

# Soft Soil Brazilian Review

## 4 Barragens de rejeitos

Definição e funcionalidade.

## 12 Solos moles

Impressões geotécnicas acerca da rutura da barragem do Feijão em Brumadinho.

## 18 Solos moles

Soluções adequadas para recuperação de barragens de rejeitos.

## LIÇÕES DA TRAJÉDIA DE BRUMADINHO

• BARRAGENS DE REJEITOS

• IMPRESSÕES GEOTÉCNICAS

• O CONTEXTO MUNDIAL

• SOLUÇÕES ADEQUADAS



## INFORMAÇÕES SOBRE MELHORAMENO DE SOLOS MOLES?

SOFT SOIL GROUP

**O SOFT SOIL GROUP ajuda você a tocar sucessos**

Melhorar solos moles exige conhecimentos geotécnicos práticos e teorias sofisticadas. Cada obra é um caso específico que exige solução diferenciada. Assista nossos Webinars para adquirir estas informações.



[www.softsoilgroup.com.br](http://www.softsoilgroup.com.br)

# Soft Soil Brazilian Review

Edição - Mai / Jun 2019 - Nº 05



A PRIMEIRA E ÚNICA REVISTA DIGITAL  
ESPECIALIZADA EM SOLOS MOLES.

BARRAGENS DE REJEITOS

### Definições e funcionalidade 04

Por Joaquim Rodrigues

SOLOS MOLES

### impressões geotécnicas acerca da rutura da barragem do Feijão em Brumadinho 12

Por Alessandra Cirone

SOLOS MOLES

### Soluções adequadas para recuperação de barragens de rejeitos 18

Por Patrícia Tinoco

## EDITORIAL

O rompimento da barragem em Brumadinho (MG), três anos após o de Mariana (MG), parece um filme de terror. A impressão que se tem, pelo noticiário da imprensa, nos dá sensação de que o programa de segurança de barragens, articulado pela Agência Nacional de Mineração (ANM) é inócuo. Na televisão, vemos que o governo só dispõe de alguns geólogos para fiscalizar cerca de 600 barragens de rejeitos que o DNPM mapeou no País. Está claro e tardio que torna-se necessário nova regulamentação, mais rigorosa sobre barragens de rejeitos.

Esta questão adquiriu contornos de calamidade pública no Brasil e, particularmente, em Minas Gerais. É hora de mobilizarmos todos os recursos disponíveis para fazer-mos uma abordagem imediata – retomando-se a iniciativa. Empresas de geotecnia, de todo o Brasil, deveriam articular-se de modo a montar-se uma força tarefa com notáveis especialistas, de modo a vistoriar barragens, considerado as de maior risco que, segundo se sabe, são cerca de cinquenta. Estes especialistas proporiam diagnósticos detalhados de cada uma delas, estabelecendo-se o início imediato das obras de melhoramento de solos, nos casos em que o risco é eminente. Evidentemente, sabe-se que o custo destes serviços é o maior entrave para tal. Mas, porque o BNDES não abre uma linha de crédito para financiar este trabalho.

Nossa engenharia geotécnica é uma das melhores do mundo. Temos a obrigação de interromper este ciclo de desastres, que afeta a todos nós.

Joaquim Rodrigues

# BARRAGENS DE REJEITOS. DEFINIÇÃO E FUNCIONALIDADE.

Figura 1- Quatro das 24 barragens de rejeitos de minérios existentes na Bahia possuem classificação idêntida à da barragem do Fundão, que rompeu recentemente em Mariana, MG.

**B**arragens são feitas para, normalmente, conter água e, quando rompem promovem consequências catastróficas. Felizmente, nos últimos 40 anos, há casos raríssimos. Não é o caso das barragens de rejeitos que, infelizmente, apresentam casos de rutura cada vez mais frequentes. Engenheiros geotécnicos podem, então, formular a seguinte questão: Com o conhecimento que temos, sobre barragens tradicionais, é possível melhorar a segurança de barragens de rejeitos?



Diferentemente das barragens de contenção d'água, onde paramentos são construídos de concreto ou com alguma combinação de solo e enrocamento, barragens de rejeitos são construídas com projetos que dependem, essencialmente, do tipo de refugo a ser criado para, então, utilizá-lo em sua construção. Outra grande diferença en-

tre uma barragem de contenção d'água e a de rejeitos é que a primeira é construída com uma altura definida, formando um determinado lago e, a seguir, operada. Barragens de rejeitos, por sua vez, são construídas de maneira que seu crescimento será, sempre, uma opção, durante décadas, até definir-se sua altura final, podendo coin-

cidir, com o tempo de vida da mina. Durante todo este tempo, o processo de estocagem do rejeito pode apresentar alguma diferença, basicamente com relação à operação e o gerenciamento, estabelecendo-se condições geotécnicas diferenciadas, tanto para o sistema de construção quanto para o solo de funda-



Figura 2 - Barragem de rejeitos da CSN.

ção. Uma outra diferença marcante entre os dois tipos de barragens é que a que contém água é considerada um ativo, tipicamente para uso comum, enquanto o rejeito é visto, simplesmente, como contenção de custo.

### Terminologia

O rejeito da mina é o refugo da extração do minério, incluindo-se produtos químicos tóxicos utilizados na fase de refinamento. A maioria das barragens de rejeitos são tóxicas e, portanto, devem ser mantidas isoladas do ambiente. A escala de produção do rejeito é imensa, já que a extração do metal é, geralmente, de poucos quilos para cada tonelada de extração. O volume e a composição do rejeito dependerá do método de mineração. No caso das minas de extração de ferro, o rejeito final é na forma de lama.

### O rejeito

A eliminação do rejeito é, sem dúvida, a principal preocupação ambiental das minas de extração de ferro já que, no final das contas, cria passivos ambientais de longo prazo, que nossa geração futura deverá gerenciar. Muitas barragens de rejeitos, com o passar do tempo, podem tornar-se



Figura 3 - Barragem de Congonhas em Minas Gerais, tem cerca de 76 metros de altura e capacidade de 50 milhões de metros cúbicos de rejeitos.

menos seguras, considerando-se mudanças geotécnicas que possam ocorrer ao longo da barragem e no seu entorno. A condição de grandes barragens de rejeitos, contendo lama, apresenta condição de manutenção mais cara, considerando-se os riscos inerentes.

### Entendendo a rutura de uma barragem

Barragens são grandes estruturas que, quando rompem, ocasionam tragédias am-

biental e humana. Barragens que contém água rompem numa taxa anual de 1 a cada 10.000 existentes, considerando-se inclusive pequenas barragens. Barragens de rejeitos, em um estudo de 2010, rompem com muito mais frequência, a uma taxa anual de 1 para cada 1.000 existentes, ou seja, no mundo todo de 3 a 4 barragens de rejeitos rompem todo ano. Esta taxa pode ser bem maior, já que há suspeitas de que muitas ruturas, em diversos países, não são noticiadas. O fato é que barragens de rejeitos, quando rompem, sua lama flui mais



### COMO FUNCIONA UMA BARRAGEM

A barragem de contenção de rejeitos é uma estrutura usada para diminuir o impacto da mineração

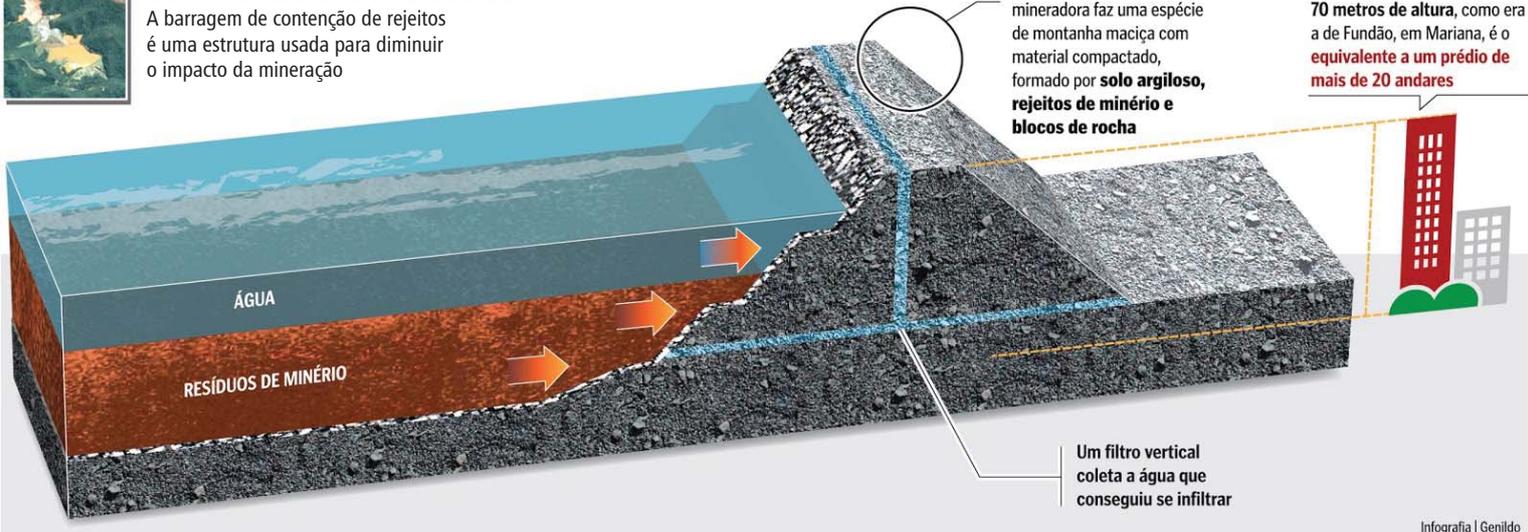


Figura 4 - Esquema da barragem de rejeitos de minério como é concebida para a funcionalidade. Construída com os próprios resíduos, torna-se difícil de proceder sua certificação. Fonte: Genildo Ronchi

lentamente que a água o que, conseqüentemente, não é tão catastrófico. No entanto, pelo menos ambientalmente, o estrago é muito pior, tanto para o solo, rios e seres humanos. Considerando-se que barragens de rejeitos começaram a ser construídas, massivamente, de 50 anos para cá, há bem mais experiência geotécnica em relação a

barragens tradicionais. Exemplos sequenciais de ruturas de barragens de rejeitos são facilmente obtidas na internet:

- Buffalo Creek, West Virgínia em 1972 – A rutura da barragem matou 125 pessoas e destruiu 500 casas.
- Churck Rock, no México em 1979 –

Derramamento de rejeito de urânio, atingiu o rio Porto Rico contaminando-o.

- Ajka Alumina, Hungria em 2010 – Rutura de barragem provocou o vazamento de lama vermelha cáustica, atingindo uma cidade, matando 10 pessoas.
- Mout Poley, Canada em 2014 – A rutura da barragem, felizmente, foi contida por

Infografia | Genildo

## Inclinômetro para a condição horizontal e inclinada?

Este equipamento mede, precisamente, deslocamentos verticais (recalques ou levantamentos) ao longo de uma horizontal sob aterros. Opera com torpedo horizontal. Atua com bluetooth e smart phase.



Este outro inclinômetro é equipado com sensor de inclinação para taludes de até 45°, informando sua inclinação, assim como em paredes de contenção, barragens, etc. Opera com bluetooth e smart phase.



Para maiores informações, acesse: <http://www.softsoilgroup.com>



Figura 5 - Barragens da INB em Poços de Caldas acumulam lixo nuclear (Foto: Reprodução arquivo Jornal Nacional).

dois lagos a jusante, em contraste com a ruptura de Bento Rodrigues, em Minas Gerais.

A grande questão da segurança de barragens de rejeitos é a periodicidade de inspeções, associada à instrumentação

geotécnica pertinente, particularmente a medição da poropressão em diferentes profundidades e deformações horizontais feias com inclinômetros, sem o qual não há como certifica-la. O acompanhamento por engenheiro geotécnico qualificado, por empresa independente da mineradora, é exigência obrigatória. Toda barragem de rejeitos deve ser classificada com base nas consequências de sua ruptura, na segurança do pessoal da mina, da população à jusante, do ambiente, das propriedades e de toda infraestrutura pertinente. Ou seja, quanto maior for as consequências, maiores as exigências, principalmente a frequência das inspeções e requisitos de preparação do plano emergencial.

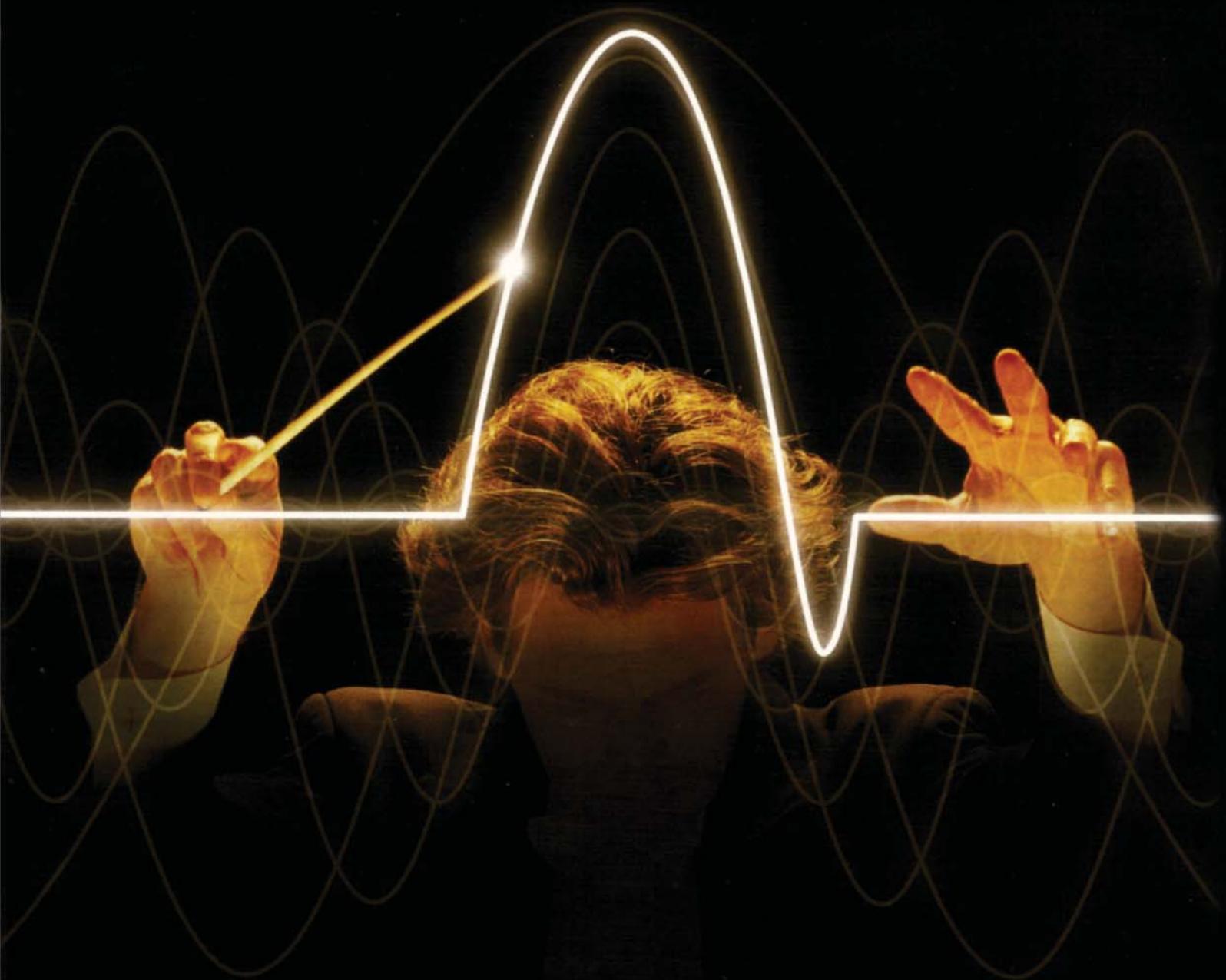


Figura 6 - O S11D, maior projeto de mineração da Vale em termos de custo, volume e qualidade, localizado em Canaã dos Carajás, irá inovar ao usar a tecnologia que reduz a quase zero o uso de recursos hídricos. O processamento de minério de ferro ocorrerá a partir da umidade natural sem o uso de água do processo convencional, diminuindo os impactos ambientais.

#### REFERÊNCIAS

- **Joaquim Rodrigues** é engenheiro civil M.Sc. formado no Rio de Janeiro em 1977, pós-graduado pela COPPE na Universidade Federal do Rio de Janeiro em 1999. 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 CPR Grouting, utilizada hoje em todo o Brasil. Desenvolvimento de trabalhos de Grouting, com empresas parceiras nos EUA e Alemanha. Mais de um milhão de metros quadrados de verticais de geoenrijecimento executadas em solos moles com CPR Grouting, para a construção de aterros, estradas, portos, ferrovias e armazenagem.

Soft Soil Group  
Apresenta



# Webinars de solos moles

Para maiores informações, acesse: <http://softsoilgroup.com.br/webinar>  
ou envie um e-mail para: [atendimento@softsoilgroup.com.br](mailto:atendimento@softsoilgroup.com.br)

SOFTSOIL BRAZILIAN REVIEW • Maio / Junho 2013



## GEOENRIJECIMENTO DE SOLOS PARA FERROVIAS

Eng. Roger Rodrigues

No Brasil, o deficiente sistema ferroviário, ainda assim, desempenha papel significativo no transporte de bens para portos, através dos poucos corredores existentes. Trilhos de trens são, convencionalmente, assentados sobre plataformas compostas por sistema de lastro e sublastro compactados que, por sua vez, estão assentados em subleito adequado.

O sublastro é composto pelo solo natural de fundação, aterro ou combinação de ambos, com objetivo de promover fundação estável à ferrovia. A presença de depósitos de solos moles, impõe grandes volumes de argilas plásticas e matéria orgânica, que mantém ou sustentam excessos de poropressão promovidos por carregamentos estáticos e cíclicos (repetidos). Este excesso de poropressão diminui, drasticamente, a capacidade de carga do solo de fundação, conduzindo-o a processos de deformação e até de ruptura.

A funcionalidade de uma ferrovia difere de rodovias, na medida em que a passagem do trem promove oscilações amortecidas no solo. Este nível de deformações,



O lastro é a camada de material granular que fica entre o sublastro e os dormentes, mantendo a superestrutura drenada, distribuindo a pressão exercida pelos dormentes à infra-estrutura. Trecho de ferrovia executada no Porto do Itaqui, São Luís, MA, após o melhoramento do solo com Geoenrijecimento.

a longo prazo é, significativamente, influenciado pela quantidade de oscilações, descritas em termos de aceleração de partículas ou, principalmente, velocidades. A amplitude dessas oscilações dependerá, principalmente, da rigidez do solo e da velocidade do trem. Quanto menor a rigidez do solo, portanto, maior é a amplitude da oscilações (Kramer, 1996). Ou seja, para reduzir-se as oscilações impostas ao solo pela ferrovia, torna-se necessário aumentar sua rigidez com melhoramento do solo. Para se investigar e comprovar a resposta dinâmica do solo melhorado, dependente da velocidade imposta pela ferrovia, com

a influência do melhoramento do solo imposto, executa-se análise numérica específica, considerando-se os parâmetros finais do solo.

Neste particular, o geoenrijecimento é a melhor solução, já que seu processo de formação de bulbos de compressão radial do solo, com geogROUT, via expansão de cavidades, promove aumentos planejados da rigidez. A seguir, apresentaremos casos de construção e recuperação de ferrovias sobre solos moles, com melhoramento à base de geoenrijecimento, tanto para construção como para correção de recalques.

## SUBSTITUINDO SOLO?



Existe maneira mais moderna, inteligente e barata para consolidar solos moles em grandes áreas.

# GEOENRIJECIMENTO

ENEGRAUT  
40 ANOS

*Soft Soil Improvement*

www.engegraut.com.br  
contato@engegraut.com.br  
tel: 21 - 3154-3250

Soft Soil  
Group

## SOFT SOIL GROUP

Rua Correia de Araújo, 131 - Barra da Tijuca  
Rio de Janeiro/RJ - Brasil - CEP 22611-070  
Tel.: (21) 3154-3250 • Fax: (21) 3154-3259

WEBSITE: <http://www.softsoilgroup.com.br>

E-mail: [contato@softsoilgroup.com.br](mailto:contato@softsoilgroup.com.br)

## SOFT SOIL BRAZILIAN REVIEW

### Diretor Editorial

ENGº JOAQUIM RODRIGUES

[joaquim@softsoilgroup.com.br](mailto:joaquim@softsoilgroup.com.br)

### Diretor Adjunto

ENGº ALESSANDRO CIRONE

[alessandro@softsoilgroup.com.br](mailto:alessandro@softsoilgroup.com.br)

### Publicidade

PATRICIA TINOCO

[patricia@softsoilgroup.com.br](mailto:patricia@softsoilgroup.com.br)

### Assinatura, Livros e Vídeos

CLEIDE FERREIRA

[cleide@softsoilgroup.com.br](mailto:cleide@softsoilgroup.com.br)

### Editor de Arte

ALEX CRISPIM

### Reprints Editoriais

MARIANA TATI

[mariana@softsoilgroup.com.br](mailto:mariana@softsoilgroup.com.br)

Solicite reimpressões de reportagens

ou artigos publicados

“Soft Soil Brazilian Review” é uma revista digital  
com publicação bimestral.



1 a 3 de Maio, 2019

### **SuperPile '19**

**Seattle, Washington/EUA**

<http://www.dfi.org/dfieventlp.asp?13350>

27 a 21 de Maio, 2019

### **6º Curso Internacional de Monitoramento Geotécnico e Estrutural**

**Roma - Itália**

<https://www.geotechnicalmonitoring.eu>

29 e 30 de Maio, 2019

### **Conferência em Tecnologia de Fundações 2019**

**Vitória - ES**

[abms.es@gmail.com](mailto:abms.es@gmail.com)

16 e 17 de Maio, 2019

### **CBPE 2019 - XI Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas**

**São Paulo - SP**

<http://www.abece.com.br/>

4 a 6 de Junho, 2019

### **SEFE 9 - Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia**

**São Paulo - SP**

<https://www.sefe.eng.br/inscricoes/faca-sua-inscricao>

13 e 14 de Junho, 2019

### **GeoRS – Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul**

**Santa Maria - Rio Grande do Sul**

<https://www.geors2019.com.br/>

14 a 16 de Agosto, 2019

### **Regeo 2019 (IX Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental) e o Geossintéticos 2019 (VIII Congresso Brasileiro de Geossintéticos)**

**São Carlos - SP**

<http://www.regeossinteticos2019.com.br/>

20 a 25 de Setembro, 2019

### **ISRM 2019 - International Congress of Rock Mechanics**

**Foz do Iguaçu - PR**

<http://www.isrm2019.com/message.php>

29 de Setembro e 2 de Outubro de 2019

### **3rd International Conference on Information Technologies in Geo-Engineering**

**Guimarães - Portugal**

[3rd-icitg2019.civil.uminho.pt](http://3rd-icitg2019.civil.uminho.pt)

14-18 de outubro de 2019

### **XVI Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering**

**Chinese Taipei, Taipei**

[www.16arc.org](http://www.16arc.org)

17 a 20 de novembro de 2019

### **XVI Congresso Pan-Americano de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**

**Cancún - México**

[panamerican2019mexico.com](http://panamerican2019mexico.com)

# IMPRESSÕES GEO TÉCNICAS ACERCA DA RUTURA DA BARRAGEM DO FEIJÃO EM BRUMADINHO

Figura 1 - Proibiu-se a construção e o alteamento de barragens de rejeitos, do tipo que rompeu em Brumadinho. A resolução foi publicada em 18/02/2019, no Diário Oficial da União, pelo Ministério de Minas e Energia, e a Agência Nacional de Mineração.

O rompimento da barragem do Córrego do Feijão, na cidade de Brumadinho, em Minas Gerais, pertencente à Vale, que rompeu no dia 25 de janeiro de 2019, é um clássico exemplo de ruptura de talude seguida de liquefação do material.

A barragem começou a operar nos anos 70 e encontrava-se desativada desde 2015. A estrutura da barragem tinha área total de aproximadamente 27 hectares e 86 metros de altura. O método de construção utilizado foi o alteamento para montante, com despejo de rejeito na barragem através de tubulação, adicionando-se considerável parcela de água



Figura 2 - Barragem do córrego do Feijão, antes da ruptura.



para facilitar o transporte e decantação do rejeito. O próprio rejeito de minério de ferro serviu como base para o alteamento de diques sucessivos, elevando-se a altura do reservatório.

O grande rompimento ocorreu de forma abrupta envolvendo a quase totalidade do paramento frontal e evoluiu rapidamente numa corrida de lama altamente destrutiva. Analisando-se os vídeos do acidente, fica evidente que a ruptura foi do tipo circular, iniciando na base da barragem, propagando-se para dentro e para cima, por cerca de 500m ao longo da crista. Após este primeiro escorregamento rotacional, houve liquefação do material rompido,



Figura 3 - Imagens da mina adquiridas por satélite antes (14/01/2019) do acidente.

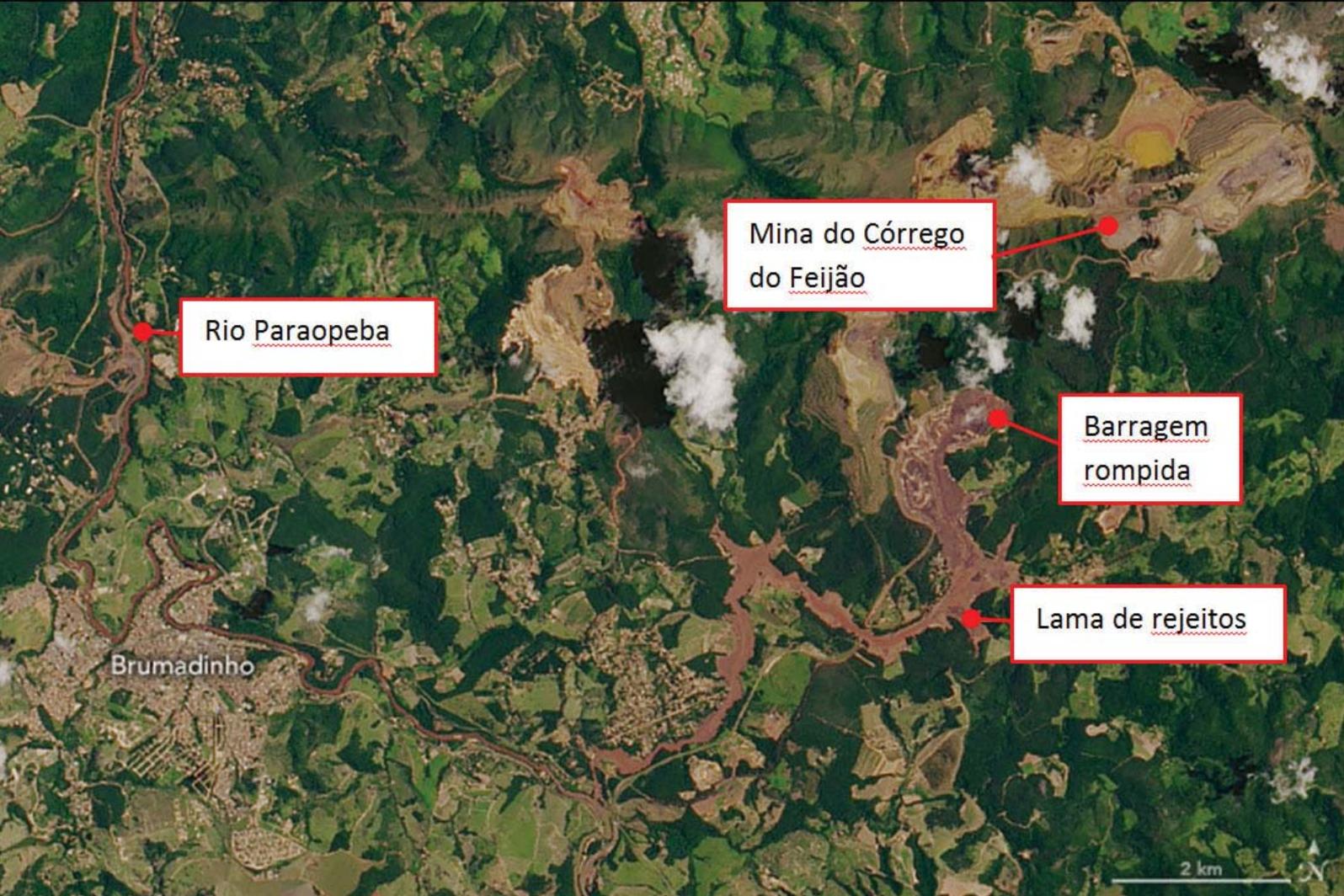


Figura 4 - Imagens da mina adquiridas por satélite depois (30/01/2019) do acidente mostram a extensão da onda de lama.

promovendo uma corrida de lama que investiu contra tudo existente a jusante da barragem. Segundo a Vale, 12 milhões de metros cúbicos de rejeito vazaram.

A aparência pós-ruptura foi de uma onda de lama que cobriu tudo pelo caminho. A Figura 6 mostra uma vista aérea do rompimento da barragem do Córrego do Feijão, ilustrando a natureza do movimento da massa e a grande distância percorrida.

A ruptura da barragem do Feijão, provavelmente, será lembrada como o desastre que sepultou de vez a modalidade de alteamentos de barragens pelo método de montante. Esta e outras tantas rupturas ocorridas no Brasil nas últimas décadas, como a ruptura de Mariana, em 2015, obrigaram à revisão da legislação do setor de mineração, dispondo-se uma nova política nacional de segurança de barragens.

### Análise da ruptura

Existem inúmeras variáveis, como tempo, fator escala, migração das poropressões, localização das deformações e variabilidade do solo que concorreram para a ruptura.

Classe de velocidade	Descrição	Velocidade (mm/seg)	Velocidade típica
7	Extremamente rápido	$5 \times 10^3$	5 m/seg
6	Muito rápido	$5 \times 10^1$	3 m/min
5	Rápido	$5 \times 10^{-1}$	1,8 m/h
4	Moderado	$5 \times 10^{-3}$	13 m/mês
3	Lento	$5 \times 10^{-5}$	1,6 m/ano
2	Muito lento	$5 \times 10^{-7}$	16 mm/ano
1	Extremamente lento		

Figura 5 - Classificação dos movimentos de massa com base em sua velocidade. Cruden e Varnes (1996).

Contudo, predomina o método construtivo com alteamentos para montante, além do nível d'água elevado, consideradas como causas principais do rompimento. De acordo com a classificação de Cruden

e Varnes (1996), o movimento de massa foi extremamente rápido, sendo que a velocidade de lama da barragem chegou a 80 km/h (22,2 m/s).

O movimento consistiu de um grande deslizamento rotacional, correspondente ao rompimento geral da barragem, causando amolgamento do rejeito e sua liquefação. Pode, então, ser classificado como deslizamento rotacional seguido de fluxo de lama.

### A liquefação

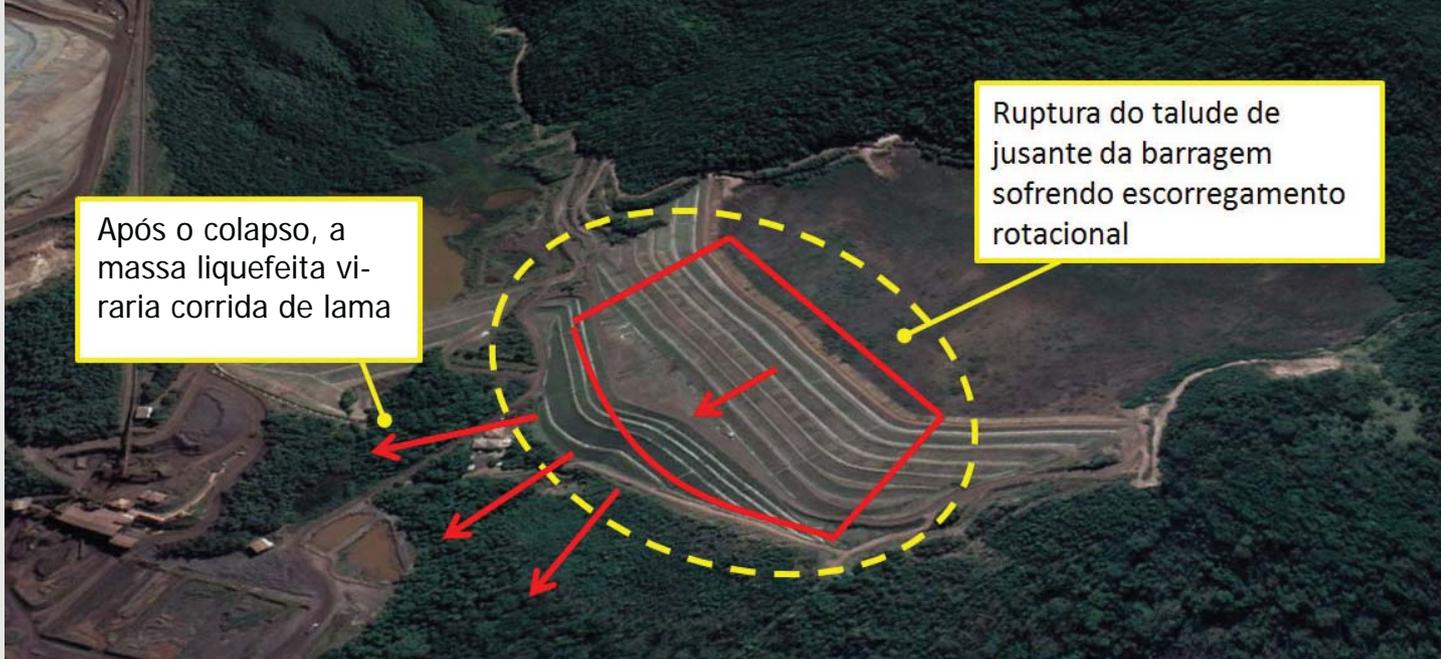
“Liquefação” entende-se como mudança do comportamento físico do solo, passando comportar-se como líquido, uma vez que toda sua resistência ao cisalhamento se anula. O fenômeno ocorre apenas em solos arenosos saturados fôfos ou em solos sensíveis devido, principalmente, ao aumento repentino da pressão da água, causado por vibrações ou solicitações cisalhantes elevadas, em condições não drenadas. É um processo intrinsecamente frágil, quase impossível de ser previsto pelo método observacional.

# LANÇAMENTO DO LIVRO

## MELHORAMENTO DO SOLO MOLE E O GEOENRIJECIMENTO



Adquira seu exemplar através do email [ofitexto@ofitexto.com.br](mailto:ofitexto@ofitexto.com.br)  
ou pelo site [www.lojaofitexto.com.br](http://www.lojaofitexto.com.br)



Após o colapso, a massa liquefeita viraria corrida de lama

Ruptura do talude de jusante da barragem sofrendo escorregamento rotacional

Figura 6 - A barragem do feijão antes da ruptura.

Liquefação é denominada “estática” quando eventos dinâmicos, como vibrações, não são causadores. Inumeros estudos mostram, claramente, que trata-se de um fenômeno característico de areias fofas, saturadas e submetidas a baixas tensões de confinamento. Ocorre, tipicamente, numa faixa de tensões de 0 a 250 kPa, equiva-

lentes a profundidades de 5 m a 40 m, no máximo. A eventual presença de partículas finas (siltes e argilas) aumenta seu potencial. Pelo princípio das tensões efetivas, o solo liquefaz-se quando a poropressão aumenta até anular a tensão efetiva. A partir daí, grãos sólidos ficam soltos e incapazes de sustentar qualquer tipo de esforço. A

estrutura sofre colapso abrupto, virando lama inconsistente.



### REFERÊNCIAS

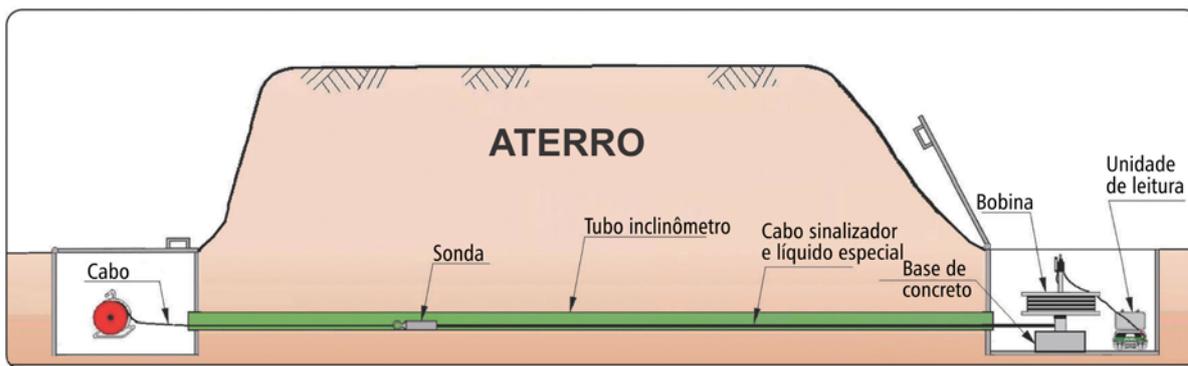
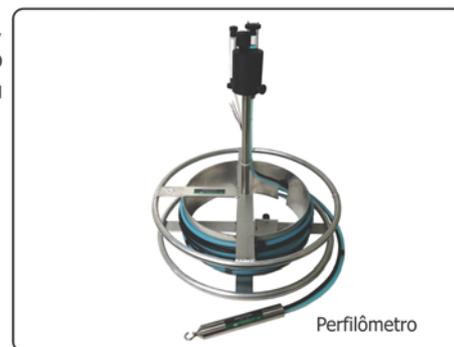
- Alessandro Cirone é engenheiro civil geotécnico, especialista em projetos e serviços de melhoramento de solos moles..

## Medidor Portátil do Perfil de Recalques (Perfilômetro)

Este equipamento mede, precisamente, recalques e levantamentos através de aterros, estradas, tanques, etc. O perfilômetro tem sonda conectada com cabo sinalizador e tubo genérico com líquido especial. Quando a sonda passa através do tubo inclinométrico ou qualquer tubo de PVC, analisa a pressão existente, calculando-a como deslocamento vertical.

### Aplicações:

- Aterros rodoviários e barragens.
- Reservatórios de água.
- Pontes e viadutos.
- Recalque do solo de fundação.

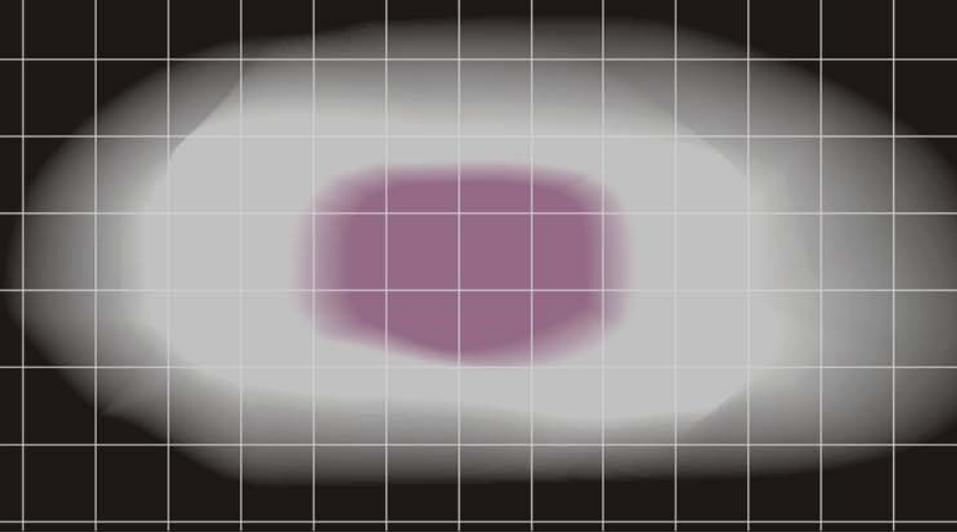


Instalação do Perfilômetro

Para maiores informações, acesse: <http://softsoilgroup.com.br> ou envie um e-mail para: [atendimento@softsoilgroup.com.br](mailto:atendimento@softsoilgroup.com.br)



# contaminação de solo?

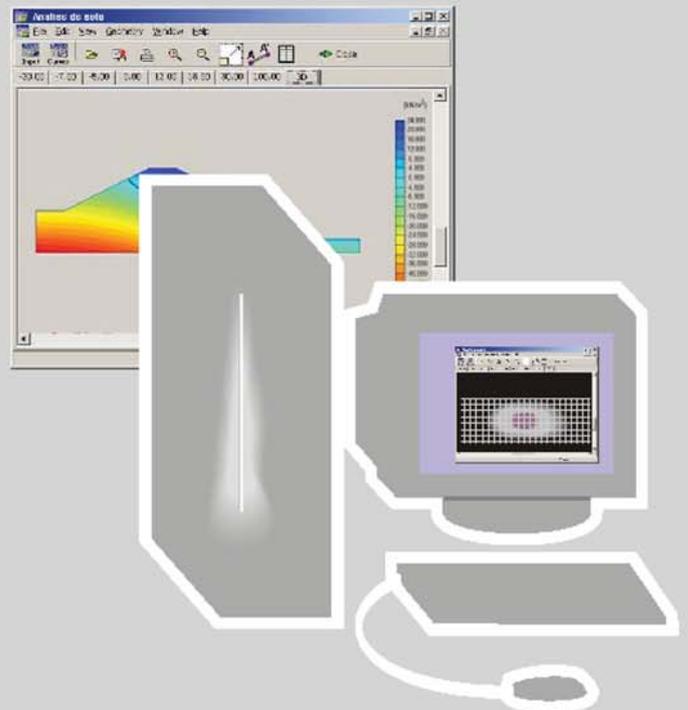


O segredo do tratamento de solos contaminados está na adequação do processo de compressão, confinamento e adensamento do solo, analisado com piezômetros e imagens tomográficas antes e depois.

Confie em quem tem experiência.



[www.engegraut.com.br](http://www.engegraut.com.br)



# SOLUÇÕES ADEQUADAS PARA RECUPERAÇÃO DE BARRAGENS

**A**tividade mineradora produz grande quantidade de resíduos sólidos que, em termos de volume, são os da extração (estéreis) e os das usinas de beneficiamento (rejeitos). Rejeitos são partículas sólidas, resultantes da britagem, moagem e, eventualmente, do tratamento químico do minério, sem nenhum valor econômico.

Sua granulometria varia em função do tipo de minério, que é transportado para locais de disposição através de tubulações, por gravidade ou bombeamento, utilizando-se grande quantidade de água. A polpa é a suspensão desses rejeitos em meio aquoso, com porcentagem aproximada de 70%. Sua disposição geralmente é feita a céu

aberto, podendo ser em pilhas controladas ou em estruturas de contenção localizadas em bacias ou vales.

Segundo Vick (1983), a estrutura de contenção é construída levantando-se um dique de partida, com solo de empréstimo, que deve ter capacidade de retenção para dois ou três anos de operações da lavra.



Figura 1 - Barragem de rejeito e dreno de pé sendo construído.

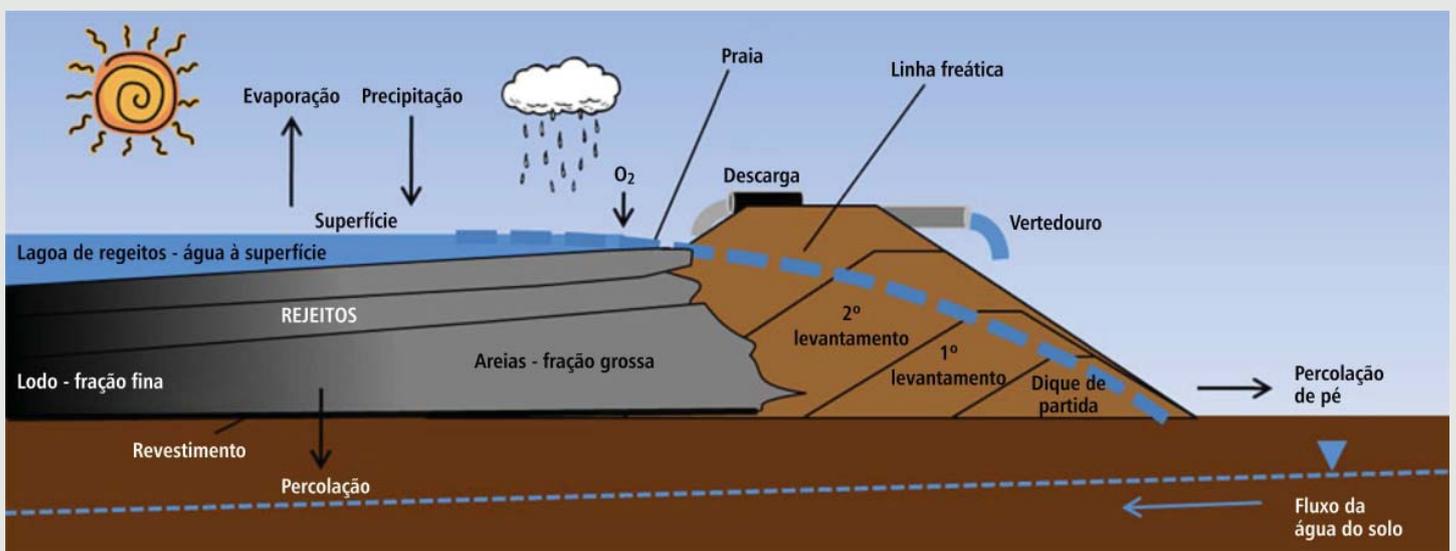


Figura 2 - Construção pelo método de montante.

Os estágios posteriores (alteamentos) podem ser construídos também com material de empréstimo estéreis, por deposição hidráulica de rejeitos ou por ciclonagem, com ciclone, equipamento que separa, granulometricamente, por efeitos da pressão, as partículas menos densas e finas. A polpa do rejeito entra no ciclone e é separada em dois fluxos: o “overflow”, composto de partículas mais finas e menos densas, que saem pela parte superior do ciclone, e os “underflow”, com partículas mais grossas e mais densas que saem por sua parte inferior. Os alteamentos subsequentes da barragem podem assumir diferentes configurações, cada uma com suas características, especificações, vantagens e desvantagens. Os métodos de alteamento são, geralmente, classificados em três tipos, o de montante, o de jusante e o da linha de centro. Estes nomes referem-se à direção em que os alteamentos são feitos em relação ao dique original.

### Alteamento com método de montante

O método de montante é, inicialmente, construído com um dique de partida, sendo que o eixo da barragem desloca-se para montante.

A polpa é descarregada ao longo do perímetro da crista do dique, formando praias. A descarga é feita com ciclones\* ou com seqüência de tubulações menores, perpendiculares à tubulação principal, denominada

\*A ciclonagem é feita com equipamento chamado ciclone, que separa granulometricamente, por efeitos de pressão, partículas menos densas e finas de mais densas e grossas. A polpa de rejeitos entra no ciclone e é separada em dois fluxos, o overflow e o underflow.

das “spigots”, que permitem melhor uniformidade na formação das praias. Como rejeitos têm ampla distribuição granulométrica, partículas mais grossas e mais pesadas sedimentam mais rapidamente, estabelecendo-se nas zonas perto do dique, e partículas menores e menos densas ficam em suspensão sendo transportadas para zonas internas da bacia de sedimentação. Nas etapas seguintes constroem-se diques em todo o perímetro da bacia. O tamanho dos diques, no alteamento, é variável e depende das necessidades operacionais da mina. O dique inicial, geralmente, é sempre maior que os diques das etapas seguintes. Se o alteamento for construído com rejeitos, torna-se necessário que contenham 40 a 50% de areia e, na descarga, a polpa te-

na alta porcentagem de sólidos por peso, para que ocorra a segregação granulométrica, que pode ser obtida pela ciclonagem da polpa (Vick, 1983).

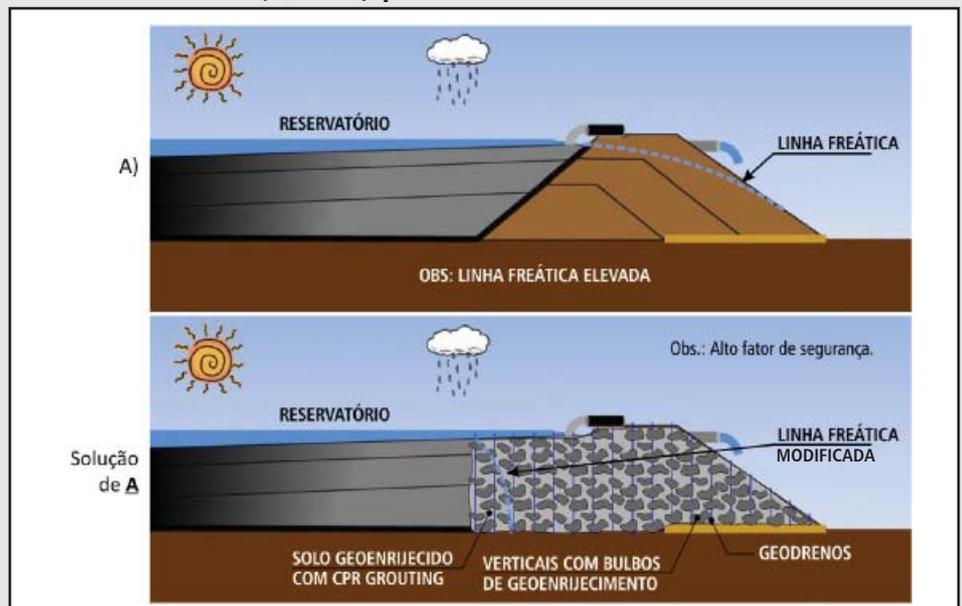
Como todo método de construção, este alteamento apresenta vantagens e desvantagens (Nieble 1976, Burke 1973, Vick 1981-1983, Assis e Espósito 1995, Sanchez 2000).

### Vantagens:

O volume de material, seja de rejeitos ou de empréstimos, é menor, tendo:

- Menor custo de construção.
- Maior velocidade para o alteamento.
- Facilidade de operação.
- Topografia muito íngreme, onde o limitante principal é a área de deposição.

### Problemas (a, b e c) pertinentes ao método de montante



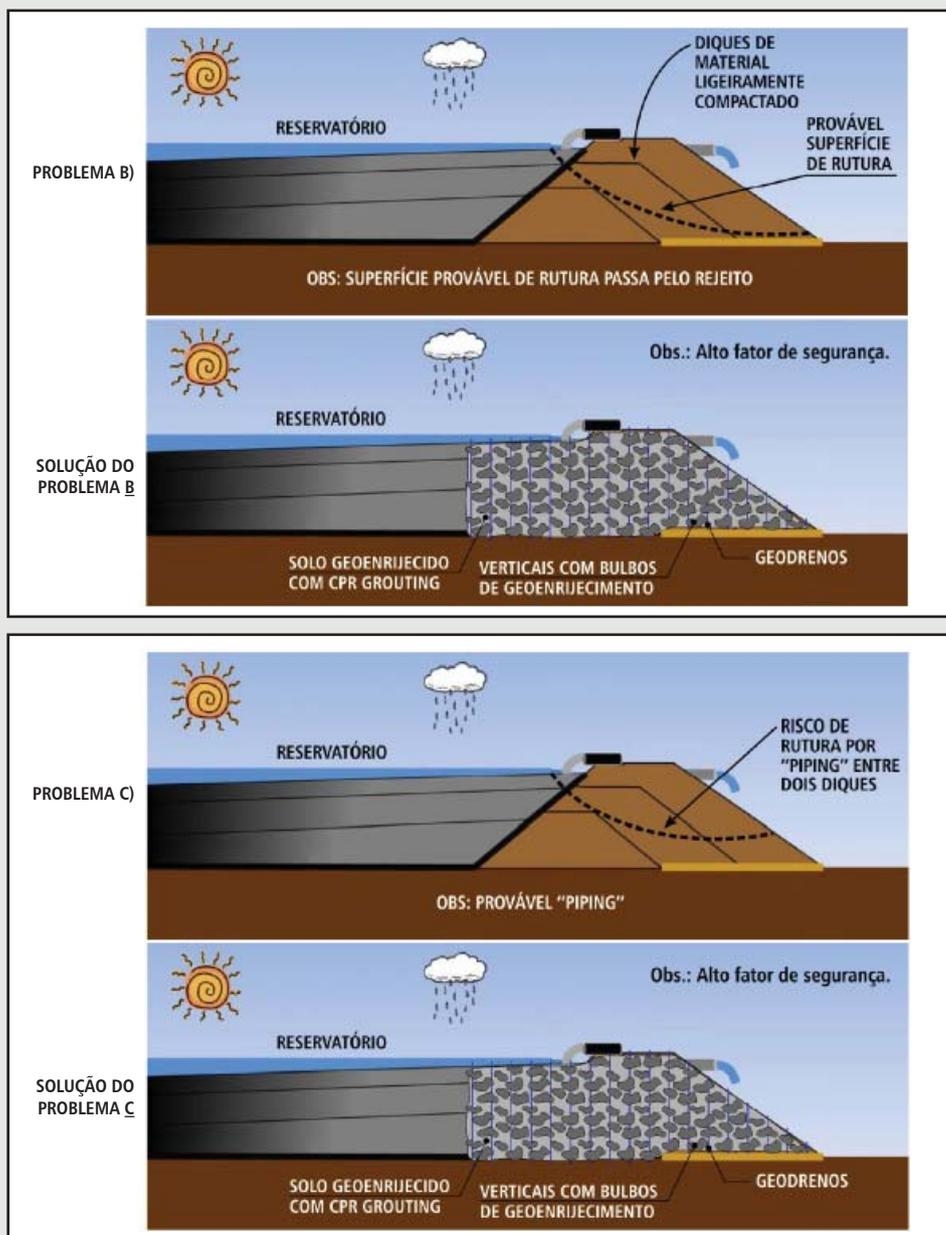


Figura 3 - Desvantagens do método de montante e soluções: (a) linha freática elevada; (b) superfície provável de ruptura passa pelos rejeitos; (c) risco de ruptura por "piping" (Silveira e Reades 1973).

### Desvantagens:

- Baixa segurança (a linha freática fica muito próxima ao talude da jusante). O geoenrijecimento do solo altera significativamente a LF para montante. Neste caso, o fator de segurança pode ser elevado a níveis de projeto através do geoenrijecimento do solo com CPR Grouting (Caso A).
- Susceptibilidade à liquefação, por vibrações, decorrentes do movimento dos equipamentos, quando o alteamento é realizado com rejeitos, constituído de areias saturadas fofas não compactadas e/ou não classificadas (rejeitos descarregados por "spigots"). Neste caso, a pre-

disposição à liquefação é eliminada com o geoenrijecimento do solo utilizando-se o CPR Grouting (Caso B).

- Quando o rejeito não é compactado ou ligeiramente compactado, a superfície crítica de deslizamento passa pelo material sedimentado. O geoenrijecimento das camadas de rejeitos, sem compactação ou mal compactado, com CPR Grouting, aumenta enormemente sua resistência e rigidez, aumentando sobremaneira o coeficiente de segurança. Possibilidade de ocorrência de "piping", devido à linha freática estar muito próxima do talude de jusante e à não compactação do rejeito, ou quando ocorre concentração de fluxo entre dois diques compactados. A predisposição ao aparecimento de pipings é eliminada com o geoenrijecimento do solo utilizando-se o CPR Grouting (Caso C).

### Alteamento com método de jusante

Este método é caracterizado pelo eixo da barragem, que desloca-se para jusante. Constrói-se um dique impermeável, com drenagem interna, filtro inclinado e tapete drenante. Impermeabiliza-se o talude interno da barragem no alteamento. A drenagem interna e esta impermeabilização não são obrigatórias, caso o rejeito possua alta permeabilidade e ângulo de atrito elevado (figura 5).

O rejeito é ciclonado e o "underflow" lançado no talude de jusante utilizando-se, apenas, o rejeito grosso no alteamento, podendo-se utilizar material de empréstimo ou estéril proveniente da lavra.



Figura 4 - Barragem de rejeitos de mina de ouro.

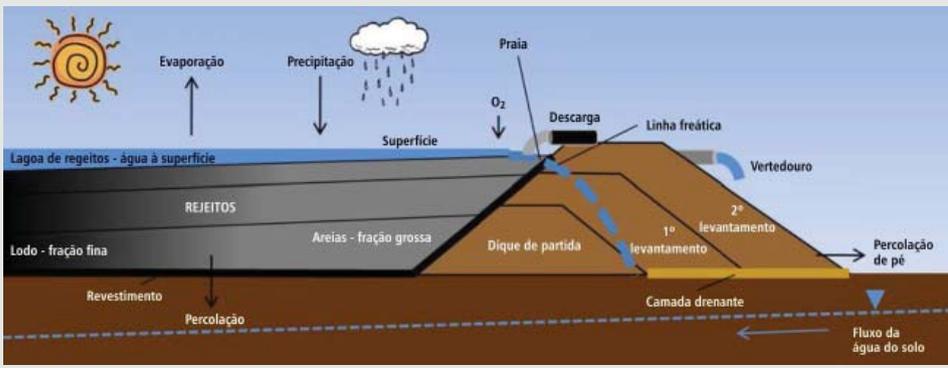


Figura 5 - Construção pelo método de jusante.

Existem variantes do método da jusante, como mostra a Figura 6, onde se constroem dique de partida e dique de enrocamento. O rejeito ciclonado é depositado entre as estruturas de modo a formar o alteamento. Neste método, a quantidade de rejeito para o alteamento deve ser maior do que no método de jusante convencional. A camada impermeabilizante do talude de montante é substituída por um tapete drenante do dique de partida com o dique de enrocamento, de modo que a linha freática

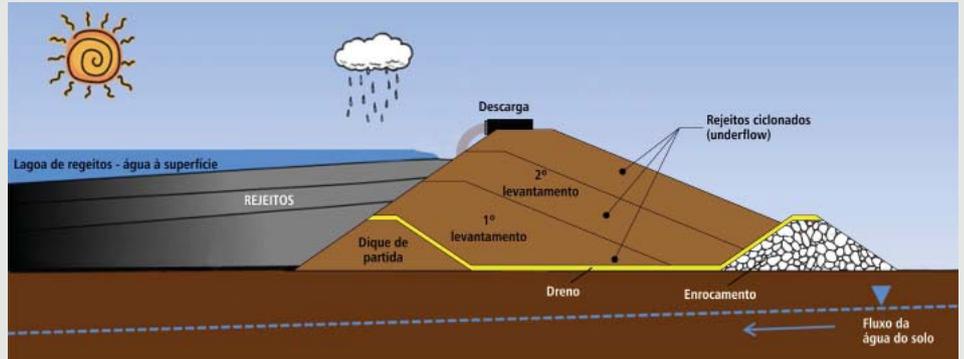


Figura 6 - Construção pelo método de jusante com enrocamento.

**Localização estratégica e eficiência logística geralmente estão localizadas em terrenos ruins.**



**O CPR Grouting viabiliza.**

**Entre em contato, para saber mais detalhes a respeito.  
www.engegraut.com.br**

não fique próxima do talude de jusante.  
 Vantagens e desvantagens do método de jusante estão apresentadas a seguir, segundo Nieble 1976, Burke 1973, Vick 1981-1983, Assis e Espósito 1995, Sanchez 2000.

**Vantagens:**

- O método é eficiente para o controle da superfície freática, considerando-se a construção de sistemas contínuos de drenagem.
- Pode ser utilizado em lugares com vibrações, já que, se compactado, o rejeito do “underflow”, sua susceptibilidade à liquefação é bem menor.
- Operação bastante simples.
- Possibilita a compactação de todo o corpo da barragem.
- Maior segurança devido aos alteamentos controlados (disposição da fração grossa do rejeito à jusante, sistemas de drenagem e compactação): a probabilidade de “piping” e de ruptura horizontal é muito menor.
- O estéril, proveniente da lavra, pode ser utilizado e/ou misturado no alteamento.

**Desvantagens:**

- Necessidade de grande quantidade de rejeito nas primeiras etapas da construção.
- Dependendo da característica dos rejeito, o problema de área aumenta, devido a taludes bastante abatidos.
- Necessidade de sistemas de drenagem eficientes, havendo probabilidade de colmatção.
- Os investimentos iniciais são altos devido à complexidade dos diques de partida e de enrocamento e dos sistemas de drenagem.
- Em zonas de alta pluviosidade é possível que o rejeito, à jusante, não possa ser compactado adequadamente, devendo-se esperar épocas de estio para a operação de equipamentos em cima dos rejeitos.
- Não é possível proteger com cobertura vegetal o talude de jusante e, menos ainda com drenagem superficial durante a fase construtiva, devido à superposição do rejeito.
- É necessário o emprego de ciclones para garantir uma ótima separação do rejeito.



Figura 7 - Barragem de rejeitos em mina de urânio.

**Alteamento com método da linha de centro**

Neste método, o eixo da barragem é mantido na mesma posição, enquanto é elevado. É solução intermediária entre o método de montante e o de jusante (inclusive em termos de custo), embora seu comportamento estrutural aproxime-se do método da jusante. Na figura 8, apresenta-se o método da linha do centro. Inicialmente, constrói-se o dique de partida e o rejeito é lançado, perifericamente, da crista do dique até formar uma praia. O alteamento, subsequente, é formado lançando materiais de empréstimo, estéril da mina ou “underflow” de ciclones, sobre o limite da praia anterior e no talude de jusante do maciço de partida, mantendo o eixo coincidente com o eixo do dique de partida. Por ser uma combinação dos dois métodos anteriores, vantagens e desvantagens são similares:

**Vantagens:**

- Facilidade na construção.
- Eixo dos alteamentos constante.
- Redução do volume de “underflow necessário” em relação ao método de jusante.

**Desvantagens:**

- Necessidade de sistemas de drenagem eficientes e de contenção a jusante (se o material de rejeito fica saturado a jusante, pode comprometer a estabilidade do maciço), havendo a necessidade do geoenrijecimento.
- Na medida em que a contenção de jusante é elevada, pode-se promover seu geoenrijecimento.
- Torna-se necessário equipamento para deposição mecânica a jusante, o que torna uma operação complexa.
- Os investimentos globais podem ser altos pela complexidade da operação.

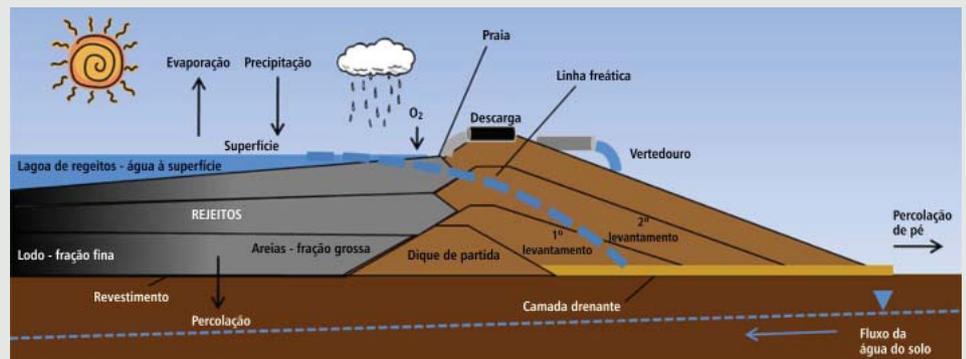


Figura 8 - Construção pelo método da linha de centro.



Figura 9 - Barragem de rejeitos sendo elevada em mina de cobre.

O método de jusante apresenta, sem dúvidas, melhores características de estabilidade porém, o volume necessário de “underflow”, material de empréstimo ou estéril da lavra, é três vezes o do método de montante, o que impacta o custo total.

Barragens construídas com rejeitos diferem das construídas com solos de comportamento geotécnico, como os de empréstimo ou estéril, proveniente da lavra. Quando o alteamento é feito com rejeito, o corpo da barragem comporta-se como um aterro hidráulico, onde o material é lançado de forma quase aleatória, sem controle das variáveis que influenciam o processo de deposição.

As propriedades do aterro hidráulico dependem do método de deposição e da composição da polpa (tipo de fluido do transporte, distribuição granulométrica, geometria dos grãos, textura e densidade, porcentagem de sólidos por peso da polpa), que definem o comportamento da segregação da polpa na deposição, influenciando a geometria da estrutura do corpo da barragem.



### REFERÊNCIAS

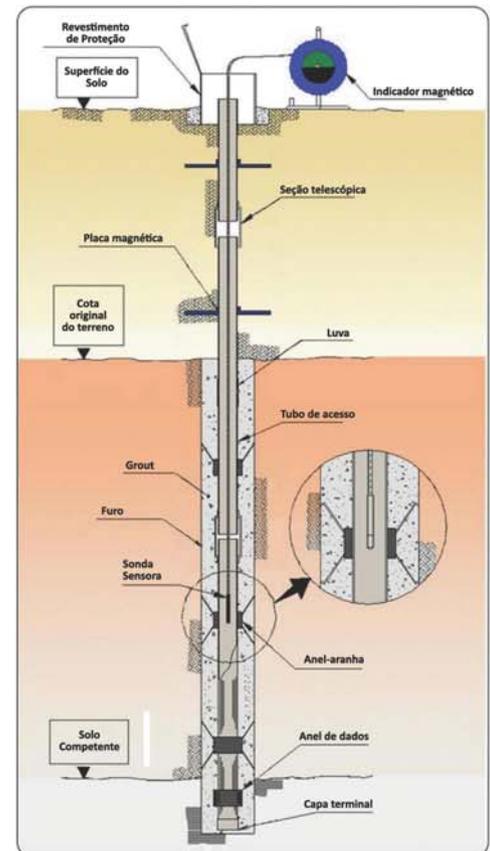
- **Patricia Karina Tinoco** é engenheira civil. Trabalha com melhoramento de solos moles.
- COELHO, E.F.F., Estudo do comportamento mecânico de rejeitos de minério de ferro reforçados com fibras sintéticas. Ouro Preto, 2008, 100p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em engenharia Civil da UFOP.
- DIXON, S.J., Burke, J.W. (1973). Liquefaction case history. ASCE J Soil Mech Found Eng SM10:823-840.
- DUNCAN JM, WRIGHT SG, WONG KS. Slope stability during rapid drawdown. In: Proceedings of the H. Bolton seed memorial symposium, Vol. 2; May 1990. p. 253–72
- MORGENSTERN 1963. Stability charts for earth slopes during rapid drawdown. Géotechnique 13(1):121-131.
- EDIL, Tuncer & DHOWIAN, A.W.. (1981). At-rest lateral pressure of peat soils. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE. 107. 201-217.
- EDIL TB (2003). Recent advances in geotechnical characterization and construction over peats and organic soils. Proceedings of the 2nd International Conferences in Soft Soil Engineering and Technology, Putrajaya (Malaysia), pp. 3-26.
- Ibran - Instituto Brasileiro de Mineração - Gestão e Manejo de Rejeitos de Mineração. 2016.

# Aranhas Magnéticas



## Descrição

Aranhas magnéticas consistem de anéis sensoriais, indicadores magnéticos, tubo de acesso incluindo anel de placa e anel aranha. De acordo com o tamanho da medição, o indicador magnético é dividido em 6 tipos com 50m, 100m, 200m, 300m, 350m e 500m.



## AMOSTRADOR PARA SOLOS TURFOSOS



Este é um dos kits para amostragem de solos turfosos.

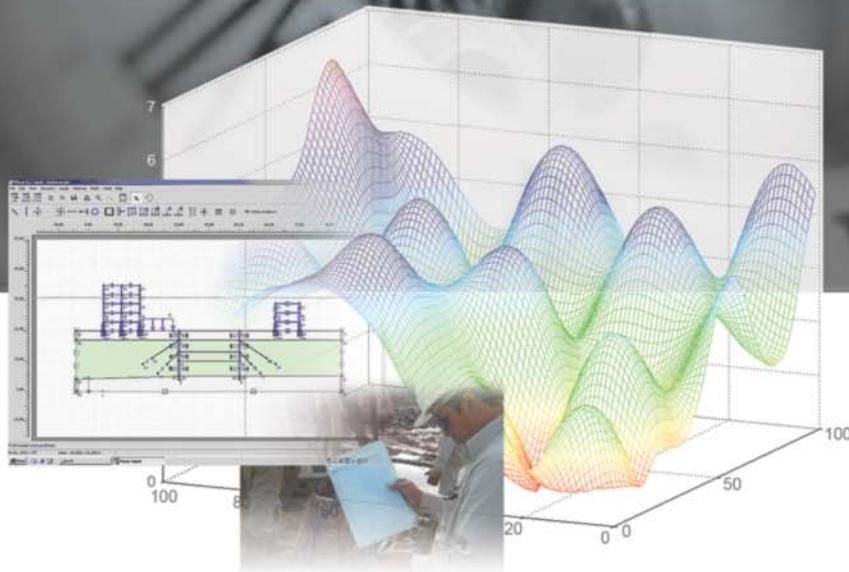
Para maiores informações, acesse: <http://softsoilgroup.com.br> ou envie um e-mail para: [atendimento@softsoilgroup.com.br](mailto:atendimento@softsoilgroup.com.br)



Para maiores informações, acesse: <http://www.softsoilgroup.com> ou [atendimento@softsoilgroup.com](mailto:atendimento@softsoilgroup.com)

# MELHORAMENTO DE SOLOS MOLES EXIGE PRECISÃO E SEGURANÇA

Todo solo de fundação exige condições geotécnicas estáveis e precisas, o que se traduz em um investimento sujeito a risco. A presença de solos moles, com valores de SPT inferiores a 5, implica em soluções que podem durar meses e até anos e, assim mesmo, apresentam algum risco, seja ambiental ou de recalques inesperados. O geoenrijecimento do solo é a resposta para o melhoramento de solos moles, pois promove a segurança necessária à presença de deformações laterais e recalques, além de, principalmente, induzir um intenso e seguro processo de adensamento, muito superior ao exigido pelo futuro projeto, eliminando qualquer possibilidade de recalques posteriores. Tudo isto, com o acompanhamento preciso de sondagens tomográficas por imagem e pressiométricas, com respostas antes, durante e depois dos serviços executados. Ou seja, com a precisão e a segurança de um bom relógio Suíço.



**CPR**  
**GROUTING**

[www.engegraut.com.br](http://www.engegraut.com.br)

O CPR Grouting é tecnologia específica para geoenrijecimento de depósitos de solo mole, desenvolvida pela ENGEGRAUT e executada há 15 anos em todo o Brasil, estando protegida no INPI por patente.

