

# Caracterização dos materiais utilizados na construção de uma barragem de enrocamento para contenção de rejeitos de mineração

Vagner Albuquerque de Lima

Mirabela Mineração do Brasil LTDA, Itagibá/BA, Brasil, msc.vagner.lima@gmail.com

José Roberto Guimarães Eça Junior

AC Parceria e Terraplenagem, Belo Horizonte/MG, Brasil, eng.joserobertoguimaraes@gmail.com

**RESUMO:** A Mirabela Mineração do Brasil trata-se de uma mineradora localizada no município de Itagibá/BA, onde o minério explorado é o níquel, explotado em cava a céu aberto. A estimativa é de que seja gerado um grande volume de rejeitos (aproximadamente 58,5 Mm<sup>3</sup>) ao longo dos anos, que serão armazenados gradativamente em um sistema de contenção (Barragem de Rejeitos). Essa barragem foi projetada para ser alteada em etapas. Em 2008 a 1ª etapa de construção da mesma foi entregue na elevação 146 m e em 2015 foi concluída a 3ª etapa de alteamento da crista até a elevação 154 m. Os materiais utilizados na construção da barragem apresentam a seguinte proporção: Enrocado 77 %, Material Argiloso/Saprolito 16,17 %, Grislado (Material de Transição) 4,63 % e Areia (Filtro) 2%. Observa-se que mais de 2/3 da barragem é constituído de rocha, entretanto, todo este volume estará disponível como subproduto (estéril) das operações de lavra. O filtro foi adquirido de um fornecedor regional, proveniente do Rio de Contas que margeia a mineradora. E para garantir a viabilidade deste projeto, o material argiloso/saprolito foi encontrado nas proximidades da barragem, com características que atenderam a necessidade da projetista. Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo apresentar os ensaios tecnológicos dos materiais utilizados na construção da barragem de enrocamento com face de montante em material argiloso, para tanto, foi realizada uma ampla campanha de ensaios fundamentada nas normas técnicas brasileiras como ensaios de compactação, limites de consistência e ensaios de permeabilidade. Os dados obtidos foram analisados através de gráficos e tabelas, sendo comparados com outras experiências referenciadas na literatura acerca da utilização de solos residuais para construção de barragens. Como consequência desta pesquisa, observou-se que as características dos solos utilizados na barragem supracitada são similares às características dos solos de outras barragens como a do Sossego em Canãa dos Carajás. Esses resultados confirmam a importância do acompanhamento sistemático na execução e no controle desses materiais e no dimensionamento dos equipamentos utilizados no processo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Barragem, saprólito, ensaios tecnológicos, rejeitos, enrocamento, mineração.

## 1 INTRODUÇÃO

A Mirabela Mineração do Brasil é proprietária do empreendimento minerário denominado Mina Santa Rita, localizado no município de Itagibá/BA. O alvo de exploração da mineradora é o níquel, explorado em cava a céu aberto. A reserva estimada de 100 Mt de

ROM gerará um volume total de rejeitos 58,5 Mm<sup>3</sup> a serem armazenados gradativamente em um sistema de contenção (Barragem de Rejeitos) em 22 anos de operação. Esta Barragem de Rejeitos foi projetada para ser alteada em etapas que poderão atingir até a elevação 198m em sua configuração final, estes alteamentos foram definidos em função do

volume do reservatório necessário para armazenamento dos rejeitos produzidos e das quantidades de água requeridas para suprir a demanda da planta.

A equipe do Laboratório de Mecânica dos solos submeteu os materiais (argila/saprolito, areia, grislado e enrocado) a inspeções e ensaios frequentes, de forma a garantir o cumprimento de todas as exigências das especificações técnicas da obra.

Os procedimentos de fiscalização e controle de qualidade executados estiveram, durante todo o período construtivo embasados nas normas da ABNT e nas especificações técnicas da empresa projetista. Tais procedimentos foram fiscalizados e auditados pela empresa gerenciadora e pela Mirabela.

O presente artigo tem como objetivo apresentar os resultados dos ensaios dos materiais realizados no período de abril de 2015 a fevereiro de 2016.

## 2 MÉTODOS, PROJETOS E NORMAS

### 2.1 Processo Construtivo

O processo construtivo da barragem, objeto de estudo do presente trabalho, respeita uma sequência lógica de construção que começa com o enrocamento, depois a transição de rocha com granulometria mais fina, denominado no projeto de grislado, o filtro de areia e a argila/saprolito. A figura 1 apresenta uma seção com as disposições dos materiais.

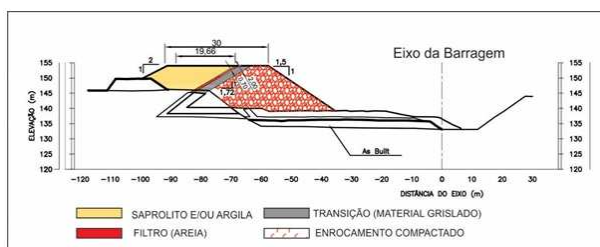


Figura 1. Seção típica do alteamento da barragem.

### 2.2 Especificações Técnicas

A empresa contratada pela mineradora para

desenvolver o projeto foi a Coffey que por sua vez elaborou uma série de especificações a ser seguida pela empreiteira executante. No entanto, no decorrer do projeto, após as primeiras divulgações dos resultados dos ensaios tecnológicos, alguns ajustes foram inseridos a fim de adaptar o projeto à realidade do campo.

Os materiais drenantes (areia e grislado) devem obedecer às faixas granulométricas definidas cujo cálculo partiu das curvas do saprolito. A figura 2 apresenta o gráfico com as curvas granulométricas.

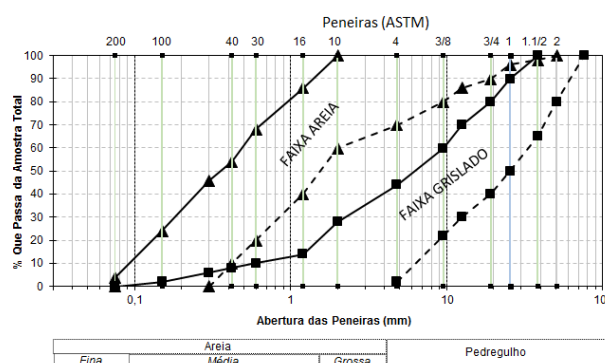


Figura 2. Faixas granulométricas da areia e grislado.

Os métodos de ensaios utilizados para controlar a qualidade da execução das obras foram todos embasados nas Normas da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 6457, NBR 7181, NBR 9813, NBR 6459, NBR 7180, NBR 7182, NBR 120, NBR 12004, NBR 13292, NBR 145 e NBR 7185).

### 2.3 Frequência dos Ensaios

Os ensaios foram realizados seguindo o cronograma dos volumes de materiais aplicados diariamente. A partir desses dados, seguiam-se às recomendações da projetista que indicava a frequência de ensaios que deveriam ser realizados por volume lançado, conforme dados da Tabela 1.

Tabela 1. Frequência de ensaios por volume aplicado.

| CRONOGRAMA PARA REALIZAÇÃO DE ENSAIOS |                     |                                   |
|---------------------------------------|---------------------|-----------------------------------|
| Material                              | Tipo de Ensaio      | Específic.<br>1 Ensaio a cada Xm³ |
| Areia                                 | Granulometria       | 400                               |
|                                       | Permeabilidade      | 10.000                            |
|                                       | Densidade           | 400                               |
| Argila / Saprolito                    | Caract. Completa    | 5.000                             |
|                                       | Sedimentação        | 35.000                            |
|                                       | Teor de umidade     | 500                               |
| Grislado                              | Grau de Compactação | 500                               |
|                                       | Granulometria       | 500                               |
|                                       | Peso Específico     | 4.000                             |
| Enrocado                              | Densidade           | 20.000                            |

### 3 RESULTADOS DOS ENSAIOS

#### 3.1 Ensaios da Areia

No presente trabalho de execução do alteamento da barragem de enrocamento da MMB foram executados filtros e drenos construídos com areias naturais, de forma a disciplinar o fluxo inevitável da água represada através do núcleo impermeabilizante ou através da fundação.

##### 3.1.1 Granulometria da Areia

A areia utilizada na construção do filtro foi proveniente de jazidas situadas aproximadamente a 26 km de distância da MMB, localizada no município de Ipiá e foi devidamente aprovada pela fiscalização.

A Figura 3 apresenta o resultado dos ensaios realizados em 293 amostras que comprovam que a areia utilizada no projeto está dentro da faixa indicada nas especificações (limite inferior e superior), conforme verificado na curva da média dos resultados.

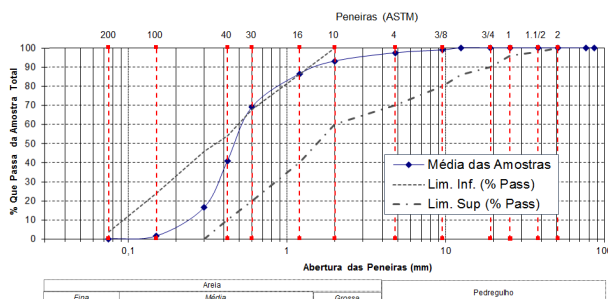


Figura 3. Curva granulométrica da areia.

##### 3.1.1 Ensaios de Densidade e Compacidade Relativa

Foram realizados 64 ensaios de Densidade Máxima e Mínima, obtendo-se valores médios 16,27 KN/m³ e 14,35 KN/m³, respectivamente. Com estes valores foram realizados os cálculos de Compacidade Relativa da areia aplicada no filtro.

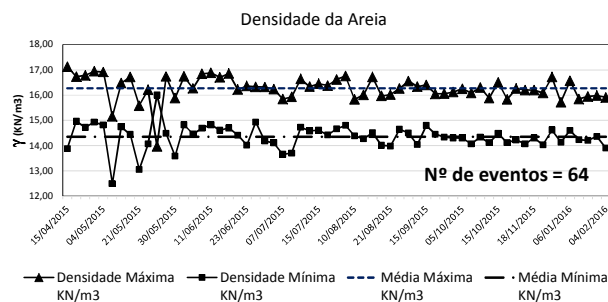


Figura 4. Densidade máxima e mínima da areia.

Segundo a especificação técnica, a compactação das areias dos fitos deverá estar com grau de compacidade relativa entre 65% e 75% para o caso do Filtro Inclinado e acima de 65% para o Tapete Drenante.

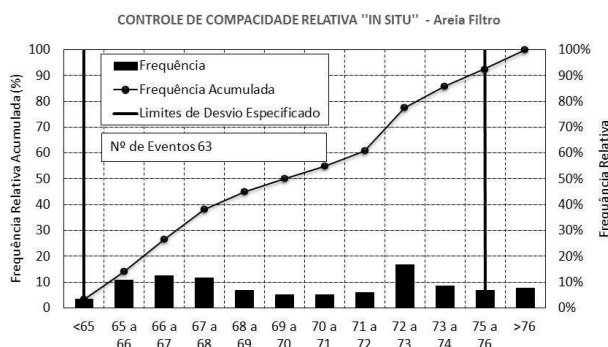


Figura 5. Compacidade relativa do filtro inclinado.

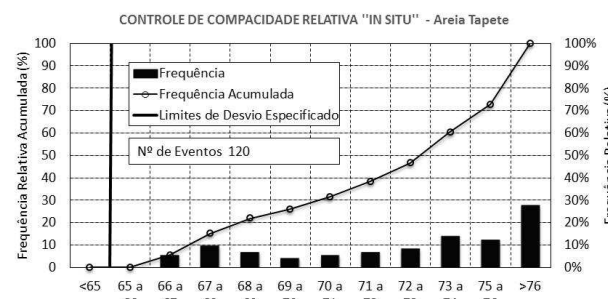


Figura 6. Compacidade relativa do tapete drenante.

Os resultados apresentados indicam que os materiais utilizados estão dentro do intervalo

estabelecido. Observa-se na Figura 5 que menos de 10% das amostras ficaram acima do limite máximo especificado.

### 3.2 Ensaios Grislado (Material de Transição)

#### 3.2.1 Granulometria do Grislado

Segundo as especificações técnicas, a curva granulométrica do grislado a ser utilizado na transição entre a areia e o enrocamento abrange uma faixa compreendida nos limites apresentados na figura 2.

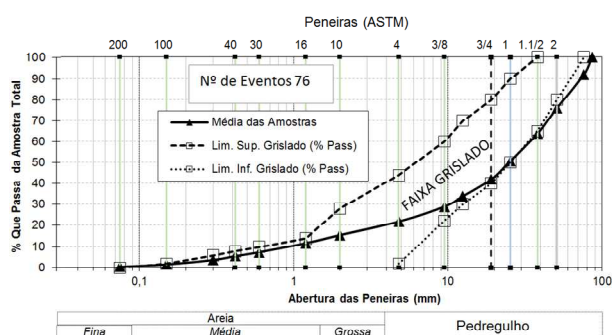


Figura 7. Curva granulométrica do Grislado.

Observa-se que a maior proporção de material está dentro da faixa, entretanto algumas rochas de maior granulometria impactam na representação da curva, visto que sua massa é proporcionalmente elevada em relação à amostra total. Dessa forma, o fator escala está interferindo no ensaio de granulometria das amostras do grislado apresentando uma tendência de desvio no limite inferior.



Foto 1. Ensaio de Granulometria do Grislado

Outra evidência que comprova que o material utilizado na construção do grislado está dentro das especificações é o ensaio de densidade apresentado no item 3.2.2. Esse mostra que a densidade está acima do especificado, ou seja, com poucos vazios, confirmando as suspeitas que a curva granulométrica não representa a realidade pela interferência do fator escala.

#### 3.2.2 Densidade do Grislado

A especificação informa que a densidade seca mínima do grislado deve ser de 19kN/m³, em toda a extensão e espessura de cada camada.

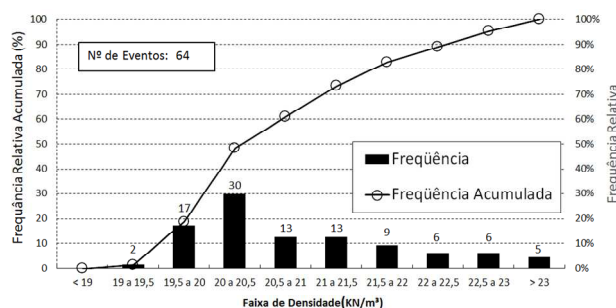


Figura 8. Curva granulométrica do Grislado.

Observa-se que todas as amostras estão superiores ao solicitado na especificação técnica e que a maior parte das amostras está na faixa de 20 a 20,5 kN/m³.

### 3.3 Ensaios Argila / Saprolito

#### 3.3.1 Limites de Consistência da Argila

Segundo Pinto (2000), o comportamento argiloso do solo não se determina apenas pelo teor de argila, deve-se levar em conta a sua atividade. O autor ressalta que os índices de consistência demonstram o comportamento argiloso.

A figura 9 apresenta a carta de plasticidade com os resultados dos ensaios referentes à argila.

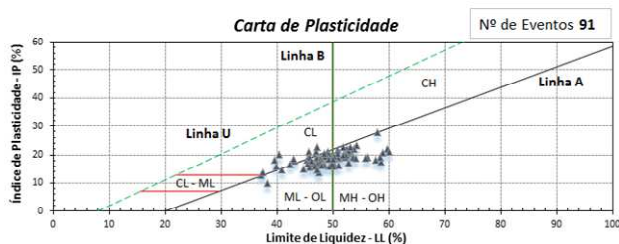


Figura 9. Carta de plasticidade da argila.

Observa-se que um número considerável de pontos localiza-se na região de alta compressibilidade, segundo Pinto (2000), a compressibilidade é menor se menor for a umidade de compactação, motivo pelo qual, solos compactados com teores de umidade abaixo da ótima denotam menor deformação depois de submetidos a carregamentos. Neste sentido, o material utilizado terá uma menor tendência a sofrer recalque.

Outro motivo que demonstra a eficiência da argila utilizada no projeto é o coeficiente de permeabilidade das amostras que está na margem de  $10^{-7}$  cm/s, confirmando características de materiais argilosos. Os maiores percentuais de argila em relação ao silte apresentados nos ensaios de permeabilidade também confirmam esta constatação.

### 3.3.2 Limites de Consistência do Saprolito

Sobre a utilização de saprolitos em barragens, encontram-se na literatura diversas experiências acerca do tema que referenciam os benefícios da aplicação deste material. Leme (1981) afirma que, quanto à composição, os saprolitos apresentam na prática uma menor tendência a provocar o aparecimento de borrachudos. Mori et al. (1978) explica tal comportamento face à distância existente entre os teores de umidade ótima e do limite de plasticidade.

Bicudo et al. (1980) afirma que uma das características muito importante constatada no saprolito é a baixa tendência a gerar pressões neutras de construção mesmo compactado em faixa de umidade acima da ótima, confirmado através de piezômetros instalados no maciço.

As características de resistência,

permeabilidade e compressibilidade dos saprolitos comprovam a eficácia de seu uso na construção de barragem, porém o autor alerta para os riscos de erosão. Entretanto, no presente alteamento, o aterro foi projetado com um confinamento de argila, pois este material possui maior resistência à erosão.

Ainda no artigo o autor afirma que os ensaios rotineiros de identificação são deficientes para este tipo de solo. Qualquer ensaio de laboratório que destrói a estrutura original do saprolito na sua realização introduz uma ativação irreal da fração de argila, como ocorre nos ensaios de limites de consistência.

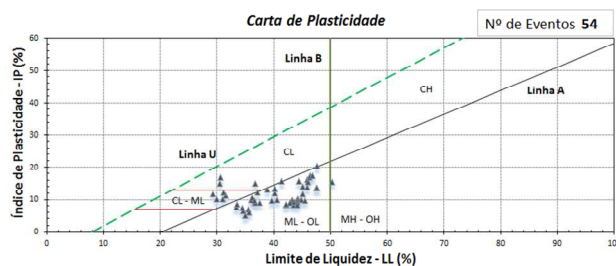


Figura 10. Carta de plasticidade do saprolito.

Em seu estado natural o saprolito apresenta plasticidade baixa, entretanto Leme (1981) assegura que, se com a compactação em laboratório do saprolito o coeficiente de permeabilidade atingir valores menores que  $10^{-6}$  cm/s, implica que não haverá razões para não se permitir a utilização deste material em núcleos de barragem de enrocamento, além disso, o gráfico apresentado nas especificações técnicas está em concordância com os resultados das análises granulométricas apresentados neste trabalho.

Neste sentido, observou-se que nos ensaios realizados neste período o coeficiente de permeabilidade, com a compactação de laboratório, é da ordem de  $10^{-5}$  a  $10^{-7}$  cm/s, confirmando a constatação do autor acerca da utilização dos saprolitos em barragens de enrocamento.

### 3.3.3 Ensaios de Compactação

Para liberação das camadas compactadas, os

ensaios de compactação foram realizados pelo método Hilf com a determinação mínima de quatro pontos. Em cada ponto foi determinado o teor de umidade para o traçado da curva de compactação definida nesse relatório de Hilf/Proctor.

O grau de compactação mínimo requerido é de 95%, devendo a média mínima ser de 98%, em referência ao Proctor Normal / Hilf, em quaisquer grupos de 10 ensaios de controle.

Os materiais foram compactados na faixa de umidade compreendida entre 2% abaixo e 1% acima da umidade ótima do Proctor Normal / Hilf. A especificação tolera 15% dos resultados do desvio de umidade fora da faixa em zonas não concentradas do aterro, desde que obtido o grau de compactação superior ou igual a 98%.

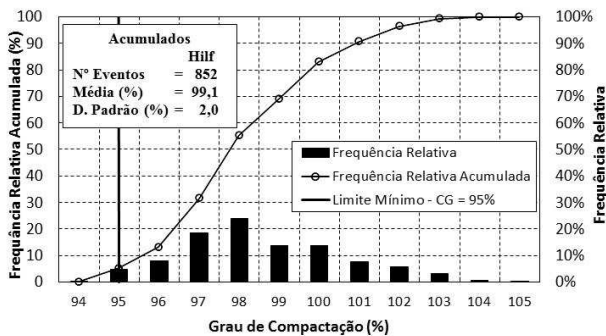


Figura 11. Grau de Compactação da Argila/Saprolito.

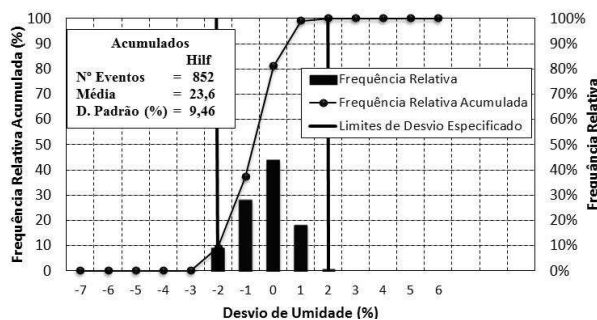


Figura 12. Desvio de Umidade da Argila/Saprolito.

Os gráficos apresentados nas figuras 11 e 12 revelam que os graus de compactação das camadas atingiram a média de 99,1% do Proctor Normal, portanto, superior à média requerida pela especificação, assim como o desvio de umidade que se manteve dentro dos limites de tolerância, tudo isto devido a uniformidade dos solos na jazida.

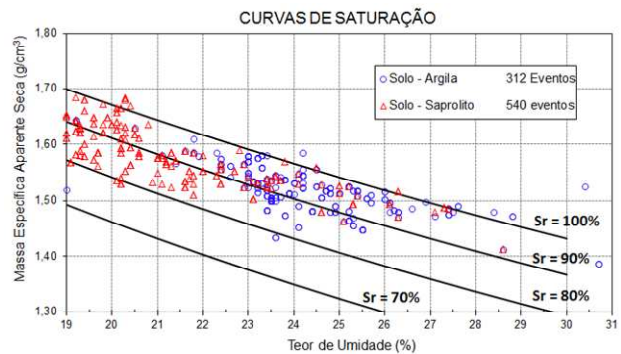


Figura 13. Curva de Saturação da Argila/Saprolito.

A Figura 13 apresenta a curva de saturação ( $S_r$ ) das 852 amostras por gênese de solo (Argila/Saprolito).

## 4 CONCLUSÕES

O presente artigo teve como objetivo analisar o comportamento dos materiais utilizados no alteamento de uma barragem para contenção de rejeitos.

Após as devidas investigações acerca dos resultados dos ensaios tecnológicos encontrados evidenciou-se que os materiais utilizados estavam em concordância com as normas pertinentes tendenciando a um comportamento seguro.

Com a divulgação desses resultados, espera-se que os parâmetros utilizados possam contribuir para futuros estudos acerca da qualidade dos materiais utilizados em barragens similares.

## REFERÊNCIAS

- Bicudo, R.I.; Leme, C.R.M. e Bourdeaux, G.H.R.M. (1980). *A reconstrução da Barragem de Euclides da Cunha: principais aspectos geotécnicos*. XIII Seminário Nacional de Grandes Barragens, CBGB, Rio de Janeiro - RJ, 2: 183-204.
- Caproni Júnior, N., Armelin, J. L., Lira, E. N. S., Shimabukuro, M., Ribas, J. B. M., Mori, R. T. (1994). *Fundações em solos residuais – Barragem de Corumbá I*. In: Seminário Nacional de Grandes Barragens, XXI, 1994, Recife. Anais... Recife: CBGB, p. 75-83.
- Leme, C. R. M., (1981). *Sobre Saprolitos de Basalto*. In: Seminário Nacional de Grandes Barragens, XIV,

- 1981, Recife. Anais...Recife: CBGB. p.147-161.
- Mafra, J. M. Q e Mori, R. T. (2003). *Saprolitos compactados na construção de Barragens de terra e enrocamento: o caso da Barragem do Sossego*. Comitê Brasileiro de Barragens. XXV Seminário nacional de Grandes Barragens. Salvador, 2003. T92 – A25. 18p
- Mori, R. T., Leme, C. R. M. Abreu, F. L. R., Pan, Y. F. (1978). *Saprolitos de basalto – Um estudo de seu comportamento geotécnico em maciços compactados*. In: VI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Rio de Janeiro....Anais...Rio de Janeiro, Vol. II.
- Pinto, C.S. (2000). Curso Básico de Mecânica dos solos. 2. Ed. Oficina de textos, São Paulo, SP, 355p.