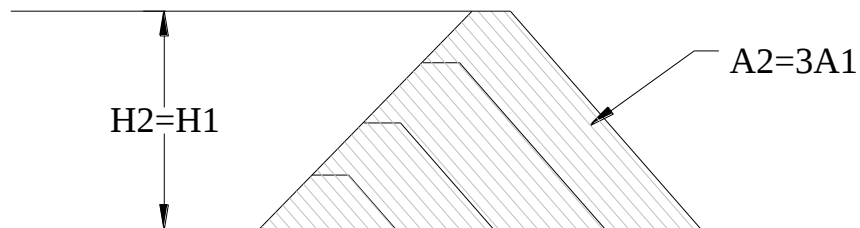
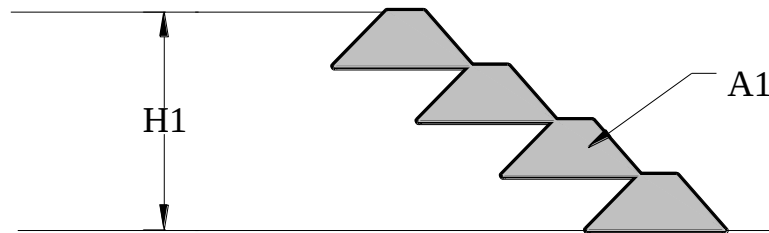
Desvantagens

- Grandes quantidades de rejeitos
- Complexidade do dique de partida e do sistema de drenagem
- Não possibilita a proteção com cobertura vegetal do talude de jusante
- Não possibilita a construção de drenagem superficial durante a fase construtiva

Método da linha de centro



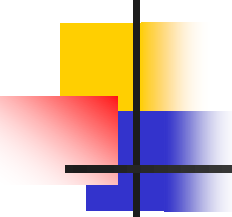
Comparação de volumes



	Convencional	Montante	Jusante	Linha de centro
Tipo de rejeito recomendado	Qualquer tipo	Mais de 40% de areia, baixa densidade de polpa para promover segregação	Qualquer tipo	Areias ou lamas de baixa plasticidade
Requerimentos de descarga dos rejeitos	Qualquer procedimento de descarga	Descarga periférica, e bom controle de água livre acumulada	De acordo com o projeto	Descarga periférica, conservando o eixo da barragem
Armazenamento d'água	Boa	Não recomendado para grandes volumes	Boa	Não recomendado para armazenamento permanente
Resistência sísmica	Boa	Fraca em áreas de alta sismicidade	Boa	Aceitável
Restrições de alteamento	De uma só vez, ou em poucas etapas	Recomendável menos de 10 m/ano, perigoso mais alto que 15 m/ano	Nenhuma	Pouca
Requisitos de alteamento	Materiais naturais e/ou estéril	Solo natural Rejeitos ou estéril	Rejeitos ou estéril	Rejeitos ou estéril
Custo relativo do corpo do aterro	Alto (3 V_m *)	Baixo V_m	Alto (3 V_m)	Moderado (2 V_m)

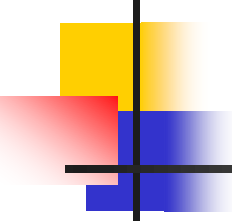
V_m = volume da barragem alteada pelo método de montante

	Método de montante	Método de jusante	Método da linha de centro
Método construtivo	Método mais antigo e o mais empregado. Construção de dique inicial e os diques do alteamento periféricos com material de empréstimo, estéreis da lavra ou com “underflow” de ciclonagem. Lançamento a partir da crista por ciclonagem ou “spigots”.	Construção de dique inicial impermeável. Separação dos rejeitos na crista do dique por meio de hidrociclones. Dreno interno e impermeabilização a montante.	Variação do método de jusante.
Vantagens	Menor custo. Maior velocidade de alteamento. Utilizado em lugares onde há limitante de área.	Maior segurança. Compactação de todo o corpo da barragem. Pode-se misturar os estéreis da lavra.	Variação do volume de “underflow” necessário com relação ao método da jusante.
Desvantagens	Baixa segurança devido à linha freática próxima ao talude de jusante, susceptibilidade de liquefação, possibilidade de “piping”.	Necessidade de grandes quantidades de “underflow” (problemas nas 1^{as} etapas). Deslocamento do talude de jusante (proteção superficial só no final da construção).	Necessidade de sistemas de drenagem eficientes e sistemas de contenção a jusante



Projeto geotécnico

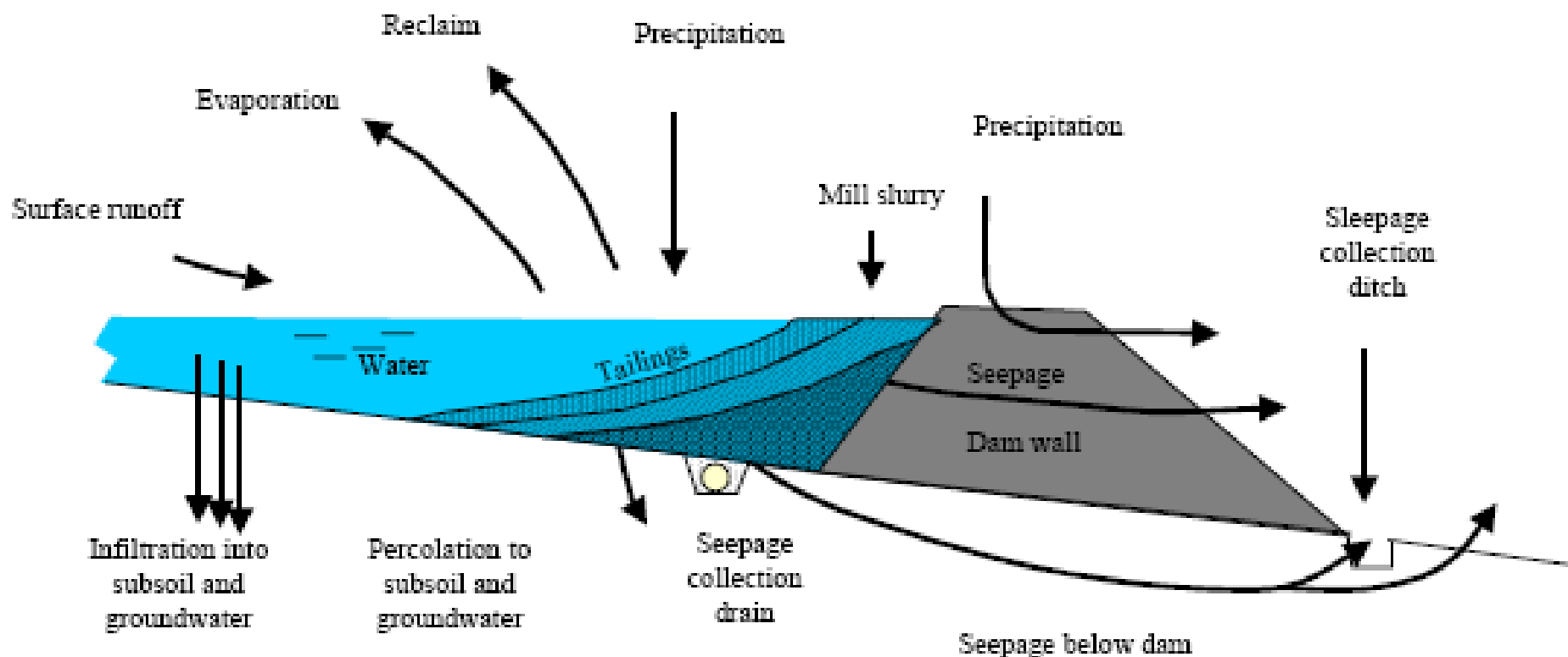
- A barragem de rejeitos é projetada conceitualmente da mesma forma que uma barragem de terra convencional, englobando a capacidade de carga da fundação, a estabilidade dos taludes, as perdas de água pela fundação e pelo maciço, os elementos de drenagem interna e superficial, a proteção dos taludes contra a erosão e a instrumentação.



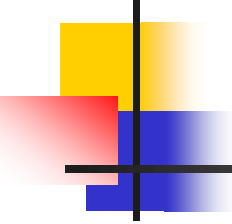
Projeto geotécnico

- O reservatório é projetado, a exemplo dos aterros de resíduos, com tratamento da fundação, revestimento impermeabilizante de fundo, sistema de coleta e tratamento e/ou reutilização de percolados, disposição controlada dos rejeitos, proteção contra escape de material particulado, entre outros.

Balanco hídrico

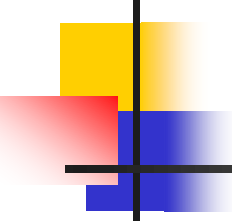


água da polpa, escoamento superficial, precipitação, infiltração a partir do lago, evaporação, água liberada dos rejeitos durante o adensamento e coleta pelos drenos, água utilizada no processo produtivo, infiltração no subsolo e percolação através da barragem



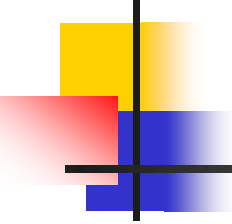
Parâmetros de projeto

- capacidade de carga e permeabilidade da fundação; resistência ao cisalhamento, permeabilidade e parâmetro de pressão neutra do material de construção da barragem; funções de compressibilidade e permeabilidade dos rejeitos; velocidade de descarga dos rejeitos, teor de sólidos no lançamento; clima, entre outros.



Planejamento

- Análises de estabilidade, previsão de recalques, estudo da percolação, controle de erosão, estudo de impactos ambientais e de recuperação ambiental.
- Na etapa de construção, a instrumentação de campo é importante para assegurar que a obra cumpra as especificações de projeto.



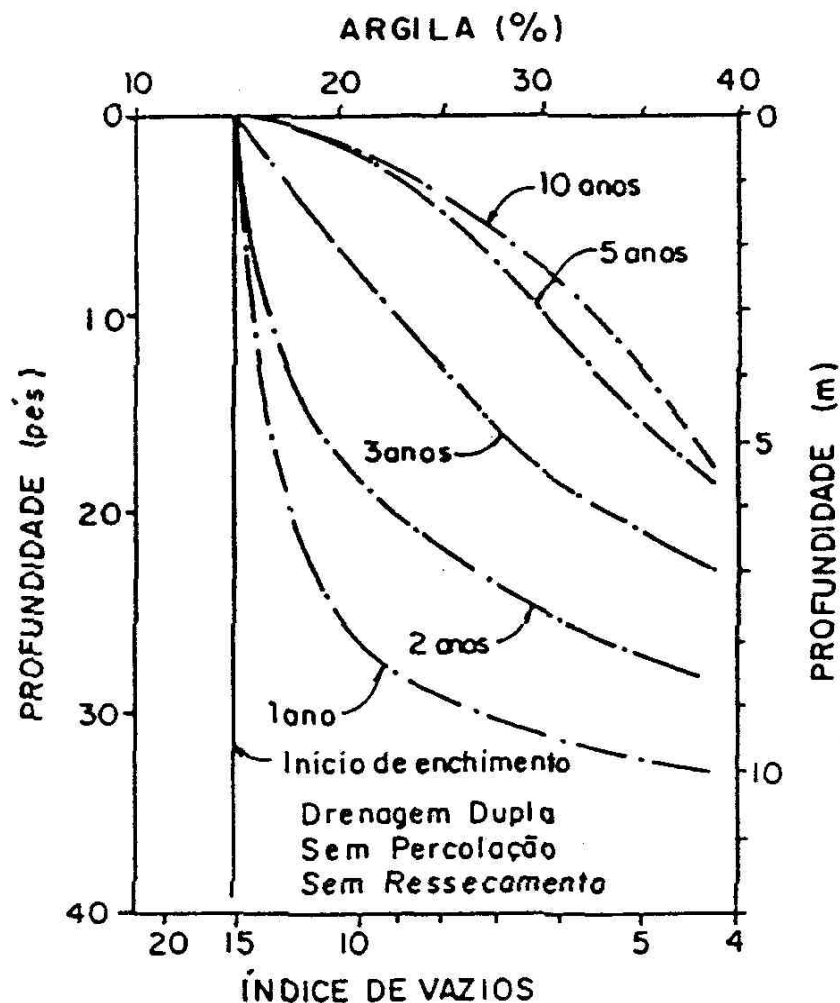
Vida útil

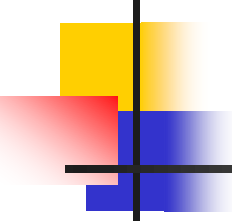
- A previsão baseia-se no plano de lavra, no sistema de beneficiamento e no comportamento geomecânico dos rejeitos.
- Plano de lavra: geometria final e seu desenvolvimento no tempo
- Compatibilização do ritmo de produção e lançamento com as propriedades geomecânicas dos rejeitos (compressibilidade): velocidade de abertura de novas áreas de estocagem ou dos alteamentos da barragem

- Programas computacionais são utilizados para estimar vida útil, cotas intermediárias e finais, vazão de água liberada pelos rejeitos (a qual pode ser reaproveitada no processo produtivo ou descartada) e eficiência de medidas alternativas (como a construção de drenos adicionais).
- Permitem também simular lançamento contínuo, interrupções esporádicas, alternância de períodos de deposição, abandono de reservatório, capeamento com material estéril e considerações de drenagem de fundo (De Mello 2006).

- Esses programas utilizam teorias de adensamento a grandes deformações, e a compressibilidade e permeabilidade são apresentadas como funções.
- As teorias de adensamento a grandes deformações resultam em previsões mais realistas da vida útil do reservatório, da água a ser liberada durante o processo do adensamento e o ganho de resistência ao cisalhamento correspondente.

Estimativa de adensamento de um depósito de rejeitos

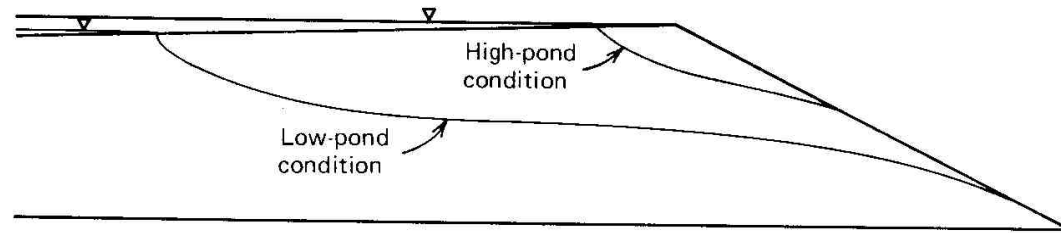




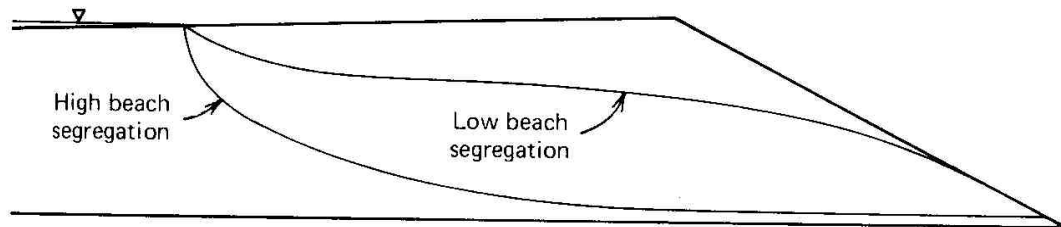
Modos de ruptura

- Análise de estabilidade pelo método do equilíbrio limite, por meio de programas computacionais usuais da Geotecnia.
- Fatores que afetam a estabilidade dos taludes: altura, declividade, propriedades dos solos do maciço e fundação, pressões neutras e forças externas.

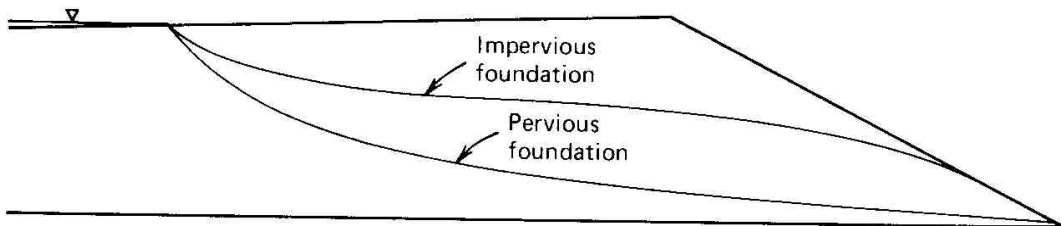
Estimativa de pressões neutras



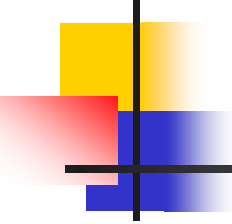
(a)



(b)

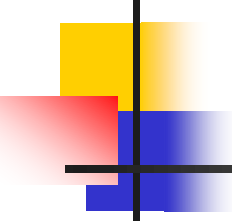


(c)



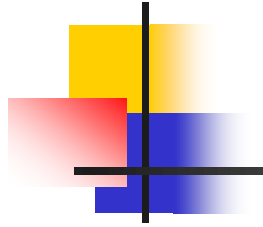
Modos de ruptura

- capacidade de suporte da fundação insuficiente
- liquefação durante sismo: na fundação de barragens alteadas para montante ou no próprio corpo da barragem construída com rejeitos, devido à conjugação de material granular muito poroso e saturado com vibrações intensas que não permitem drenagem.
- elevação excessiva do nível freático: precipitação intensa, com conseqüente aumento da umidade do material no reservatório, ou devido ao gerenciamento inadequado do ciclone.



Modos de ruptura

- galgamento: o nível d'água ultrapassa a crista da barragem, causando esforços adicionais e erodindo a crista e o talude de jusante.
- “piping”: ocorrência de erosão interna tubular no corpo da barragem (ruptura geral).
- velocidade de construção muito elevada (pode acarretar o aumento excessivo de pressões neutras no corpo da barragem).
- uso de máquinas pesadas acima da pilha e perto de sua borda: a vibração pode também causar liquefação em materiais granulares fofos e saturados.
- e escavações no pé do talude.



Ruptura da barragem de rejeitos de fluorita em Stava, na Itália, em 1985.

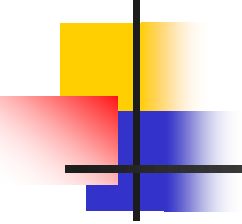
A área de disposição consistia de duas barragens construídas ao longo de um talude. A barragem superior rompeu e o material deslocado do reservatório galgou a barragem inferior, causando sua ruptura. A massa de 200.000 m³ resíduos atingiu uma velocidade de até 90 km/h, matando 268 pessoas, destruindo 62 edifícios e afetando uma área total de 43,5 hectares.





FERRO: 370 milhões t/ano de minério mais de 100 milhões t/ano de rejeitos





ALUMÍNIO: Entre 10 e 20 milhões t/ano

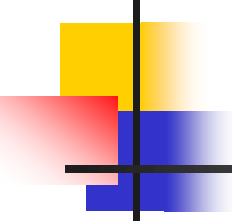




Rio Paracatu Mineração - Ouro



Votorantim Metais, Fortaleza de Minas - Níquel



Tendência de crescimento do risco (Ávila, 2016)

$$R = P * C$$

Risco = probabilidade de ruína *
consequência

A cada 30 anos: produção aumenta 10
vezes e altura aumenta 2 vezes

Fundão se rompeu por volta das 15h de 5.nov.

**Barragem
do Fundão**



Fundão
55 milhões de m³







Fubá



Muriaé

Ingá





Ajkai Timfoldgyar na Hungria: 4 mortos, 120 feridos, 2 m de lama, 700000 m³