

Soft Soil Brazilian Review

04

Segurança em barragens de rejeitos.

18

Conhecendo a consolidação de rejeitos de minas.

34

O futuro das barragens de rejeito.

31 Consulta

Quais são os modos de ruptura em barragens de rejeitos?

SEGURANÇA EM BARRAGENS DE REJEITOS

pág.04



EDITORIAL

A indústria da mineração produz grande quantidade de rejeitos, o que torna necessário ampliar áreas para a disposição dos resíduos, cujas propriedades dependem diretamente de sua disposição final. Evidentemente, rejeitos da mineração, devem ser contidos ou tratados com o objetivo de minimizar o impacto ambiental, devendo-se melhorar a segurança e o desempenho das obras geotécnicas projetadas com o propósito de armazenar e posteriormente, promover sua lavra. O sucesso destas atividades dependerá do correto dimensionamento dos reservatórios, pois está diretamente envolvido com o custo da área. O ganho de consistência dos materiais depositados, traduz-se em resistência ao cisalhamento e, também, em sua rigidez, podendo ser transportados, reaproveitados ou reintegrados ao meio ambiente.

Nesta edição, de nossa revista, propomos apresentar informações úteis, acerca da segurança das barragens de rejeitos, considerando-se a enorme evolução que ocorreu nestes últimos anos, particularmente a geotécnica,

ênfaticamente o aperfeiçoamento do processo de consolidação. Apresentamos, também, matérias atualizadas que aliam a causa ambiental, do agrupamento de rejeitos, objetivando uma desativação definitiva, por meio da lavra de barragens, através de referências capazes de gerar elementos decisivos, para atendimento às premissas iniciais de projetos, permitindo avaliar sua estabilidade, com geometrias precisas estabelecidas no campo. Para tal, torna-se necessário fazer uso de técnica específica de melhoramento de solos moles, o geoenrijecimento, que objetiva a consolidação rápida do rejeito, viabilizando as desejadas ações do descomissionamento. Conclui-se, com o devido olhar crítico, que é possível viabilizar com segurança absoluta, tanto estruturas de barragens, quanto as atividades posteriores da necessária lavra.

Boa leitura.
Joaquim Rodrigues



SOFT SOIL BRAZILIAN INSTITUTE

Rua Correia de Araújo, 131- Barra da Tijuca
Rio de Janeiro/ RJ- Brasil- CEP 22611-070
Tel: (21) 31543250

EDIÇÃO

DIRETOR EDITORIAL
Eng° Joaquim Rodrigues

DIRETORES ADJUNTOS
Eng° Thomas Rodrigues
Eng° Roger Kim
Engª Patricia Tinoco

PUBLICIDADE, ASSINATURA
Cleide Ferreira

EDITOR DE ARTE
Ágatha Braga

REPRINTS EDITORIAIS
Mariana Tati

FALE CONOSCO

 softsoilgroup.com.br

 @engegraut

 (21) 3154-3250

 atendimento@softsoilbrazilianinstitute.com.br

"Soft soil Brazilian Review" é uma revista digital com publicação bimestral

Receba notificação de nossa revista.

Inscreva-se em:

atendimento@softsoilbrazilianinstitute.com.br



A PRIMEIRA E ÚNICA REVISTA DIGITAL GEOTÉCNICA ESPECIALIZADA EM SOLOS MOLES.

23

Edição - MAIO-JUNHO 2022

Sumário

Segurança em barragens de rejeitos. 04
Joaquim Rodrigues

Conhecendo a consolidação de rejeitos de minas. 20
Patricia Karina

O futuro das barragens de rejeitos. 34
Thomas Kim



04



20



34

Capa



Precisamos melhorar a segurança e o desempenho, das obras geotécnicas projetadas para o armazenamento e lavra de rejeitos de minas.

Seções

Editorial 02

Agenda 30

Consulta 31

softsoilbrazilianinstitute.com.br



A

indústria da mineração continua prosperando, impulsionada pelo aumento da demanda por matéria prima. No entanto, permanece o grande problema, associado a exploração massiva do ecossistema, a deposição e gestão de seus rejeitos, a própria conservação da água e, como vimos, ruturas de barragens de deposição de rejeitos que, literalmente, deixaram rastros de mortes e destruição. À medida em que se explora mais o solo, mais aumenta a taxa de rejeitos e mais locais são necessários para sua deposição, que pode ser via úmida ou via alternativa. Após o processamento do solo, o rejeito é parcialmente desaguado e armazenado em grandes aterros, que crescem verticalmente, de acordo com os métodos de montante, jusante e de linha de centro. Outra produção de rejeitos é a base de pastas espessas e secas, considerada uma nova modalidade

SEGURANÇA EM BARRAGENS DE REJEITOS

Execução de aterros necessários à formação de barragens de rejeitos.

de eliminação de resíduos. No entanto, mesmo considerando que o descarte úmido é mais suscetível à ruturas, do tipo liquefação, este método de disposição é o mais comum, particularmente devido ao aspecto econômico. A verdade é que o comportamento geotécnico, do rejeito de minas, é difícil de se avaliar e, conseqüentemente, pouco compreendido, razão pela qual de 1930 a 2019, mais de 40 barragens de rejeitos romperam, por falhas diversas, principalmente as construídas pelo método de montante. A última grande catástrofe ocorreu, infelizmente, entre nós, em 2019, Minas Gerais, na barragem de rejeitos de extração de ferro, de Brumadinho, acarretando a morte de quase 300 pessoas e destruição ao longo de quase 10km. Atualmente, questionamentos têm sido apontados sobre a estabilidade e possível impacto ambiental das barragens de rejeitos, construídas pela técnica de aterro hidráulico. Questões, envolvendo a estabilidade são levantadas, em parte, pelo uso dos rejeitos como material de sua construção. Barragens inativas, também estão recebendo mais atenção, devido aos efeitos de longo prazo, da dispersão de poeira, contaminação das águas subterrâneas e, claro, por possíveis problemas de estabilidade. Em muitos casos, como o ocorrido nas Barragens do Fundão, em 2015 e Brumadinho, em 2019, os custos de reparação são terrivelmente altos, excedendo os custos do projeto original e de sua correta operação. No Brasil, para a elaboração e apresentação técnica, de um projeto de barragem de contenção de rejeitos de mineração, exige-se uma série de dados específicos, agrupados em uma sequência padrão, prescrita pela norma ABNT NBR 13028/2017. A maioria das diretrizes de segurança, atualmente disponíveis para barragens, não faz uma boa abordagem para suas particularidades. Muitas das orientações, comumente utilizadas, são dirigidas para estruturas de contenção de água (barragens convencionais), resultando em utilização pouco amigável, potencialmente insegura e/ou inapropriada, em se tratando de aspectos específicos de segurança. Como exceção, uma série de tópicos abordando diversos aspectos das barragens de rejeitos, foi apresentado e publicado pela International Commission on Large Dams (ICOLD) nos últimos 20 anos, exibindo foco sobre segurança para esse tipo de barragem.



Metodologias Construtivas

A construção de barragens de contenção de rejeitos, se faz de forma "convencional", com o maciço constituído por solo compactado ou, como na maioria das barragens de mineração, pela técnica do aterro hidráulico, onde o próprio rejeito é utilizado como material de construção do maciço, com lançamento em forma de polpa. Naturalmente, a utilização da técnica do aterro hidráulico, implica em custos inferiores aos das barragens convencionais, uma vez que o transporte do rejeito, se faz por via úmida, até o ponto de aplicação, o que simplifica a operação construtiva. No contexto de barragens de rejeitos, três metodologias construtivas de barramentos podem ser caracterizadas: pelos método de jusante, método de linha de centro e método de montante, cada uma com especificidades próprias de projeto e vantagens operacionais, conforme informado na edição nº 5, desta revista. Apesar das vantagens econômicas, ressalta-se que a utilização do rejeito, como material de construção, em aterros de barragens, exige cuidados na adoção dos parâmetros de projeto, controle das variáveis operacionais e adoção de ações visando ao descomissionamento (desativação) das estruturas. Assim, os aspectos relativos à resistência ao cisalhamento, susceptibilidade à liquefação e variáveis condicionantes ao processo final de disposição dos rejeitos, devem constituir premissas de projeto.

Propriedades geotécnicas dos rejeitos

Grande parte da indústria mineira, concentra-se na extração de minerais metálicos, como ferro, ouro, cobre, etc. Como em qualquer atividade humana, há a produção de rejeito, proveniente do processamento do minério. O primeiro passo, no processamento do minério, é a questão preliminar da rocha mãe, sequenciando uma trituração mais fina, algo passando na malha de 1mm, seguindo-se de moagem, objetivando-se obter materiais próximos a uma pasta muito fina e, a seguir, obter-se um

material com consistência de lama, ambos ainda contendo o desejado componente metálico. A partir daí, seguem-se os procedimentos de lixiviação, concentração e aquecimento descartando-se, a seguir, o que denominamos rejeito. A lixiviação é, basicamente, o processo de misturar um forte ácido ou solução alcalina para remover o desejado minério. Utiliza-se, normalmente, o ácido sulfúrico para a extração de urânio e cobre e o cianeto de sódio para ouro e prata. Na etapa de concentração, ocorre a separação das partículas, utilizando-se a própria gravidade, separação magnética ou através de flutuação. Por fim, realiza-se o aquecimento ou calcinação para, também, extrair o minério. Ao final do processo, é o desague do material processado, recuperando-se a água adicionada, o que faz sobrar o rejeito. A água recuperada é reciclada para reutilização.

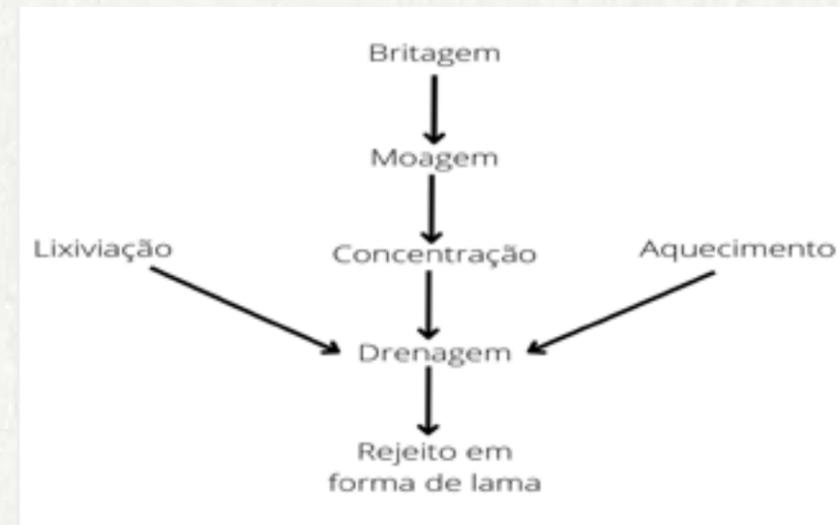


Figura 2: Processo de extração do minério até tornar-se rejeito.

As propriedades geotécnicas, do rejeito da mineração, variam de acordo com o tipo de minério extraído. Para entendimento, apresentaremos algumas importantes. O ferro, obviamente, é um dos minérios brasileiros mais conhecidos e abundantes, particularmente a hematita e a magnetita. Na figura abaixo, apresentamos as características geotécnicas, do rejeito do ferro mais comum.

Tabela 1

Propriedades físicas de Rejeitos de Ferro (Típico)				
Propriedades	Símbolo	Grosso	Fino	Unidades
Peso específico	G_s	3.23	3.08	-
Teor de umidade	$w\%$	43-54	43	%
Limite de liquidez	LL	-	28	%
Limite de plasticidade	PL	-	19	%
Índice de plasticidade	IP	-	9	%
Coefficiente de uniformidade	C_u	3.11	8.82	-
Coefficiente de curvatura	C_c	1.05	0.59	-
Peso unitário natural	γ_n	22.82	18.63	kN/m ³
Índice de vazios	e_0	0.74	1.41	-

O peso específico deste rejeito é superior a 3 (em ambos os casos), resultando em um minério bem pesado. A quantidade d'água, presente nos rejeitos, uma média entre 48,5% e 43%, muito além do limite de liquidez, explica sua natureza mole e instável, além de mal graduado.

Tabela 2

Tipo de material	Rejeitos de Ferro					
	CU testes			CD testes		
	ϕ_{cu} (°)	c_{cu} (kPa)	ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ_{cd} (°)	c_{cd} (kPa)
Grosso	25.0	194.0	41.0	8.8	40.0	30.1
Fino	16.0	13.8	32.0	7.4	35.0	28.5

Ensaio triaxiais do tipo CU-adensado e não drenado, e CD-adensado e drenado, são os mais comuns e rápidos, para a obtenção dos parâmetros geotécnicos do solo argiloso.

O índice de vazios inicial, em ambos os casos, apresenta altos valores, especialmente para a fração mais fina, resultando em um solo altamente compressível, sob efeito do aumento do peso próprio, durante a deposição, o que reflete no índice de compressão que, para a fração mais grossa

é 0,046, e para a fina 0,26. Com relação ao coeficiente de consolidação, para a fração mais fina do rejeito, apresenta um valor de $3,3 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. O importante coeficiente de permeabilidade considerando-se um índice de vazios de aproximadamente 0,98 e uma fração mais grossa do rejeito do ferro, é de aproximadamente $1,0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, e para a fração mais fina é de $2,0 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$. Comprimindo-se as amostras, objetivando-se sua consolidação, o índice de vazios diminui e vai a 0,65, assim como a permeabilidade que chega a $2,2 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. Os testes de consolidação, na condição drenada e não drenada, para as frações grossa e fina, oferecem tipicamente parâmetros geotécnicos da tabela 2, ao lado. Como se observa, para a consolidação não drenada, os resultados são em tensões totais σ_{cu} e C_{cu} , e tensões efetivas σ' e C' . Para a consolidação drenada, apenas os parâmetros pertinentes às tensões efetivas. Por outro lado, os minérios de chumbo e zinco são, frequentemente, extraídos em conjunto, com processos mecânicos e químicos apropriados, resultando em rejeitos duros e angulares de-



Image courtesy of Adviseurs in Bouwtechniek (ABT)

Geotechnical Analysis SIG: Simulating Soil Lab Tests for PLAXIS Soil Model Parameters



Micha van der Sloot
Technical Support Manager
Bentley Systems, Inc.

PLAXIS: Simulating Soil Lab Tests

www.bentley.com

Dear User,

When conducting laboratory test results – such as Triaxial and Oedometer tests – you want to make sure that the behavior of your chosen constitutive soil model captures the test result data. With the SoilTest feature, PLAXIS offers a quick and simple method to simulate these lab tests and verify the model behavior. To learn more, this Geotechnical Special Interest Group virtual workshop is a must see!

The agenda for the one-hour session encompasses:

- How to start a soil lab simulation
- Optimizing your model parameters to replicate real-life behavior
- After optimizing, how to quickly update the soil material definition in PLAXIS

The Geotechnical Analysis SIG is open to all Bentley users, so invite your colleagues!

Geotechnical Analysis SIGs – complimentary virtual workshops to keep you working optimally!

vido a composição de quartzo e dolomita, presentes na rocha hospedeira. Na tabela, a seguir, estão as propriedades geotécnicas do rejeito da extração do zinco e do chumbo, nas frações grossa e fina. Como se vê, o peso específico ostenta valores semelhantes para as duas frações, apresentando baixa plasticidade e teores de argila, mesmo para a fração fina (tabela anterior).

Tabela 3

Rejeitos de zinco-chumbo				
Propriedades	Símbolo	Grosso	Fino	Unidades
Gravidade específica	G_s	2.78	2.82	-
Teor de água natural	$w_{%}$	15.0	20.0	%
Limite líquido	LL	-	75.0	%
Limite de plástico	PL	-	60.0	%
Índice de plasticidade	PI	-	15.0	%
Índice de vazios	e_0	0.63	0.61	-
Taxa máxima de vazios	c_{max}	0.71	0.64	-
Taxa mínima de vazios	c_{min}	0.47	0.43	-
Peso unitário natural	γ_n	20.5	22.0	kN/m ³
Peso unitário seco	γ_d	17.8	18.3	kN/m ³
Densidade relativa	D_r	33.3	-	%

Com o teste de consolidação realizado, na fração mais fina do rejeito, obtém-se índices de compressão da ordem de 0,09, ou seja, ocorrem pequenas variações no índice de vazios ao final do processo. Nesta matéria, não apresentamos o coeficiente de consolidação, no entanto, pesquisas evidenciam rejeitos de zinco - cobre variando de $1,0 \times 10^{-6}$ a $1,0 \times 10^{-8} m^2/s$. Da mesma forma, os valores da permeabilidade de rejeitos, com fração mais grossa, tipicamente, $6,0 \times 10^{-6} m/s$, e com fração mais fina $2,0 \times 10^{-8} m/s$, considerando-se areias siltosas inorgânicas e areias silto-argilosas. A composição química do rejeito, densidade de polpa, granulometria, entre outras características, são elementos a serem utilizados na concepção de barragens de rejeitos, de três formas básicas, para avaliar o potencial de utilização da fração arenosa, para elevação dos aterros, para determinar seu impacto na estabilidade estrutural e características da drenagem, e a análise mineralógica para determinar aspectos químicos de drenagem (drenagem ácida) ou outras descargas do reservatório. Apesar da similaridade, entre rejeito e areias, não se pode inferir características de um com outro, porque as particularidades mineralógicas,

geotécnicas e físico-químicas são diferentes para cada tipo de matriz rochosa e planta de tratamento, como também o comportamento geotécnico do rejeito, em uma barragem, é condicionado por sua forma de deposição. Neste caso, a formação da praia de rejeitos e o conseqüente processo de segregação, que nela ocorre, é colocado como condicionante de suas propriedades geotécnicas e, portanto, do comportamento global da barragem. Assim, a forma como o material foi lançado, em razão das variáveis de deposição hidráulica (concentração da polpa, altura e velocidade de lançamento), tende a alterar significativamente o comportamento do aterro hidráulico. Para um aterro hidráulico a ser retomado, a forma como é depositado, influenciará diretamente seu condicionamento, da mesma forma que nas etapas de construção e operação. Assim, conhecer previamente o comportamento do rejeito depositado na barragem, no que tange à segregação hidráulica, resistência mecânica, permeabilidade, adensamento e susceptibilidade à liquefação, é extremamente necessário para se avaliar a segurança geotécnica desse tipo de operação. A obtenção dos valores de resistência, tanto para o solo de fundação quanto para o maciço hidráulico, são obtidos com elaboração de ensaios especiais, observando se a ob-

tenção de parâmetros de cálculo para projeto, definindo-se a tipologia do comportamento dos materiais, quando submetidos a solicitações de compressão e cisalhamento. A resistência ao cisalhamento do rejeito de ferro assemelha-se à das areias, sendo controlado pelo nível de tensões e atrito entre grãos influenciado, principalmente, pelo formato, compactidade e tensão de confinamento, sendo os ensaios triaxiais, sob diferentes trajetórias de tensão, os mais indicados para sua obtenção.

Tabela 4: Parâmetros do rejeito, utilizado como material de fundação e alteamentos de algumas barragens, construídas pela técnica de aterro hidráulico, no Quadrilátero Ferrífero, de Minas Gerais.

Autor	Barragem	Mina	γ (kN/m ³)	Parâmetros de resistência	
				c' (kPa)	ϕ' (°)
Resente (2013)	Fundão	Germano	17,40 (γ_n)	20	34,5
Castilho (2017)	Germano	Germano	20,00 (γ_n)	0	31,9
Miranda (2018)	Forquilha I	Fábrica	25,80 (γ_n)	0	33,7

GEOKON

TRUSTED MEASUREMENTS®

EQUIPAMENTOS GEOTÉCNICOS

Conheça nosso moderníssimo inclinômetro M6180 que possibilita automação e leitura em tempo real



O moderníssimo inclinômetro M6180, caracteriza-se por segmentos individuais, mecanicamente conectados com juntas estilo "bola-soquete", interligadas eletricamente com conectores à prova d'água em um único cabo, tornando o conjunto extremamente leve e compacto, o que torna fácil e rápida sua instalação. Conseqüentemente, seu custo tornou-se muito atrativo. O modelo M6180 juntamente com nosso sistema de compartilhamento de dados, sem fio, da série GeoNet torna-se, portanto, a solução mais moderna de monitoramento para deslocamentos horizontais.

Conheça hoje mesmo esta moderníssima tecnologia (com preço atrativo)

Representante exclusivo no Brasil: **G5 Engenharia LTDA**
 Contato: (41) 3402-1707/ contacao@g5engenharia.com.br / g5engenharia.com.br

As análises da resistência não drenada, para barragens de rejeitos, construídas pela técnica do aterro hidráulico, passaram a ser exigência na revisão da NBR 13.028, de 2017. Fear e Robertson (1995), ao proporem metodologia para a estimativa da resistência não drenada, para areias, com base em ensaios SPT e CPT, criaram caminho para o emprego de suas formulações também para o rejeito da mineração. Com relação ao desenvolvimento da poropressão, podemos considerar três formas básicas de ocorrência, em aterros construídos com rejeitos, conforme Figura abaixo.

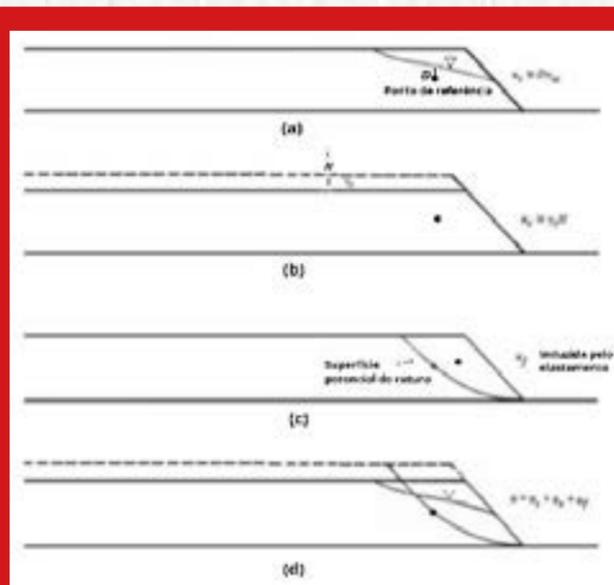


Figura 3: Desenvolvimentos da poropressão, nas análises de estabilidade. (a) Poropressão estática inicial, gerada por percolação. (b) Excesso de poropressão inicial provocado por carregamento uniforme rápido. (c) Poropressão gerada por cisalhamento. (d) Combinação das condições de poropressão – modificado de Vick(1990).

A primeira forma origina-se com a própria percolação. A poropressão estática inicial é, geralmente, derivada do fluxo da percolação, em regime permanente, e seu desen-

volvimento não depende da aplicação de qualquer carga externa sobre o aterro. Geralmente, exige-se procedimentos rigorosos para a determinação da poropressão estática, como o exame de linhas equipotenciais de redes de fluxo completas. No entanto, uma aproximação razoável, comumente utilizada em análises de estabilidade, é que a poropressão, em um determinado ponto, corresponde à profundidade abaixo da superfície freática, como mostra a Figura 3 (a). A segunda forma de poropressão, é o excesso inicial causado com carregamento rápido e uniforme, como mostrado na Figura 3 (b). Esta condição pode ocorrer, por exemplo, com um alteamento à montante, executado com velocidade muito rápida, em relação à capacidade do rejeito de dissipar a poropressão gerada com o natural adensamento. A terceira forma é talvez, a que gera maior confusão, ilustrada na Figura 3 (c). Corresponde à poropressão devida ao cisalhamento, gerada por alterações nas tensões cisalhantes, que ocorrem rapidamente, em relação à condição de drenagem, influenciando a dissipação da poropressão.

Formas De Deposição Dos Rejeitos

Ficou claro que o comportamento geotécnico do rejeito, em uma barragem, é condicionado por suas características mineralógicas e, também, pela forma de deposição, que tende a influenciar fortemente a estabilidade do maciço da barragem construída com o próprio rejeito. A formação da praia de rejeitos e, consequentemente, o processo de segregação que nela ocorre, realmente, influenciam os parâmetros da resistência, fazendo com que amostras, com

maiores teores de ferro apresentem maior ganho de resistência ao cisalhamento e, ainda que, ao analisar valores destes parâmetros obtidos, poder-se-á verificar que o ângulo de atrito tende a aumentar exponencialmente, com a diminuição da porosidade inicial da amostra.



Figura 4: Típica barragem de rejeitos observando-se a formação das praias.

Neste cenário, o sistema de deposição de rejeitos, via úmida, é o mais econômico, já que tem a capacidade de atender grandes volumes de processamento. Sua deposição, geralmente, se faz em vales, formando-se verdadeiras piscinões, ou entre encostas, promovendo-se seu fechamento com aterros, simulando-se uma barragem de terra. A figura ao lado, evidencia os

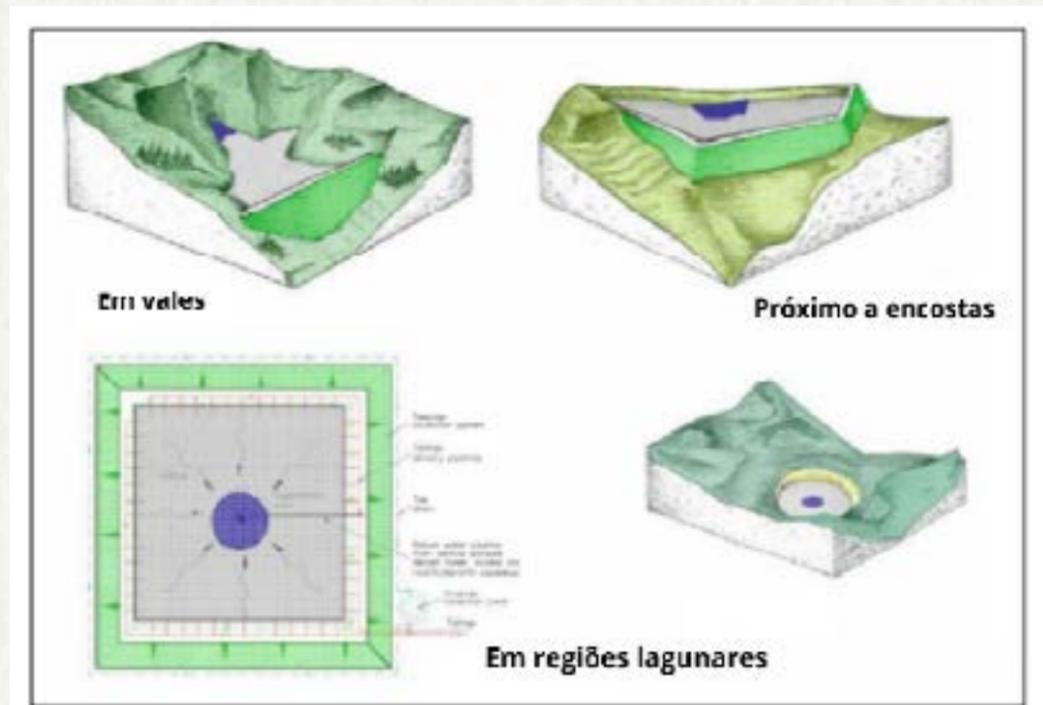


Figura 5: Arranjos típicos de regiões para estocagem de rejeitos de minas.

tipos de deposição empregados. Quando há necessidade de se estocar grandes volumes de água, devido a períodos de chuvas fortes, altera-se a estrutura da barragem de rejeitos, empregando-se conceitos de barragens de terra, com núcleo argiloso, filtro, e um revestimento anti-



Figura 6: Barragem formada para contenção de rejeitos.

-erosão à montante e, na região de drenagem. Este artifício, econômico por sinal, implica em maior responsabilidade de operação e gerenciamento a longo prazo, desencadeando problemas de fugas, pipings e ruturas em barragens. De um modo geral, a construção destas barragens é iniciada com a elevação de um dique de partida, com solo de empréstimo, com capacidade de retenção para dois ou três anos de operação. Os estágios posteriores ou alteamentos, são construídos com material estéril de empréstimo, seja com deposição hidráulica do rejeito ou por ciclonação. Na edição nº 5 da Soft Soil Brazilian Review, apresentam-se modelos de alteamentos construídos na mineração. A grande questão, no entanto, é a gestão da água, particularmente em ambientes áridos, razão pela qual criaram-se alternativas para o descarte do rejeito, reduzindo-se tanto o volume d'água empregado, o impacto ambiental e, claro, os riscos. Algumas destas novas alternativas, utilizam descartes de rejeitos espessos, pastosos e até filtrados, resultado de um forte processo de desidratação-dissecação, até tornarem-se massa homogênea, com cerca de 70% de sólidos, com alta densidade de polpa, funcionando com fluido altamente viscoso, capaz de ser bombeado para a região de deposição, formando pilhas cônicas, não exigindo tanto de sistemas de contenção, quanto o rejeito convencional, além de conter menos água e conseqüentemente, menos problemas ambientais. A pouca água expelida do processo de desidratação/dissecação, e da segura consolidação do rejeito, é coletada no pé da barragem. Estes materiais, pela consistência e composição, podem tornar-se verdadeiras massas cimentantes, uma vez misturados com aglomerantes apropriados. Nota-se, portanto, que a deposição desta forma de rejeitos, acarreta muito menos problemas de contenção. Contudo, mesmo formando depósitos mais secos, estáveis e

SOLOTEST®

A solotest equipa os melhores laboratórios de solos, concreto e misturas asfálticas da América Latina, com equipamentos próprios e de seus parceiros internacionais.



1.014.250 - Extrator Shelby de Bancada



1.055.001 - Prensa de Adensamento



1.022.250 - Prensa CBR / Marshall Digital Microprocessada



4.100.030 - Medidor de Densidade de Solo Não Nuclear (SDG)



4.688.020 - Sistema hidráulico para realização de ensaio CPT em diversos tipos de Solos



4.100.300 - LWD "Light Weight Deflectometer"



4.100.035 - Penetrômetro Dinâmico Eletrônico para Solos Panda

resistentes, a questão da rutura, por liquefação, ainda é um problema e precisa ser calculada.



Figura 7: Rompimento de barragem de rejeitos.

A necessidade do melhoramento do solo

Em todas as fases do projeto de barragem de rejeitos, torna-se necessário adequar ou readequar a condição do solo, seja antes de iniciar sua deposição, seja durante o alteamento ou após, para seu reaproveitamento. Melhoramento de solo, entenda-se, significa reestabelecer, aprimorar ou fazer

crescer os parâmetros geotécnicos, ou seja, suas propriedades físicas e mecânicas, de modo a oferecer a estabilidade necessária e, claro, a rigidez específica, que minimize ou elimine grandes deformações. A teoria do melhoramento de solos argilosos, deve seguir 100% as diretrizes técnicas

da teoria da consolidação, única forma de chegar aos objetivos desejados na prática. Trata-se do geoenrijecimento, com CPR Grouting, que impõe previamente drenos necessários, seguindo-se do processo compressivo que permite a drenagem do solo argiloso mole/rejeito, tornando-o

rígido, firme e estável geotecnica-mente, seja para receber cargas, seja para melhorar a estabilidade ou para permitir escavação posterior. Tudo isto, de forma viável, sem improvisos, alternativas ou paliativos, fazendo-se uso de técnicas de fundação, à base de colunas que, via de regra, apenas servem para transferir cargas da superfície para profundidades maiores, sem nenhum comprometimento com o desejado processo de consolidação do rejeito que, efetivamente, é a única maneira de torná-lo estável o suficiente. A

desejada consolidação, é particularmente útil em situações de instabilidade de barragens. O melhoramento efetivo do solo, com geoenrijecimento, providencia o enrijecimento do solo de jusante para montante, fazendo aumentar o fator de segurança da barragem, praticamente sem qualquer risco associado, considerando-se que a medida em que evolui à jusante, garante-se mais e mais maciços e contenção, neutralizando empuxos laterais vindos de montante. Importante, sem qualquer processo de cravação ou vibração prejudiciais. Outra vantagem do melhoramento do solo, é a possibilidade da utilização do próprio rejeito como insumo ou material que formará o grout, permitindo o processo de compressão necessário à sua consolidação.



Figura 8: Certificação do melhoramento do solo com pressiometro.

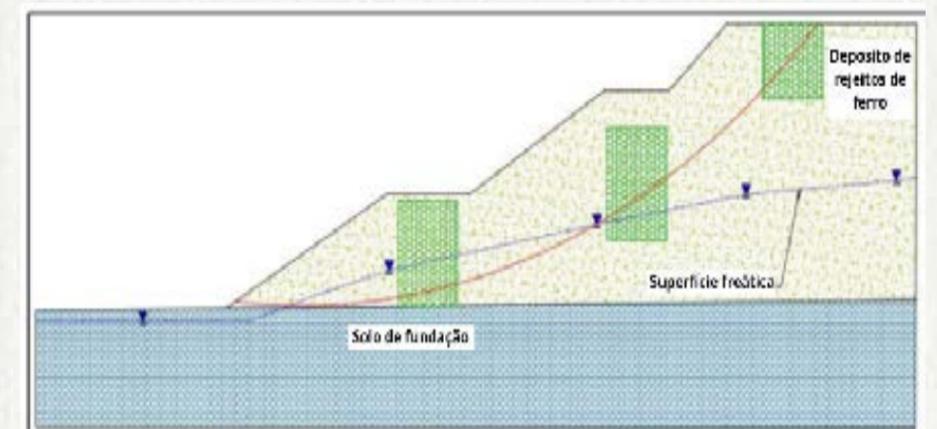


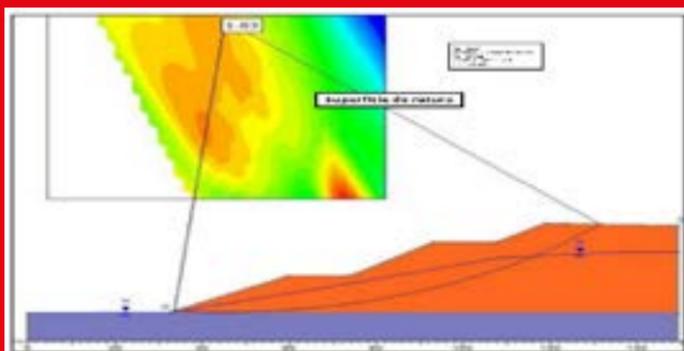
Figura 9: Configuração geométrica, da superfície de rutura de uma barragem de rejeitos. Distribuição de 3 locais específicos, onde foi feito o melhoramento do solo para conhecimento do fator de segurança.

Efeito da estabilização com o melhoramento efetivo do solo

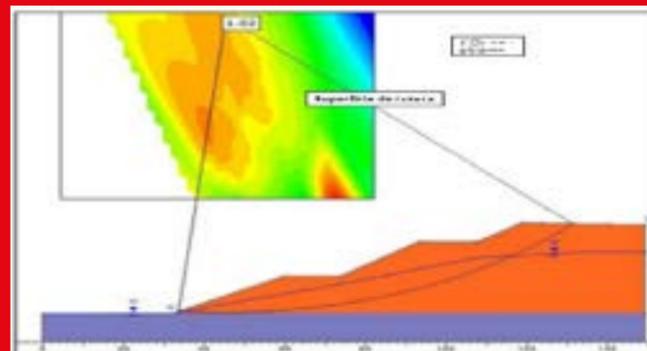
Com as análises de estabilidade, a seguir apresentadas, utilizando-se, os métodos de Bishop e Equilíbrio Limite Geral (GLE), verifica-se o drástico melhoramento dos fatores de segurança para a barragem analisada, com o aumento da resistência cisalhante do solo, particularmente no topo da barragem. Análises pressiométricas e com Tomografia por Imagem, certificam o grau de resistência e rigidez antes e após o melhoramento do solo.

Antes da rutura

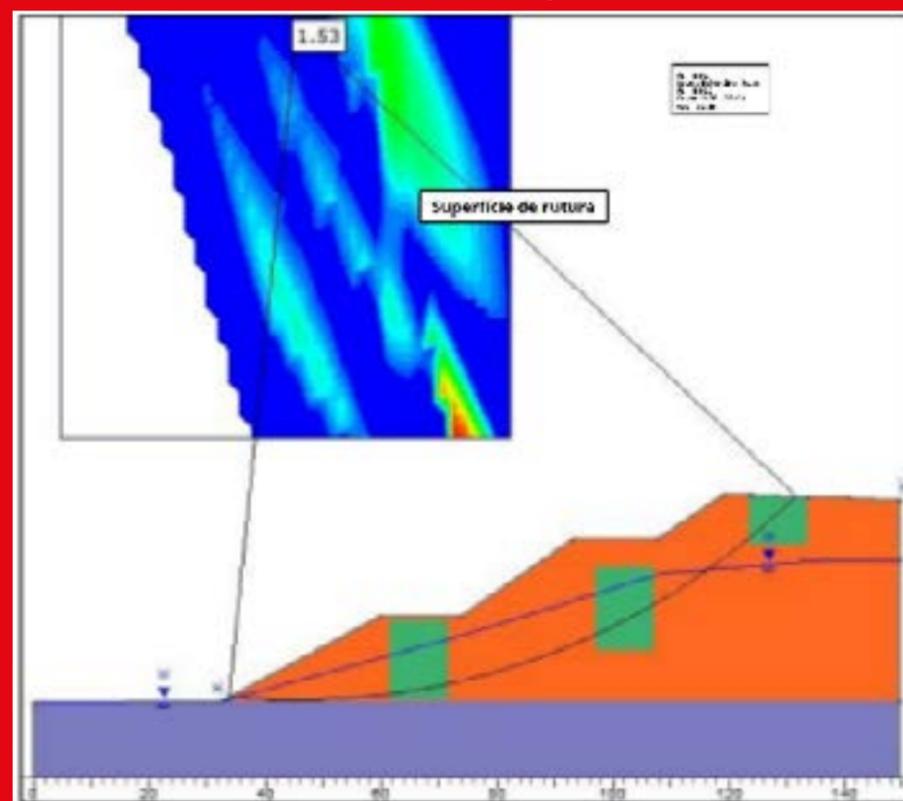
Método Bishop



Método GLE



Com O Melhoramento Do Solo Em 3 Seções (Método Bishop)



REFERÊNCIAS

- Joaquim Rodrigues é engenheiro civil M.Sc. formado no Rio de Janeiro em 1977 e pós-graduado pela COPPE na Universidade Federal do Rio de Janeiro. Diretor do Soft Soil Group e da Engegraut Geotecnia e Engenharia, associada à ABMS e ao American Society of Civil Engineers desde 1994. Desenvolveu duas técnicas de tratamento de solos moles, sendo motivo de patente o GEOENRIJECIMENTO, utilizada hoje em todo o Brasil.
- Gustavo Marçal: "Proposta de metodologia para lavra de barragens de rejeitos de ferro construídas pela técnica de aterro hidráulico" 2020.
- Luiz Miguel Cañabi. "Consolidação de um rejeito de mineração de areia e modelagem do enchimento de um reservatório para sua disposição". 2011.
- Chang, N., Heymann, G., & Clayton, C. (2011). The effect of fabric on the behaviour of gold tailings. *Géotechnique*, pp. 187-197. doi:10.1680/geot.g.P.066
- Chapuis, R. P., & Aubertin, M. (2003, June). On the use of the Kozeny-Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(3), pp. 616-628. doi:https://doi.org/10.1139/t03-013
- Das, B. M. (2008). *Advanced Soil Mechanics* (Vol. Third edition). New York: Taylor & Francis
- Fourie, A. B., & Tshabalala, L. (2005). Initiation of static liquefaction and the role of K_0 consolidation. *Canadian Geotechnical Journal*, pp. 892-906.
- Fourie, A. B., Blight, G. E., & Papageorgiou, G. (2001). Static liquefaction as a possible explanation for the Merriespruit tailings dam failure. *Canadian Geotechnical Journal*, pp. 707-719. doi:10.1139/cgj-38-4-707
- Kirsch, K., & Bell, A. (2013). *Ground Improvement* (Vol. Third Edition). Boca Raton: CRC Press.
- Klohn Crippen Berger. (2017, September 7). Best Practices for Tailings Dam Design. Retrieved from <https://www.klohn.com/blog/best-practices-for-tailings-damdesign/>
- Lyu, Z., Chai, J., Xu, Z., Qin, Y., & Cao, J. (2019). A Comprehensive Review on Reasons for Tailings Dam Failures Based on Case History. *Advances in Civil Engineering*, pp. 1-18. doi:https://doi.org/10.1155/2019/4159306
- Martin, T. E., & McRoberts, E. D. (1999). Some considerations in the stability analysis of upstream tailings dams. *Tailings and MineWaste '09, Proceedings 13th International Conference On Tailings and MineWaste*.
- Masengo, E., Julien, M. R., Lavoie, P., Lépine, T., Nousiainen, J., Saukkoriipi, J., . . . Karvo, J. (2019). Enhancement of contractive tailings using deep soil mixing technique at Kittilä mine. *Sustainable and Safe Dams Around the World*, PP. 3406-3418.
- Nicholson, P. G. (2015). *Soil improvement and ground modification methods*. Waltham: Butterworth Heinemann.
- Quille, M. E., & O'Kelly, B. C. (2010). Geotechnical properties of zinc/lead mine tailings from Tara Mines, Ireland. *Engineering and Geotechnics: Progress in Modeling and Applications*, pp. 111-117.
- Saleh-Mbemba, F., Aubertin, M., & Boudrias, G. (2019). Drainage and consolidation of mine tailings near waste rock inclusions. *Sustainable and Safe Dams Around the World*, pp. 3306-3314.
- Silva Rotta, L. H., Alcântara, E., Park, E., Galante N., R., Lin, Y. N., Bernardo, N., & Gonçalves M., T. S. (2020). The 2019 Brumadinho tailings dam collapse: Possible cause and impacts of the worst human and environmental disaster in Brazil. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, pp. 1-12. doi:https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102119
- Uhlig, C. A. (2015). New Technological Developments in the Field of VibroCompaction in the Lusatian Lignite Mining Area. *Proc. of the 12th Int. Symp Continuous Surface Mining* (pp. pp. 117 - 126). Aachen: Springer Internationa.

CONHECENDO A CONSOLIDAÇÃO DE REJEITOS DE MINAS



Figura 1: Uma típica barragem de rejeitos.

Quando um depósito de argilas moles é submetido a um carregamento, a poropressão do solo aumenta abruptamente, ocorrendo o recalque imediato. Pelo fato da condutividade hidráulica das argilas ser bem pequena, o excesso da poropressão, gerado pelo carregamento, dissipar-se-á lentamente, tomando longos períodos de tempo. Portanto, as alterações de volume associadas,

incluindo a consolidação, continuarão após o recalque imediato. Evidentemente, o processo de consolidação de depósitos de argilas moles, ou rejeitos, desempenha papel extremamente importante nas análises de estabilidade de aterros, de elementos de fundação rasa e profunda e de barragens de rejeitos. O comportamento deformativo dessas estruturas e a poropressão, precisam ser bem investigados. Muitos pesquisadores trabalham neste sen-

tido. Embora o comportamento tensão-deformação do solo seja altamente não linear, trabalhos iniciais da análise da consolidação das argilas, idealizam-na como linearmente elástico. O comportamento de argilas moles, como os rejeitos de minas, é bastante diferente de solos convencionais, pois submetem-se a enormes deformações e variações em seus índices de vazios.

COMO ANALISAR A CONSOLIDAÇÃO DO SOLO

A velocidade da compressão primária ou hidrodinâmica, é regida pela evacuação da água dos poros das argilas, devido ao carregamento imposto na superfície, ou pelo próprio peso do material, que aumenta a pressão na água. É simples, quando se aplica o carregamento na argila mole, sua estrutura de grãos não consegue suportar, de maneira imediata, exatamente por que não se produz compressão. É, pois, a poropressão ou pressão neutra que a suporta. A medida em que a água dos poros da argila tenta fluir, é que começa o real efeito compressivo no solo mole. Como argilas e resíduos de mineração, de um modo geral, são muito pouco permeáveis, a poropressão continua alta e dificilmente dissipa. Terzaghi, em 1943, modelou a mecânica deste processo, através da analogia com o famoso experimento utilizando mola, pistão e um cilindro, objetivando obter o recalque de uma seção circular da argila, sob carga constante, restringindo sua expansão lateral. A realidade é que esta teoria é um problema unidimensional de uma seção circular, sob carga constante, que acabou tornando-se verdade para três dimensões e, também, para qualquer carga arbitrária variável em relação ao tempo. A teoria de Terzaghi assume também que o processo deformativo ocorre, apenas, na direção vertical. Na realidade, os carregamentos causam excesso de poropressão nas direções vertical e horizontal, envolvendo tensões verticais e horizontais, estabelecendo-se a consolidação tridimensional, já antecipada por Biot, em 1941. Contudo, a ferramenta matemática do cálculo operacional, pode ser aplicada para calcular o recalque, não necessitando considerar qualquer distribuição de tensões nas argilas, o que significa solução para problemas bi e tridimensionais mais complexos.

O método por elementos finitos provou ser uma ferramenta analítica extremamente poderosa para tal, desde 1969, onde Sandhu e Wilson formataram a análise para o problema da consolidação. Lewis, Roberts e Zienkiewics, quase dez anos depois, em 1976, formularam a questão da consolidação não linear. Seis anos antes, Duncan e Chang, em 1970, modelaram a consolidação da argila, propondo a relação tensão-deformação hiperbólica. Entre 1993 e 1995, Manoharan, Dasgupta e Bergado estudaram o comportamento da consolidação sob sapatas e aterros assentados sobre argilas moles, modelando-o como elástico perfeitamente plástico, satisfazendo o critério de ruptura de Mohr-Coulomb (a ruptura ocorre quando, neste plano, a combinação de tensões normais e cisalhantes, é tal que a tensão de cisalhamento é máxima). A condição de solos moles é o das argilas moles, envolvendo também, rejeitos de minas. Evidentemente, há diferenças em relação a solos tradicionais, em cujo cálculo do recalque assume-se que a compressibilidade e a condutividade hidráulica permanecem constantes, durante todo o evento da consolidação, com processo deformativo pequeno. Quando se trabalha com argilas moles, com processo deformativo, devido a consolidação, é extremamente maior, assim como a variação do índice de vazios. Adicionalmente, o efeito do peso próprio é dominante, na condição de argilas moles, o que é negligenciado na consolidação com pequenas deformações.

OS MODELOS UTILIZADOS

Quando construímos aterros ou obras em geral, sobre solos argilosos moles, há a enorme questão da consolidação do material argiloso, podendo ocorrer diferentes recalques, motivados por intensidades variáveis de carregamento e heterogeneidades de camadas no contexto geral. É o gravíssimo problema

dos recalques diferenciais, catastróficos, ao contrário do recalque uniforme. Recalques em bordas de áreas carregadas, são afetados pela restrição ao fluxo d'água para áreas vizinhas descarregadas. Todos sabemos, desde Terzaghi, que o desejado processo de consolidação, seja em solos moles, ou na deposição de rejeitos, só é alcançado devido a

redução do volume obtido, motivado pelo livre fluxo d'água, que circula, devido ao carregamento rápido com distribuição senoidal. Para carregamentos esparsos, o recalque abaixo de elementos de fundação direta, incluindo pisos industriais, é obtido utilizando-se o princípio da superposição e a integral Dirichlet. Diversos estudos con-

centram-se na restrição ao fluxo d'água, tanto para baixo, quanto para o lado. Devido à condição, quase que constante, de aterros superficiais, considerados impermeáveis, o recalque, sob a região carregada, é acompanhado por expansão considerável ao redor. Em 1963, Gibson ideologizou análise tridimensional para obter o recalque, sob elementos de fundação, com carregamento constante e sobre solo argiloso semi-infinito, o que possibilitou, por superposição, estender o estudo para distribuições de carregamentos complicadas, como elementos de fun-

dação com área irregular. Em 1969, Schiffman, comparou as teorias uni, pseudo-tridimensional e tridimensional para a condição de sapatas corridas, observando a distribuição lateral do excesso de poropressão e as tensões cisalhantes máximas, observando que, para as últimas, o processo de consolidação apresentou resultados mais seguros. Em 2004, Xie obteve soluções analíticas para a consolidação unidimensional da argila, considerando grandes deformações pertinentes a espessas camadas argilosas saturadas, em

comparação com a clássica teoria das pequenas deformações. Ficou evidente a diferença de resultados, ou seja, a quantidade de recalque estimado, pela teoria das grandes deformações, é bem menor, ao mesmo tempo em que seu desenvolvimento e a dissipação do excesso de poropressão ocorre bem mais rápido, comparado à teoria da consolidação para pequenas deformações. Outra observação importante deste estudo, é que diminui a discrepância entre as duas teorias, a medida em que ocorre a redução da compressibilidade da argila (aumento de sua rigidez).

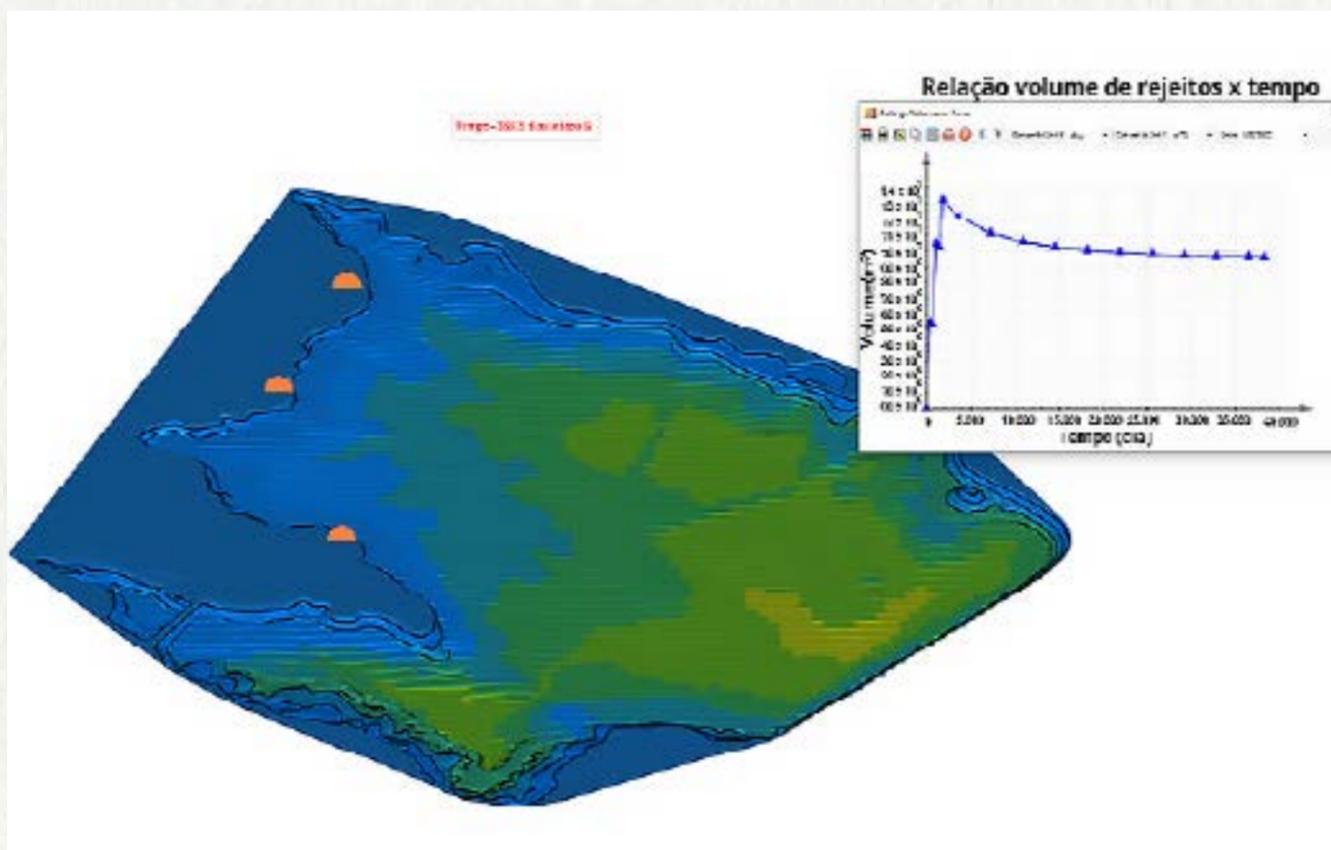


Figura 2: Resultado da elevação e volume na análise da consolidação pseudo 3D, exigida para modelagem numérica da consolidação, para grandes deformações, de modo a informar a dissipação da água com o tempo.

A REALIDADE DO SOLO EM CAMADAS

Na análise da consolidação, geralmente, considera-se uma única camada de argila mole, com objetivo de se obter a deformação. As condições de drenagem são, geralmente, tratadas como drenadas ou não. Na realidade, terrenos com argilas moles são estratificados e a condição de contorno varia ou é parcialmente drenado. A solução para este problema, começou a ocorrer a partir de 1970, com Schiffan, desenvolvendo solução analítica para a consolidação, considerando quatro camadas de argilas moles, com drenagem livre nos limites superior e inferior.

A CONSOLIDAÇÃO COM MÉTODOS NUMÉRICOS

O início dos anos 1970, é uma data histórica:

• Wilson propoz um modelo de elementos finitos para estudar o processo de consolidação nas argilas, com sucesso, encontrando tensões e deformações tanto, para as fases sólidas e líquidas, em livres condições de contorno e com configurações geométricas complexas.

• Duncan representou o comportamento tensão-deformação das argilas, na condição não linear, dependente da tensão. A seguir, propôs a relação tensão deformação hiperbólica para modelar seu comportamento.

1970

• Christian também formulou a consolidação, sob condição de deformação plana, utilizando elementos finitos.

• Carter apresentou a teoria da consolidação finita, a partir de condições uni e tridimensional, utilizando método numérico para a consolidação, dependente do tempo, considerando solo argiloso elástico-plástico, com deformações finitas, permitindo alterações de geometria.

2008

• Krishnamoorthy analisou, com a relação hiperbólica de Duncan, a consolidação utilizando o método não linear de elementos finitos, para analisar o recalque de uma sapata apoiada em argila saturada, obtendo-se a poropressão e os deslocamentos em diversos intervalos de tempo, comparando-os com ensaios semelhantes de laboratório. O recalque obtido, com a análise não linear, é consideravelmente maior do que o obtido com análise elástica, embora o tempo de dissipação da poropressão tenha sido quase o mesmo.

2010

• Huang comparou, com elementos finitos, as teorias da consolidação unidimensional para argilas moles em camadas, utilizando as equações de Terzaghi, não atendendo as condições de continuidade de fluxos em suas interfaces.

2013

• Krishnamoorthy, estudou os fatores de segurança, (FS), para a consolidação das argilas moles, em diversos intervalos de tempo, incorporando drenos verticais. Comparou-se, em diversos intervalos de tempo, os FSs de taludes, sobre solos moles consolidados, com e sem geodrenos, assim como seu espaçamento. Comprovou-se ser fundamental, a utilização de geodrenos para a consolidação eficiente (rápida) das argilas moles.

A CONSOLIDAÇÃO DE REJEITOS DE MINAS

A consolidação de rejeitos, na área de mineração, é semelhante às argilas moles. A determinação, in situ, do processo deformativo, nestes locais de armazenamento, originou importantes estudos sobre sua consolidação. A decantação, destes rejeitos depositados, é feita através das fases de sedimentação, com a ocorrência do assentamento inicial das partículas, que se avolumam do fundo para cima, devido à ação das forças hidrodinâmicas, sem qualquer desenvolvimento da poropressão e de tensões efetivas. E, principalmente, da fase da consolidação, à medida em que as partículas entram em contato, desenvolvendo poropressão e tensões efetivas. Contudo, a fronteira entre sedimentação e consolidação não tem como ser prevista, sendo governada por propriedades inerentes ao assentamento dos grãos, o que é bem explicado no estudo de 2013, de Azam. Geotecnicamente, Been mostrou em 1981,

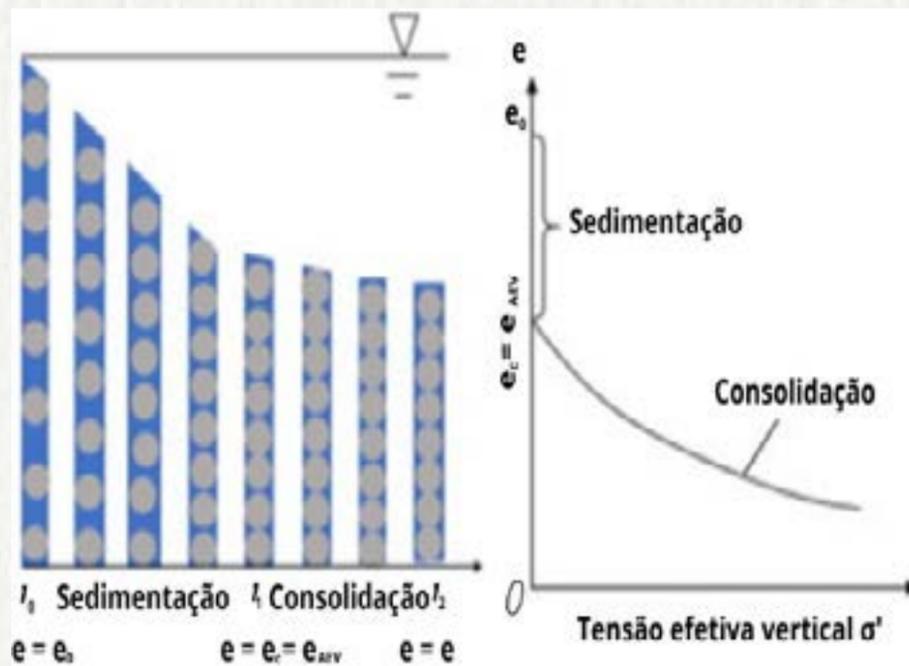


Figura 3: Apresentação física da sedimentação e consolidação por peso próprio e curva de compressão típica $e-\sigma'$ do rejeito.

que a compressibilidade e a condutividade hidráulica dos rejeitos são dependentes do índice de vazios inicial. Em 1983, Carrier observou que, à medida em que se avoluma os rejeitos, com o estabelecimento de cargas crescentes, ocorrem grandes mudanças de volume, com crescimento ex-

ponencial do índice de vazios, devido a presença intensa de argilas e partículas coloidais. Ou seja, um cenário de grandes deformações, à semelhança das argilas moles. Nesta condição, também, não se pode aplicar a teoria de Terzaghi, conforme estudos de 1979 a 1989 de Bromwell até Feldkamp, e sim a teoria da consolidação não linear, com deformações finitas, caracterizada por carregamentos motivados pelo próprio peso dos rejeitos. Nestes estudos, fica evidente a necessidade de ensaios geotécnicos diferenciados, considerando-se a condição de "solos compostos por rejeitos ultra-moles", submetidos a enormes deformações, pequenas tensões efetivas, extenso processo de

consolidação e o comportamento totalmente não linear. Neste período, desenvolveu-se testes geotécnicos, particularizados para a teoria das grandes deformações, basicamente ensaios em larga escala, da consolidação para lamas, que exigem a duração de meses, caracterizados por colunas de sedimentação, consolidômetros de lama, semelhantes a edômetros convencionais, porém com maiores dimensões. No estudo de 2008, de Scott, evidencia-se que as teorias da consolidação unidimensional, permanecem válidas, para lagoas de contenção de rejeitos, com profundidade menor que a largura e o comprimento, uma vez que a direção do fluxo da lama e sua sedimentação é vertical. Em 2009, Fredhund, apresen-

tou programa de elementos finitos uni, bi e tridimensional como solução da consolidação com grandes deformações para rejeitos, comparando-o à consolidação com pequenas deformações. Conclui, que esta última superestima o processo deformativo, e as análises bi e tridimensional proporcionam melhor compreensão da consolidação para longos prazos. O processo de consolidação de argilas moles a ultra-moles, precisa ter a mecânica da consolidação compreendida, sem o que a dissipação da poropressão causará grandes recalques ou enormes deformações, ocasionando instabilidade nos maciços. As teorias da consolidação de Tezaghi e Biot portanto, restringem-se a

deformações ínfimas ou diminutas, desconsiderando o peso próprio do material analisado, julgando que os coeficientes de compressibilidade permanecem constantes e só podem ser aplicadas em argilas que consolidam via alteração nas tensões efetivas. Estas duas teorias portanto, não podem ser aplicadas para a condição de argilas moles a ultra moles, como o de rejeitos de minas, devendo-se aplicar a teoria da consolidação com deformação finita, proposta por Gibson e Corgill, em 1981. A utilização de elementos finitos, que considera o comportamento não linear das argilas, fornece previsões ótimas e bem eficazes para seu natural processo de consolidação. Na prática, objetivando-se consolida-los e estabiliza-los, dever-se-á utilizar a técnica

do geoenrijecimento, com CPR Grouting, já que segue fielmente a teoria da consolidação. Desaconselha-se a utilização de técnicas alternativas, à base de colunas, já que o conceito é de elementos de fundação, sem qualquer aproximação com a teoria da consolidação dos rejeitos, sendo traumática para o ambiente de barragens de rejeitos e, principalmente, sem objetivos técnicos definidos, assim como ausente de meios de certificação.

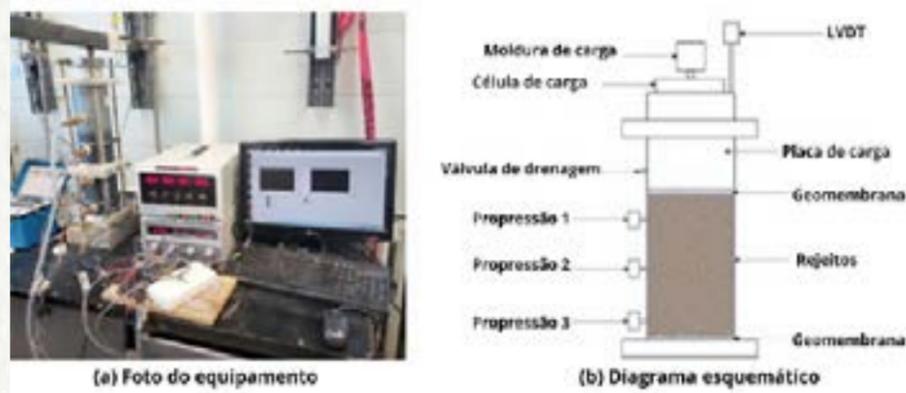


Figura 4: Fotografia e diagrama esquemático da instrumentação de consolidação da coluna.

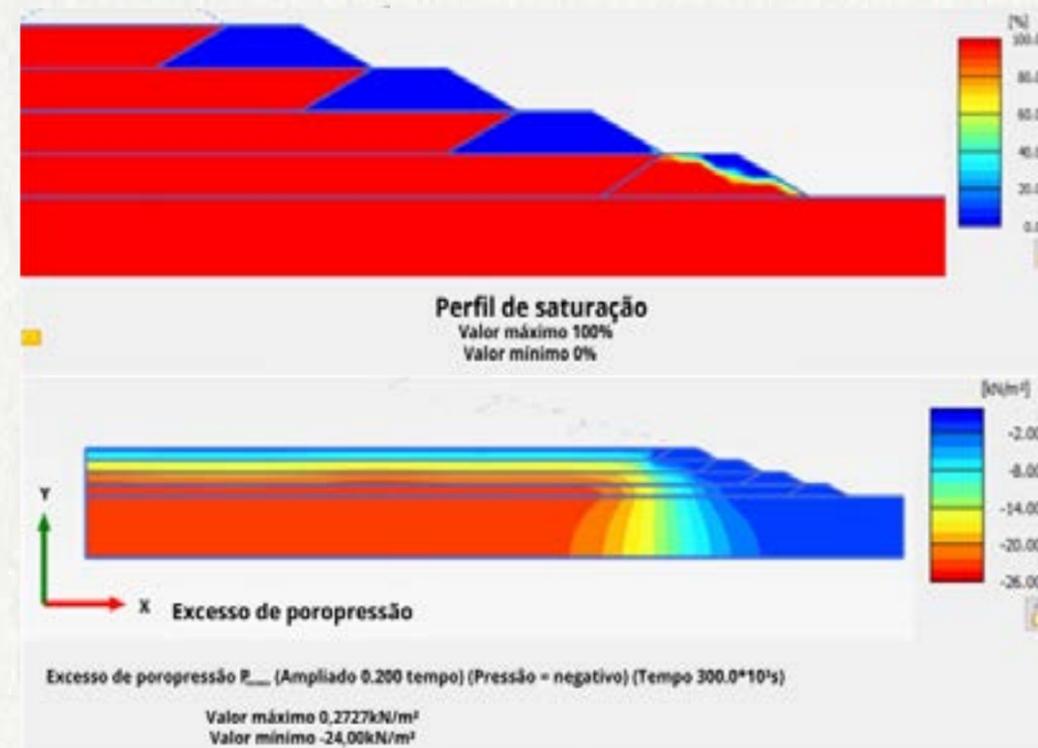


Figura 5: Condição da poropressão na construção simulada de uma barragem de rejeitos (Bentley).



Figura 6: Instalações de Gerenciamento de Rejeitos precisam de modelagem numérica da consolidação para grandes deformações, de modo a representar a perda de água com o tempo. Esta modelagem numérica, representa o estado da prática e envolve a execução de um único modelo numérico da consolidação para grandes deformações 1D, no centro do depósito e apresenta o desempenho de longo prazo de todo o depósito a partir dos resultados. A dificuldade, com tal metodologia, é que os efeitos 3D, do depósito, não são totalmente considerados. A modelagem numérica 3D, completa do processo de consolidação para grandes deformações, foi realizada, no entanto, continua sendo tecnicamente desafiador modelar o processo de deposição em modelo 3D.

REFERÊNCIAS

- **Patricia Karina Tinoco é engenheira geotécnica. Trabalha com melhoramento de solos moles.**
- Mining Magazine - Março 2022
- Adiguzel, D., & Bascetin, A. (2019). The investigation of effect of particle size distribution on flow behavior of paste tailings. Journal of Environmental Management, pp. 393-401.
- Been, K. (2016). Characterizing mine tailings for geotechnical design. Geotechnical and Geophysical Site Characterisation, pp. 41-55
- Burden, R., Williams, D., Wilson, W., & Jacobs, M. (2019). The Geotechnical Properties of Filtered Tailings and Waste Rock Blends. Tailings 2019: 6th International Seminar on Tailings Management, pp. 34-45.
- Cambridge, M. (2018). The Hydraulic Transport and Storage of Extractive Waste. Ashford, United Kingdom: Springer. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-319-69248-7
- Chongchong, Q., & Fourie, A. (2019). Cemented paste backfill for mineral tailings management: Review and future perspectives. Minerals Engineering, p. 144.
- Bentley-Soilvision
- Fitton, T., & Jewell, R. (2015). The tailings continuum: Defining the boundaries. In R. J. Jewell, & A. B. Fourie, Paste and Thickened Tailings - A Guide (pp. pp. 11-17). Nedlands: Australian Center of Geomechanics.
- Gens, A. (2019). Hydraulic fills with special focus on liquefaction. Proceedings of the XVII ECSMGE-2019, (pp. pp. 1-31). Barcelona.
- Han, J. (2015). Principles and Practices of Ground Improvement. New Jersey: Wiley & Sons.
- S. Islam, D.J. Williams, M. Llano-Serna, C. Zhang Settling, consolidation and shear strength behaviour of coal tailings slurry Int J Min Sci Technol, 30 (6) (2020), pp. 849-857
- Y. Coulibaly, T. Belem, L. Cheng Numerical analysis and geophysical monitoring for stability assessment of the Northwest tailings dam at Westwood Mine Int J Min Sci Technol, 27 (4) (2017), pp. 701-710
- D. Komljenovic, L. Stojanovic, V. Malbasic, A. Lukic A resilience-based approach in managing the closure and abandonment of large mine tailing ponds Int J Min Sci Technol, 30 (5) (2020), pp. 737-746
- B. Lingga, D.B. Apel, M. Sepehri, Y. Pu Assessment of digital image correlation method in determining large scale cemented rockfill strains Int J Min Sci Technol, 29 (5) (2019), pp. 771-776
- B. Li, J. Lan, G. Si, G. Lin, L. Hu NMR-based damage characterisation of backfill material in host rock under dynamic loading Int J Min Sci Technol, 30 (3) (2020), pp. 329-335
- Roshani, M. Fall, K. Kennedy A column study of the hydro-mechanical behavior of mature fine tailings under atmospheric drying Int J Min Sci Technol, 27 (2) (2017), pp. 203-209
- G.E. Blight Geotechnical engineering for mine waste storage facilities CRC Press (2009)
- J. Zheng, L. Li, Y. Li Solutions to estimate the excess PWP, settlement and volume of draining water after slurry deposition. Part I: impervious base Environ Earth Sci (2020)



SENSORES DE RECALQUE



CÉLULAS DE PRESSÃO PARA ATERROS

GEOKON

TRUSTED MEASUREMENTS®

EQUIPAMENTOS GEOTÉCNICOS



CÉLULAS DE PRESSÃO CRAVÁVEIS NO TERRENO



PIEZÔMETROS

A Geokon é líder mundial em automação e instrumentação geotécnica para monitoramento de solos

Representante Exclusivo no Brasil



G5 Engenharia LTDA
Tel: (41) 3402-1707
g5engenharia.com.br



QUAIS SÃO OS MODOS DE RUTURA EM BARRAGENS DE REJEITOS?

Um mecanismo de falha, em uma barragem de rejeitos, pode resultar em ruptura parcial ou completa, sendo as principais categorias: fundação, extravasamento, ruptura de talude, erosões, recalques, piping, liquefação, problemas estruturais, manutenção e causas desconhecidas. Obviamente, falhas

também podem ocorrer a partir de incidentes resultantes da associação de mecanismos, como uma erosão evoluir para um Piping ou um deslizamento de talude provocar um extravasamento, sendo que alguns destes eventos, poderão ocorrer rapidamente, com pouco ou nenhum aviso (por exemplo, liquefação). Em alguns casos, a estrutura demonstra sinais de

não conformidades, durante um período significativo de tempo (ravinamento, trincas, turbidez, etc.), exigindo a correção imediata desses mecanismos, logo que detectados. Várias publicações, apresentam informações sobre falhas em barragens de rejeitos, incluindo estudos detalhados dos maiores incidentes ocorridos no Brasil, que constam das barragens de Barragens do Fundão, em 2015 e Brumadinho, em 2019. Está claro que o número crescente de rupturas, em barragens de rejeitos, dobrou nos últimos 20 anos (Figura ao lado). Avanços na tecnologia da mineração, que tornaram possível explorar depósitos de menor teor, apesar da queda nos preços das commodities, significa dispor mais rejeitos e ampliar estruturas de disposição existentes, conclusão com base na análise de quatro rupturas recentes de barragens de rejeitos, em países com forte tradição de mineração, como em Los Frailes na Espanha, Mt Polley no Canadá, Samarco e Brumadinho no Brasil. Com a entrada em vigor da Lei Federal Nº 12.334, de 20

03 e 04 de Maio de 2022 ICMGMA 2022: Conferência Internacional sobre Geotecnia de Mineração, Análise e Projeto de Minas Roma - Itália	07 e 08 de Junho de 2022 ICGG 2022: Conferência Internacional sobre Geomecânica e Geotécnica Sydney - Austrália	15 e 16 de Junho de 2022 ICAEG 2022: Conferência Internacional sobre Avanços em Geotecnia Ambiental Toronto - Canadá	19 e 20 de Julho de 2022 ICSGA 2022: Conferência Internacional sobre Geotecnia do Solo e Aplicações Paris - França
03 e 04 de Maio de 2022 ICAGGM 2022: Conferência Internacional sobre Geotécnica Aplicada e Modelagem Geotécnica Roma - Itália	07 e 08 de Junho de 2022 ICEGR 2022: Conferência Internacional sobre Pesquisa Geotécnica Ambiental São Francisco- Estados Unidos	17 e 18 de Junho de 2022 ICMGSM 2022: Conferência Internacional sobre Geotécnica Marinha e Mecânica do Solo Riga- Letônia	19 e 20 de Julho de 2022 ICESGG 2022: Conferência Internacional sobre Estudos Experimentais em Geotécnica e Geotêxteis Toronto - Canadá
03 e 04 de Maio de 2022 ICGFE 2022: Conferência Internacional sobre Geotécnica e Engenharia Fundamental Cingapura - Cingapura	07 e 08 de Junho de 2022 ICAGE 2022: Conferência Internacional sobre Geotecnia Aplicada e Engenharia São Francisco- Estados Unidos	24 e 25 de Junho de 2022 ICSMGE 2022: Conferência Internacional sobre Mecânica do Solo e Engenharia Geotécnica Paris - França	19 e 20 de Julho de 2022 ICAGRR 2022: Conferência Internacional sobre Geotecnia Avançada de Estradas e Ferrovias Helsinki - Finlândia
09 e 10 de Maio de 2022 ICSMEG 2022: Conferência Internacional sobre Mecânica do Solo e Geotécnica Ambiental Dubai- Emirados árabes	10 e 11 de Junho de 2022 ICSG 2022: Conferência Internacional sobre Geotecnia do Solo Copenhague - Dinamarca	24 e 25 de Junho de 2022 ICSGR 2022: Conferência Internacional sobre Geotecnia e Pesquisa do Solo Istambul - Turquia	19 e 20 de Julho de 2022 ICSEGG 2022: Conferência Internacional sobre Engenharia de Solo, Geologia e Geotecnia Copenhague - Dinamarca
09 e 10 de Maio de 2022 ICSEGG 2022: Conferência Internacional sobre Engenharia de Solo, Geotecnia e Geologia Dubai- Emirados árabes	10 e 11 de Junho de 2022 ICEGSA 2022: Conferência Internacional sobre Geotecnia Ambiental para Aplicações Sustentáveis Barcelona - Espanha	05 e 06 de Julho de 2022 ICMGUM 2022: Conferência Internacional sobre Geotecnia de Mineração e Mineração Subterrânea Cingapura - Cingapura	19 e 20 de Julho de 2022 ICAEGG 2022: Conferência Internacional sobre Geologia e Geotecnia de Engenharia Aplicada Paris - França
09 e 10 de Maio de 2022 ICAMG 2022: Conferência Internacional sobre Medições Avançadas em Geotecnia Dubai- Emirados árabes	10 e 11 de Junho de 2022 ICEGGA 2022: Conferência Internacional sobre Geotécnica Ambiental e Aplicações Geoambientais Barcelona - Espanha	08 e 09 de Julho de 2022 ICEGR 2022: Conferência Internacional sobre Pesquisa Geotécnica Ambiental Praga- Tcheca	19 e 20 de Julho de 2022 ICEG 2022: Conferência Internacional sobre Geotecnia Ambiental Toronto - Canadá
13 e 14 de Maio de 2022 ICCEGG 2022: Conferência Internacional sobre Geotecnia e Geologia de Engenharia Costeira Amsterdã - Holanda	10 e 11 de Junho de 2022 ICSGFE 2022: Conferência Internacional sobre Geotecnia do Solo e Engenharia de Fundação Copenhague - Dinamarca	08 e 09 de Julho de 2022 ICSGFE 2022: Conferência Internacional sobre Geotecnia do Solo e Engenharia de Fundação Praga- Tcheca	05 e 06 de Agosto de 2022 ICGCRP 2022: Conferência Internacional sobre Geotécnica, Pesquisa Atual e Problemas Montreal - Canadá
13 e 14 de Maio de 2022 ICEGGE 2022: Conferência Internacional sobre Geotecnia Ambiental e Engenharia Geoambiental Roma - Itália	10 e 11 de Junho de 2022 ICGEG 2022: Conferência Internacional sobre Engenharia Geofísica e Geotécnica Copenhague - Dinamarca	15 e 16 de Julho de 2022 ICSG 2022: Conferência Internacional sobre Geotecnia do Solo Estocolmo - Suécia	05 e 06 de Agosto de 2022 ICGAG 2022: Conferência Internacional de Geotecnia e Geotecnia Aplicada Amsterdã - Holanda
20 e 21 de Maio de 2022 ICGGG 2022: Conferência Internacional sobre Geotécnica Computacional, Geomodelagem e Geoinformática Berlim - Alemanha	15 e 16 de Junho de 2022 ICSMG 2022: Conferência Internacional sobre Mecânica do Solo em Geotecnia Toronto - Canadá	15 e 16 de Julho de 2022 ICEGA 2022: Conferência Internacional sobre Geotecnia Ambiental e Aplicações Estocolmo - Suécia	19 e 20 de Agosto de 2022 ICSMGE 2022: Conferência Internacional sobre Mecânica do Solo e Engenharia Geotécnica Londres-Reino Unido
			19 e 20 de Agosto de 2022 ICSMG 2022: Conferência Internacional sobre Mecânica do Solo e Geotécnica Londres-Reino Unido

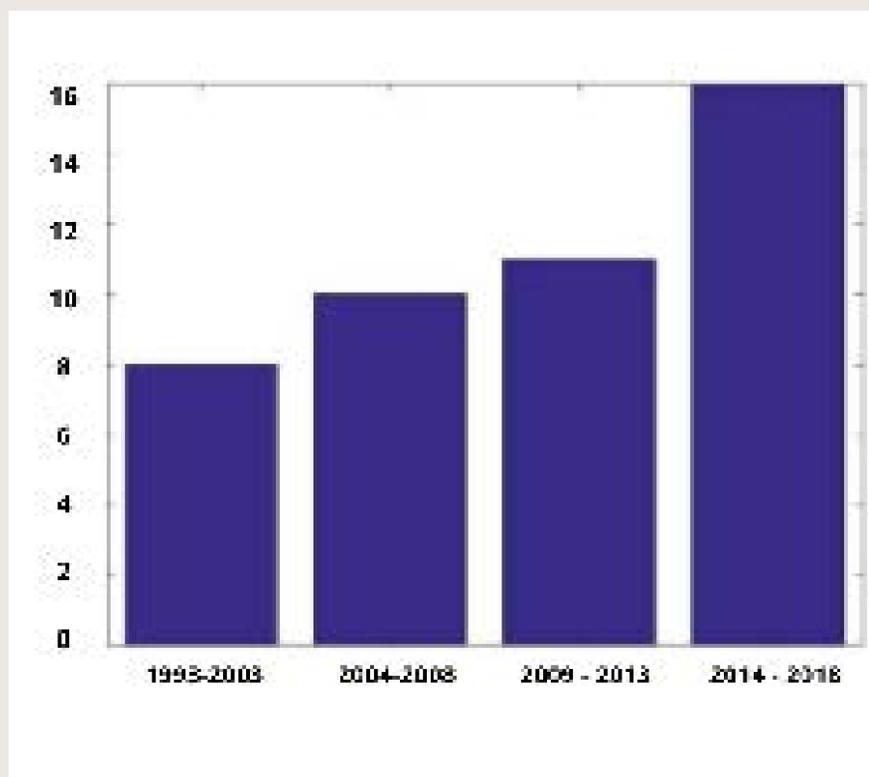


Figura 1: Número de rupturas de barragens a cada 5 anos (Armstrong et al., 2019).

de setembro de 2010, estudos de ruptura hipotética, também denominados estudos "Dam break", passaram a ser obrigatórios para barragens de rejeitos, possibilitando a implantação de ações emergenciais nas zonas de abrangência de inundação de barragens. Em barragens de rejeitos, o estudo de rupturas, torna-se mais complexo, uma vez que a saída do material do reservatório, envolve fenômenos de falha geotécnica e fluxo hiperconcentrado de rejeitos

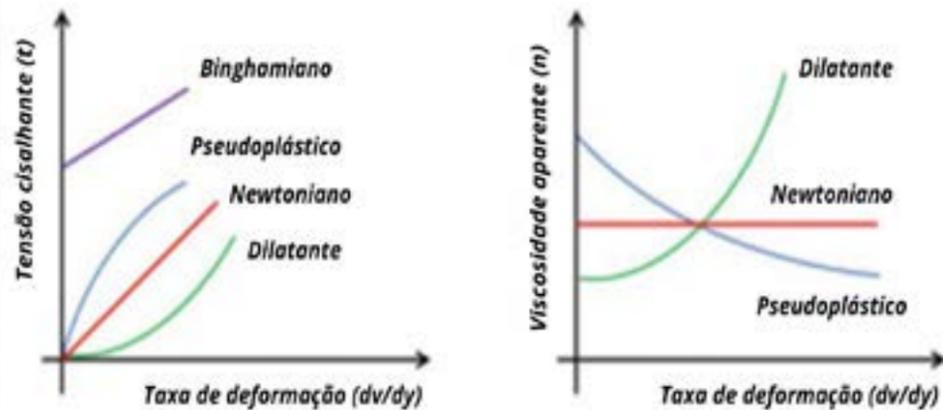


Figura 2: Comportamento reológico dos fluidos independentes do tempo.

liquefeitos. Neste contexto, modelos simplificados adicionam parâmetros geométricos do reservatório, e dados de reologia do rejeito, baseados na abordagem hidráulica, equacionada por meio da propagação de onda dinâmica, de fluidos não Newtonianos (Figura ao lado).

Um modelo representativo, para fluidos não Newtonianos, apresenta desenvolvimento de metodologia completa para a avaliação do fenômeno da ruptura, em estruturas de contenção de rejeitos, incorporando aspectos geotécnicos de sedimentação e consolidação, de forma a subsidiar a previsão do estado do material, depositado no reservatório e de sua resistência ao cisalhamento.

A partir do conhecimento das características geotécnicas do rejeito, a metodologia proposta, avaliou o desenvolvimento da ruptura do reservatório, permitindo a previsão da geomorfologia da ruptura e o volume rompido do rejeito, utilizando-se simulações com o software DAN-W. O resultado demonstra que a metodologia proposta, prevê volumes de ruptura com precisão superior a outras metodologias disponíveis. Há uma retro análise da propagação, decorrente da ruptura da Barragem do Fundão, com diferentes modelos numéricos e hipóteses de simulação. Realizaram-se



Figura 3: Comparação das manchas de inundação dos Cenários 1 e 2 (HEC-RAS 1D - aquoso e hiperconcentrado) apresentados por Machado (2017).

simulações hidráulicas, referentes ao evento, totalizando 7 (sete) cenários, que variam entre fluidos aquosos e hiperconcentrados (Figura 3), utilizando-se modelagens hidráulicas uni e bidimensionais, bem como programas HEC-RAS e FLO-2D, simulando fluidos aquosos e não Newtonianos, com parâmetros reológicos obtidos com reômetros e testes de slump. Os resultados, destas simulações, indicaram ser perceptível que a diminuição da vazão é maior, quando há aumento do valor da viscosidade do fluido. O tempo, para máxima profundidade, também é superior em consequência de menores velocidades observadas no fluido, com grande carregamento de partículas sólidas em suspensão.



Figura 4: A ruptura deste reservatório de rejeitos liberou cinco milhões de metros cúbicos de rejeitos de mineração em cursos d'água locais.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE FILHO, Luiz Heleno. Avaliação do comportamento geotécnico de barragens de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de Piezocone. 2004. 194f. Dissertação (Mestrado), Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.
- ALVES, Henrique Oliveira. Estudo comparativo de duas técnicas de lavra em barragem de rejeito sob o ponto de vista geotécnico. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, 132f, 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D2850: Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils. 2007.
- ANCOLD. Australian National Committee on Large Dams. Guidelines on Tailings Dam Design, Construction and Operation. 1999.
- ANM – Agência Nacional de Mineração: Informe Mineral de 2019. Disponível em: < www.gov.br/anm/pt-br />. Acesso em: 30 setembro 2020.
- Armstrong, M., Petter, R., & Petter, C. (2019). Why have so many tailings dams failed in recent years?. Resources Policy, 63, 101412. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101412>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13028.: Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água. Rio de Janeiro, 2006.
- BITTAR, R. J. Caracterização tecnológica de rejeitos de fosfato e análises de estabilidade da barragem de rejeitos B5 da Bunge Fertilizantes S/A. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós Graduação em Geotecnia, NUGEO, UFOP, 251f, 2006.
- BOSSI, E. T. Avaliação do efeito da percentagem de finos no comportamento geotécnico de rejeitos de minério de ferro. Dissertação (Mestrado), Curso de Mestrado em Geotecnia e Transporte, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 148f, 2015.
- CARMO, F. F.; KAMINO, L. H. Y.; JUNIOR, R. T.; CAMPOS, I. C.; CARMO, F. F.; SILVINO, G.; PINTO, C. E. F. Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. Perspectives in ecology and conservation, 15(3), P. 145-151, 2017.
- CARVALHO, W. D. S. Sistema de disposição compartilhada de estêreis e rejeitos desaguados da mina de Fernandinho. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, 163f, 2017.
- CASTILHO, B.M. Análise dos gatilhos de liquefação dinâmica e modelagem numérica da Barragem do Germano. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós Graduação em Geotecnia, NUGEO, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 116f, 2017.
- CBC News – Mine Tailings
- CASTRO, G. Liquefaction of sands. PhD Thesis, Havard University, Cambridge, Massachusetts, 1969.
- CAVALCANTE, A. L. B. Modelagem e Simulação do Transporte por Arraste de Sedimentos Heterogêneos Acoplado ao Mecanismo de Tensão-DeformaçãoPoropressão Aplicado a Barragens de Rejeitos. Tese (Doutorado), Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 258f, 2004.
- D'AGOSTINO, L. F. Praias de barragens de rejeitos de mineração: características e análise da sedimentação. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, 2008.

O FUTURO DAS BARRAGENS DE REJEITOS

Figura 1: O reaproveitamento de barragens de rejeitos, exige conhecimentos geotécnicos para sua efetivação.

A indústria da mineração produz grande quantidade de rejeitos, e este aumento da produção torna necessária

a ampliação e o reaproveitamento das áreas para sua disposição. As propriedades destes materiais dependem diretamente de sua disposição final. Em todo o mundo, objetiva-se melhorar a segurança e desempenho destas obras geotécnicas, projetadas com o propósito de armazená-las possibilitando, ainda, prepará-las para futuros reaproveitamentos, o que pode exigir desmontes seguros. O ganho de consistência na condição do rejeito, traduz-se em resistência ao cisalhamento e rigidez, podendo ser transportado, reaproveitado ou reintegrado ao meio ambiente. O dimensionamento do depósito do rejeito, e mesmo sua vida útil, dependem do conhecimento e da correta previsão do comportamento dos parâmetros compressibilidade e condutividade hidráulica do material. Para rejeitos de granulometria fina, onde o processo de consolidação não é governado pelos princípios da teoria clássica de Terzaghi, torna-se necessário a utilização de uma teoria adequada exigindo-se, também, métodos e técnicas de ensaios apropriados, pois os materiais

são lançados com elevados índices de vazios e submetidos à consolidação com grandes recalques, governada pela teoria de grandes deformações. Assim, objetiva-se dar segurança ao material depositado e, principalmente, seus diques de contenção, estabilizando-os, de modo a possibilitar, inclusive, a lavra do rejeito depositado nas barragens, como alternativa à desativação e/ou manejo, delineando-se reduzir os passivos ambientais da indústria da mineração, diminuindo-se seus custos operacionais e aumentando-se a capacidade de disposição. O melhoramento do solo mole-muito mole, na forma de rejeito, objetiva a lavra e o desmonte de barragens, com foco na segurança geotécnica, oferecendo ao empreendedor e demais partes interessadas, a garantia da viabilidade técnica desse tipo de operação, única forma de se concretizar o aproveitamento, em larga escala, do material depositado, mudando a conotação de passivo ambiental dessas estruturas para "jazidas potenciais". Na busca pela exploração de forma sustentável que integre, de forma transparente, as dimensões ambiental, econômica e social, projeta-se o melhoramento do solo, das barragens, inserindo-se critérios para avaliação da segurança das operações, garantindo sua viabilidade técnica, alternativa real para seu descomissionamento, em face da deficiência/inexistência de legislação específica. Assim, o reaproveitamento das barragens de rejeitos, passa a ter foco geotécnico, com a solução do melhoramento do solo abordando-se, não apenas aspectos de segurança, ligados ao dimensionamento dos taludes das escavações, mas outros também relevantes, como intrínsecas investigações de campo e laboratório, de forma a viabilizar aproveitamento econômico do rejeito, chamado "finos das barragens".

GLOSSÁRIO

Liquefação

- Grande redução representativa da resistência do solo, tipicamente arenoso, causado por choque ou outro tipo de deformação. É associado com o aumento representativo, mas temporário, da poropressão, envolvendo a transformação temporária do solo em massa fluida.
- Transformação do solo arenoso, do estado sólido para o liquefeito, como consequência do aumento da poropressão idealizada por vibrações.

Viabilidade econômica do rejeito de minério de ferro depositado em barragens

A partir dos anos 1970, diversas barragens para contenção de rejeitos de mineração de ferro, foram construídas na região do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais, com atendimento às legislações e minimização do impacto ambiental. Devido a questão relacionada à redução do custo operacional, muitas barragens foram construídas com a técnica do aterro hidráulico, metodologia bastante difundida em projetos de barragens de mineração, onde o próprio rejeito é utilizado como material de construção. Devido à predominância da lavra de minérios hematíticos (alto teor de ferro) e pela baixa efi-

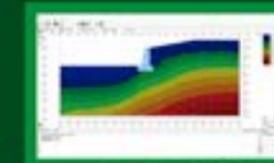
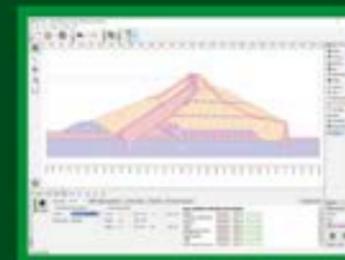


Figura 2: Desenvolvimento da lavra em "tiras".

GE05

Software de Geotecnia para uma vasta gama de análises:

-  Análise de Estabilidade
-  Escavações e Contenções
-  Muros e Gabiões
-  Recalque
-  Sondagens de Solo
-  Túneis e Poços
-  Estudos geológicos
-  Muros e Gabiões



AVALIE GRATUITAMENTE

Solicite: comercial@solucoescad.com.br

Distribuído por:

SOLUÇÕES CAD BIM

www.solucoescad.com.br

ciência dos processos utilizados até o fim da década de 1990, o rejeito depositado em algumas barragens do Quadrilátero Ferrífero, são extremamente ricos, com teores de ferro variando de 35% a 55%, superando os teores de jazidas da Formação Ferrífera Itabiritos, em exploração (em torno de 42%). Com as jazidas de hematitas, do Quadrilátero, chegando ao fim, e iniciando-se a era da exploração maciça dos itabiritos, os "finos das barragens" têm se mostrado uma opção atraente, no que se refere ao custo de remoção e beneficiamento, quando comparado ao custo de extração e beneficiamento do minério itabirítico. O reprocessamento dos rejeitos, também é interessante em termos operacionais, já que possui uma etapa a menos, quando comparado ao ciclo da mina, dispensando-se a remoção do material estéril (baixo teor de ferro para o tratamento), o que também implica redução de custos. Pela dificuldade de se retirar o rejeito de dentro dos reservatórios, a escala de aproveitamento dos "finos de barragens" é reduzida. As atuais operações são pontuais, com o material sendo removido por meio da utilização de escavadeiras e caminhões, que adentram os reservatórios das barragens, paralisadas ou mesmo em operação e removem todo ou parte do rejeito depositado. Neste cenário, a segurança do desmonte de uma barragem, é variável crucial na tomada de decisão no projeto de reaproveitamento. Um acidente (ruptura) em uma barragem, em processo de lavra, inviabiliza a continuidade das operações, trazendo inúmeros prejuízos. Incidentes geotécnicos, ocorridos durante tentativas de retomar o rejeito depositado, em barragens, podem ser exemplificados nas Figuras ao lado.



Ruptura ocorrida em acesso sobre rejeito.



Corrida de lama sobre equipamento durante operação de lavra.



Escavação início da lavra após o término do processo de melhoramento do solo.

Figura 3,4 e 5: Sequencia de fotos, onde verifica-se a necessidade do melhoramento do solo para efetivar-se o desmonte.



Figura 6: Corrida de lama sobre equipamento durante operação de lavra.

Em geral, o rejeito com alto teor e, conseqüentemente, maior potencial de reaproveitamento encontra-se em barragens construídas pela técnica de aterro hidráulico, compreendendo estruturas complexas, que demandam cuidados maiores, em sua

operação de lavra e retomada do rejeito. Os critérios de projeto, utilizando essa técnica, são muito bem definidos e de conhecimento geral. As incertezas, quanto ao comportamento geotécnico dessas barragens, quando submetidas à operações de

lavra são grandes, pois as etapas do desmonte, para a remoção do reservatório, modificam diversas condições de contorno, consideradas no projeto, gerando novos estados de tensão, podendo levar uma barragem, em processo de lavra, a uma situação crítica de segurança.

O Descomissionamento

A destinação final das barragens após o ciclo de exploração de uma mina é uma preocupação corriqueira das empresas de mineração, agências reguladoras e órgãos ambientais. Na ausência de legislação específica para a desativação de barragens, a Resolução ANM nº 4, de 15 de fevereiro de 2019, que proíbe a utilização do método de alteamento "a montante", em todo o território nacional, fixa prazos para concluir a elaboração do projeto técnico executivo de descaracterização dessas estruturas, juntamente com a Reso-



Figura 7: Barragem de rejeitos. A preocupação para o uso futuro da área.

lução ANM nº 13, de 8 de agosto de 2019, que estabelece critérios técnicos para descaracterização das barragens de montante, estabelecendo prazos para o término de implantação dos projetos de descaracterização, representam avanços significativos, mas que ainda deixam a cargo do empreendedor e a consultora de projetos, decidir quais medidas serão tomadas, abrindo espaço para discordâncias entre as partes interessadas sobre a eficácia das ações tomadas para o fechamento de uma estrutura. A NBR 13028/2017, que trata da elaboração e apresentação de projeto de barragens, para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reserva de água, do ponto de vista de descomissamento, exige que o extravasor da etapa de desativação seja dimensionado para a Precipitação Máxima Provável (PMP) e que um plano de desativação, seja elaborado quando o uso futuro da área esteja definido. A reabilitação convencional, da barragem de rejeitos, envolve a colocação de uma cobertura de solo na superfície do rejeito, devendo apresentar capacidade de carga adequada, para não gerar problemas pós-fechamento. Assim, muita atenção para o dimensionamento da camada de proteção, devendo-se levar em consideração o clima, a natureza física e química do rejeito, a concentração de sólidos no depósito e o uso futuro da área pós-mineração ou sua função ecológica.

A sequência, apresentada nas Figuras abaixo, ilustra a forma do barramento durante a lavra, até a completa descaracterização.



Avanço da lavra com o rebaixamento do nível d'água e formação de taludes.



Início da lavra.



Lavra finalizada.

Aproveitamento do rejeito (finos de barragens)

Para a verificação da possibilidade do aproveitamento do rejeito, faz-se necessária sua caracterização tecnológica (caracterização mineralógica, granulométrica, química e ensaios tecnológicos específicos para um determinado emprego). Considera-se a necessidade de simular-se da aplicação de processos de concentração, pois pode aumentar o aproveitamento direto do rejeito, obtendo-se até produtos dentro de especificações comerciais, associando-se a viabilidade da recuperação do rejeito a alguns fatores, como o teor de minério, seu preço, o custo da exploração, escala de extração, eficiência do processo e reservas globais do minério.

Problemas relacionados à lavra de barragens de rejeitos.

Critérios para a elaboração de projetos de barragens de rejeitos, principalmente quando construídas pela técnica do aterro hidráulico, são muito bem definidos, contudo, quando o processo é o inverso, caracterizado pelo seu desmonte, visando-se seu reprocessamento, poucos estudos estão disponíveis. As dúvidas, quanto à condição da segurança geotécnica, representam um impasse na evolução do projeto de aproveitamento do rejeito, uma vez que a tecnologia de beneficiamento já existe e se

Figura 7: Exemplos de instabilidades durante o processo de lavra



(a) deslizamento em frente da escavação.



(b) ruptura por excesso de umidade em frente da escavação.



(c) ruptura por fluência em frente da escavação.

encontradisponível, ficando o receio dos empreendedores de investir em projetos, nos quais não se pode garantir a segurança das operações, dentro dos reservató-



Figura 8: Barragem de rejeitos, com material depositado com classificação de argila siltosa, de consistência mole, cor marrom escuro avermelhado.

rios e sua interferência na estabilidade. Conhecer os mecanismos geotécnicos envolvidos nas etapas de desmonte, e suas variáveis, contribui para o estabelecimento da metodologia que possibilita a gestão e avaliação da segurança da operação da lavra, dando ao empreendedor confiança para decidir quanto ao projeto para o reprocessamento do rejeito e o descomissionamento da barragem, concretizando-se o aproveitamento em larga escala, mudando a conotação de passivo ambiental para "jazidas potenciais". Isto possibilita empresas de mineração desenvolver projetos para o reprocessamento do rejeito do minério de ferro, com custos inferiores à lavra convencional, aumentando-se sua produtividade e lucratividade, contribuindo para o meio ambiente. O estudo de novas tecnologias, como o desmonte associado à lavra do rejeito, é uma excelente alternativa para descomissionamento de barragens de rejeitos, em face da abordagem superficial do tema pela legislação específica existente. Nesta linha, desenvolveu-se conhecimento teórico e prático, na área de melhoramento de solos, aplicado à mineração, analisando-se o conhecimento da mecânica do rejeito, referente à lavra de barragens, gerando referencial para o desenvolvimento de novos projetos de desmonte, assim como para novos projetos de barragens que venham a ser construídos pela técnica de aterro hidráulico.

A necessária consolidação na barragem de rejeitos

Para obter-se a tão desejada consolidação dos depósitos de rejeitos, de modo a assegurar-se ausência de deformações e a sonhada estabilidade, objetiva-se melhorar o solo, seguindo-se esta mesma teoria. Ocorre que, no mercado, por

desconhecimento, há técnicas de fundações que, em princípio, poderiam ser utilizadas. No entanto, quase nenhum benefício incorporam já que, no final das contas, formam-se apenas colunas e só, sem qualquer efeito e di-

reção à consolidação do rejeito, mesmo porque não oferecem nenhuma resistência a empuxos laterais. O georijecimento, técnica 100%, baseada na teoria da consolidação, é a alternativa natural, senão vejamos.

Colunas de brita

O comportamento de colunas de brita continua não compreendida por técnicas analíticas e numéricas, razão pela qual prever seu comportamento em solos muito moles é completamente inseguro, com inúmeros desafios específicos, como a falta de dados representativos, particularmente no campo das tensões entre a coluna de brita e o solo mole envolvente, as

alterações de médio e longos prazos impostas ao solo mole envolvente, ao redor das colunas, a ausência total de resistência à empuxos laterais, fundamental para este tipo de solução, além do efeito de longo prazo para questões das deformações por fluência. Provavelmente, a grande e eterna incógnita é a ausência de certificação. Esta técnica de fundação, sim, porque trata-se de elementos verticais idealizados para receber carga na ponta, transferindo-se para sua base, logo não se trata de melhoramento de solo. Outro aspecto contundente é a forma

traumática de execução que, para o caso de barragens de rejeitos não é adequada além, claro, da ausência de resistência cisalhante para seu confinamento, e para a sustentação da coluna (embarrigamento), quando da utilização de camisa de geotêxtil que, mesmo assim causará o desaprumo. O estudo recente, 2020, do processo de utilização de colunas de brita, realizado em solos moles, por Xin Tan, oferece mais detalhes acerca deste método de fundação. Esta técnica produz grande quantidade de refugo ou descarte.

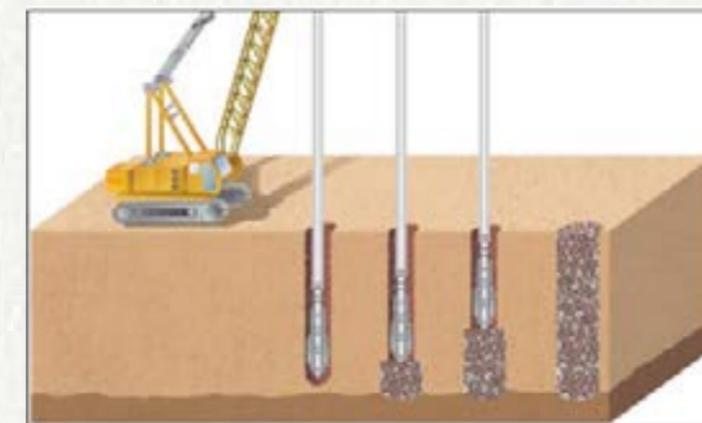


Figura 9: Sequência de coluna de brita, por vibro-substituição.

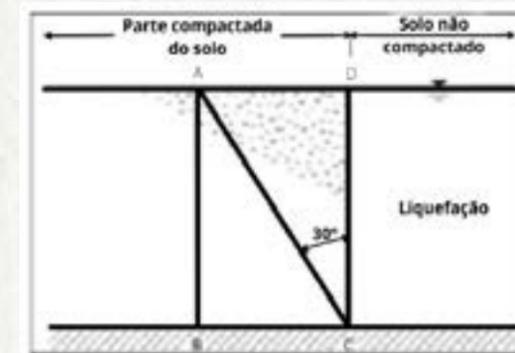


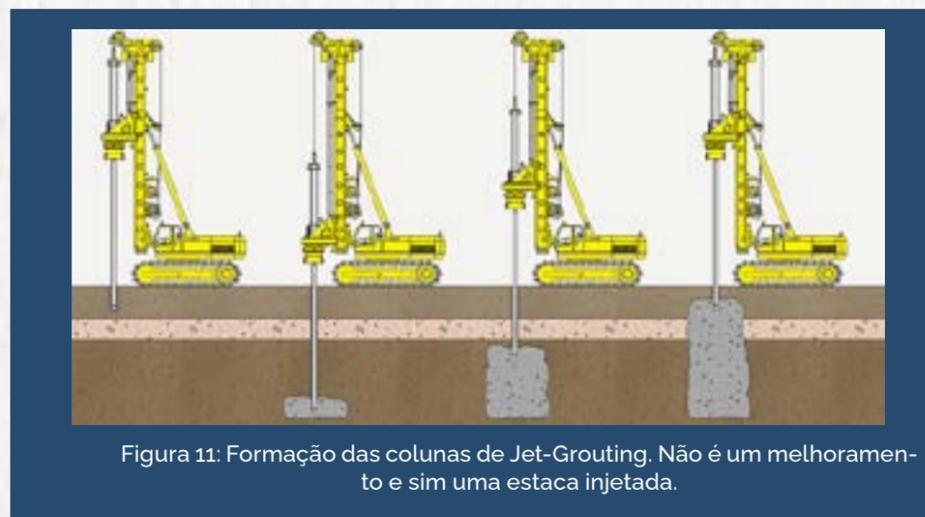
Figura 10: Observa-se o aumento da susceptibilidade à liquefação nas áreas adjacentes à formação das colunas (Kirch and Bell 2013).

DSM

Esta técnica de trabalho, Deep Soil Mixing, independentemente do método que emprega, à semelhança das colunas de brita, não é uma técnica de melhoramento de solos, exatamente pelo fato de que é uma técnica de fundação, que objetiva receber carga no seu topo, transferindo-a para a base, sobre solo resistente. Exatamente, estabelece elementos verticais, ficando o solo mole/muito mole ao redor. A presença de ácidos, acompanhado de substâncias químicas tóxicas, sem dúvida, tornarão a ação do cimento, para aglutinar o "solo", uma tarefa inglória, já que interfere profundamente nas reações químicas com o aglomerante empregado. Aqui, também, questiona-se o método de certificação, assim como a ausência de resistência do conjunto de colunas formadas, objetivando-se a estabilidade para grandes empuxos laterais e a nova condição deformativa, do rejeito mole/muito mole, situado ao redor das colunas. Esta técnica produz grande quantidade de refugo ou descarte.

Jet Grouting

Este método de trabalho também é uma técnica de fundação, e não de melhoramento de solos, já que objetiva criar colunas, ficando o solo mole/rejeito ao redor. Produz grande quantidade de refugo ou descarte.



Geoenrijecimento (CPR Grouting)

Trata-se de uma técnica de melhoramento efetiva de solos moles/rejeitos, totalmente baseada na teoria da consolidação das argilas promovendo, previamente, a inserção de drenagem artificial, seguido da compressão do solo. O resultado é o aumento da rigidez e o melhoramento da resistência cisa-

lhante do material mole que, em contrapartida, ganha notável estabilidade e ausência de deformações. Apesar da técnica ser conceitualmente muito simples, seu estudo teórico e numérico revela-se extremamente complexo, pois envolve uma série de variáveis na modelagem geotécnica de cada obra, razão pela qual trata-se de uma patente obtida pela empresa que trabalha a quase 50 anos

com melhoramento de solos. Em linhas gerais, cravam-se geodrenos, seguindo-se da formação de verticais onde, com equipamento específico, adentra-se no solo e bombeia-se, de baixo para cima, uma argamassa seca especial, formando-se bulbos que impõe processo de compressão radial no solo, via expansão de cavidades, possibilitando sua



da resistência e da rigidez do solo, conforme previamente dimensionado.

Uma análise final

Em todas as fases de um projeto de barragem de rejeitos, torna-se necessário adequar ou readequar a condição do solo, seja antes de iniciar sua deposição, seja durante o alteamento ou após, para o reaproveitamento do rejeito. Melhoramento de solo, entenda-se, significa restabelecer, aprimorar ou fazer crescer os parâmetros geotécnicos, através das propriedades físicas e me-

cânicas dos materiais envolvidos, na barragem de rejeitos, de modo a oferecer a estabilidade necessária e, claro, a rigidez específica. A técnica de melhoramento de solos, deve seguir 100% as diretrizes técnicas da teoria da consolidação da argila, única forma de chegar aos objetivos desejados. O melhoramento do solo, com geoenrijecimento impõe, previamente a drenagem necessária, seguindo-se



Figura 13: Cravação de geodrenos e a formação de bulbos de compressão do solo. Trata-se do melhoramento do solo com geoenrijecimento.

drenagem pelos geodrenos, previamente cravados. O resultado é a consolidação acelerada de todo o solo tratado, tornando-se um maciço. O processo de certificação, é feito através de ensaios pressiométricos, em conjunto com tomografia do solo por imagem, onde obtém-se antes e após, parâmetros geotécnicos

do processo compressivo, que permite consolidar o solo argiloso mole/ rejeito, seja para receber cargas, seja para melhorar a estabilidade ou para permitir escavações posteriores. Tudo isto, de forma viável, sem improvisos, ou paliativos, como técnicas de fundação à base de colunas que, via de regra, apenas servem para transferir cargas da superfície para profundidades maiores, sem nenhum compromisso com o processo de consolidação do rejeito que, efetivamente, é a única maneira de torná-lo estável. A desejada consolidação, é particularmente útil em situações de instabilidade de barragens, com alteamento de montante, ou condições similares, promovendo a estabilização da barragem, de jusante para montante, aumentando seu fator de segurança, sem risco associado, considerando-se que, a medida que evolui, garante-se mais e mais maciços e a desejada contenção, neutralizando empuxos laterais advindos de montante. Importante ressaltar que qualquer solução não deve apresentar qualquer processo de cravação ou vibração prejudicial. Uma vez melhorado o solo, só permite-se sua certificação, com ferramenta geotécnica caracterizada por ensaios de deformabilidade, tipo pressiometro, ensaios de placa, dilatometro e tomografia por imagem, exatamente pelo fato do solo melhorado ter dois componentes e não mais um, apenas. Razão pela qual, ensaios penetrométricos, tipo SPT, CPTu e palheta não conseguem analisa-los, conjuntamente. Desta forma, o melhoramento do solo é bem avaliado com, tomografia por imagem e, complementarmente com o pressiometro. Nestas imagens tomográficas, a seguir, verifica-se a presença de material mole, no início dos serviços, em uma barragem de rejeitos que, após o melhoramento, constata-se sua consolidação e estabilidade.

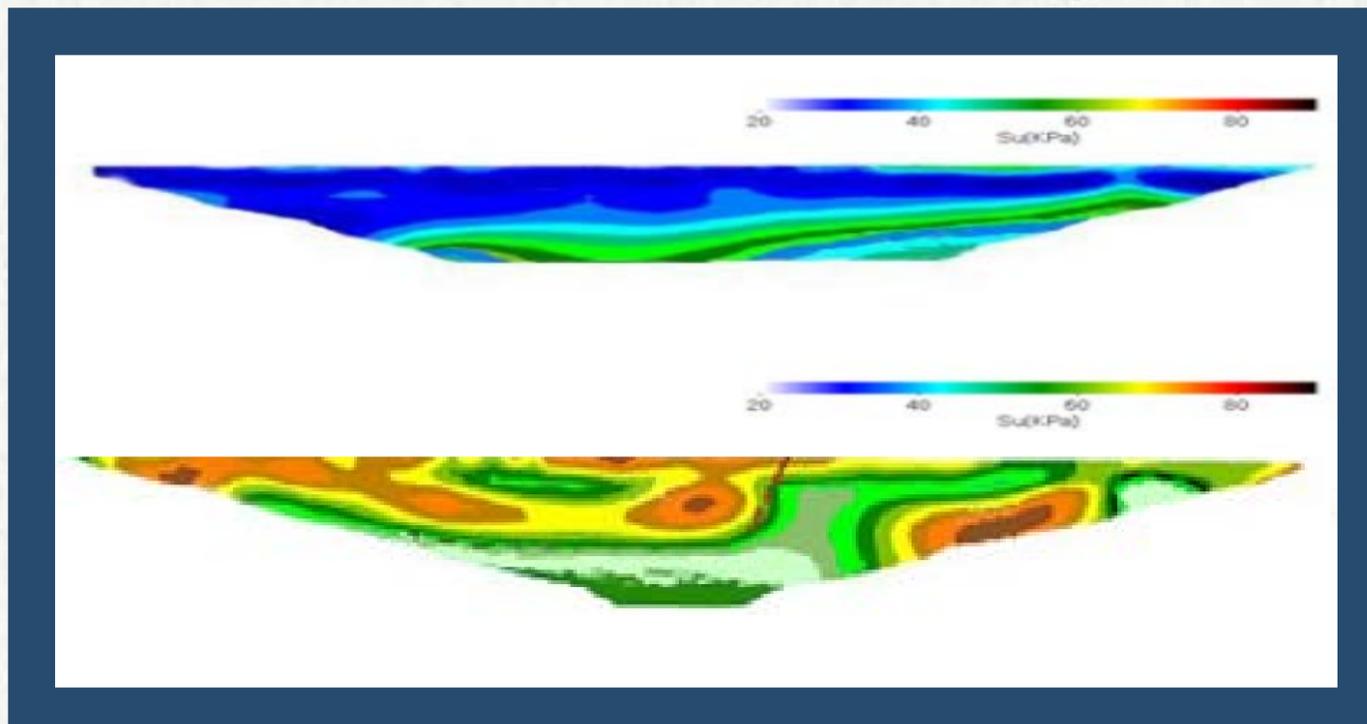


Figura 14: Tomografia por imagem, em uma barragem de rejeitos antes do melhoramento do solo e após. O aumento da resistência cisalhante garante a estabilidade necessária.

REFERÊNCIAS

- Thomas Kim é engenheiro civil e trabalha com melhoramento de solos moles.
- Gustavo Marçal de Maya. Proposta de metodologia para lavra de barragens de rejeitos de ferro construídas pela técnica de aterro hidráulico. UFOP 2020.
- AJAKA, E. O. Recovering fine iron minerals from Itakpe iron ore process tailing. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. Akure, Nigeria, v. 4, n. 9, p. 17-28, 2009.
- ALBUQUERQUE FILHO, Luiz Heleno. Avaliação do comportamento geotécnico de barragens de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de Piezocone. 2004. 194f. Dissertação (Mestrado), Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.
- ANCOLD. Australian National Committee on Large Dams. Guidelines on Tailings Dam Design, Construction and Operation. 1999.
- BOSSI, E. T. Avaliação do efeito da percentagem de finos no comportamento geotécnico de rejeitos de minério de ferro. Dissertação (Mestrado), Curso de Mestrado em Geotecnia e Transporte, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 148f, 2015.
- CARMO, F. F.; KAMINO, L. H. Y.; JUNIOR, R. T.; CAMPOS, I. C.; CARMO, F. F.; SILVINO, G.; PINTO, C. E. F. Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. Perspectives in ecology and conservation, 15(3), P. 145-151, 2017.
- CARVALHO, W. D. S. Sistema de disposição compartilhada de estéreis e rejeitos desaguados da mina de Fernandinho. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, 163f, 2017.
- CASTILHO, B.M. Análise dos gatilhos de liquefação dinâmica e modelagem numérica da Barragem do Germano. Dissertação (Mestrado), Programa de PósGraduação em Geotecnia, NUGEO, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 116f, 2017.

The logo for Soft Soil Brazilian Institute (SSBI) features the letters 'SSBI' in a bold, sans-serif font. The 'SS' is green, and the 'BI' is white with a green outline, all set against a dark green rounded rectangular background.

**SOFT SOIL
BRAZILIAN
INSTITUTE**

O SOFT SOIL BRAZILIAN INSTITUTE ajuda você e sua obra sobre solos moles

Melhorar solos moles exige conhecimentos geotécnicos práticos e teorias sofisticadas. Cada obra é um caso específico que exige solução diferenciada. Saiba como dimensionar o Geoenrijecimento do solo mole, através de planilha exclusiva. Basta acessar o link:

http://www.engegraut.com.br/geoenrijecimento/MC_v1.0.rar

softsoilbrazilianinstitute.com.br



PARCEIROS



SOLOTEST

GEOKON

SOLUÇÕES CAD
BIM

TRUSTED MEASUREMENTS

**AB
MS**

Leica
Geosystems



TROGERTEC

ENGEGRAUT

ROCTEST