

## Avaliação da densidade *in situ* de barragens de rejeitos com o penetrolgger

Luís Fernando Martins Ribeiro

*Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / UnB  
E-mail: lmartins@unb.br*

Luiz Heleno Albuquerque Filho

*Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil / Escola de Minas / UFOP  
E-mail: lheleno@geotecnia.em.ufop.br*

### Resumo

As diferenças nas características granulométricas e nos processos de disposição dos resíduos de mineração tendem a afetar, de forma significativa, o comportamento geotécnico das estruturas responsáveis pela sua contenção. Nesse sentido, algumas metodologias de controle da fase construtiva dos alteamentos foram propostas baseando-se em correlações entre as densidades e os parâmetros de resistência dos rejeitos. Entretanto essas metodologias apresentam limitações relacionadas à obtenção de amostras representativas, particularmente nos rejeitos granulares.

Nesse contexto, o objetivo desse trabalho consistiu na proposição de uma metodologia alternativa para determinação da densidade *in situ* de rejeitos de minério de ferro com a utilização de um equipamento de penetração estática de pequeno porte denominado penetrolgger. A realização conjunta de ensaios com o cilindro biselado e o penetrolgger nas barragens de rejeitos do Quadrilátero Ferrífero permitiu atestar a aplicabilidade do equipamento.

**Palavras-chave:** Ensaios de campo, densidade de rejeitos, aterros hidráulicos.

### Abstract

*The differences in the characteristics and the placement processes during the waste disposal tend to affect the geotechnical behaviour of tailings dams. Some methodologies of quality control during the construction phase have been proposed, which are based on the correlation between densities and strength parameters. Considering these methodologies, it is possible from field density analyses, to verify changes in the geotechnical parameters during construction phase. However, it has been observed that the field density measurements tend to present some problems due to the difficulties in obtaining representative samples, particularly for granular tailings.*

*In this context, the proposal of this investigation was to evaluate an alternative methodology based on the static penetration equipment (penetrologger test). Some tests have been carried out on a tailings dam in the Minas Gerais State, Brazil, in the mining region known as "Quadrilátero Ferrífero". The tests were made during the construction phase using the penetrolgger to evaluate field densities.*

**Keywords:** *In situ tests, tailings densities, hydraulic fills.*

## 1. Introdução

Os rejeitos são materiais remanescentes do processo de beneficiamento e concentração de minérios em instalações industriais. Suas características granulométricas encontram-se diretamente dependentes do tipo de minério bruto lavrado e do processo industrial de beneficiamento utilizado. Assim, sua composição pode abranger uma ampla faixa de materiais, variando desde solos arenosos não plásticos até solos de granulometria muito fina.

A crescente produção desses resíduos, impulsionada pela lavra de jazidas com baixo teor metálico, tem acentuado a necessidade de áreas cada vez maiores para sua disposição. As preocupações ambientais envolvidas nesse processo condicionam a adoção de diversas medidas para o adequado armazenamento desse material.

No passado, devido ao pequeno volume de rejeitos produzidos e à falta de especificações técnicas, esses materiais eram lançados aleatoriamente nos cursos d'água sem qualquer preocupação ambiental. As atuais estruturas de contenção de rejeitos (barragens e pilhas), mesmo executadas com maior controle, ainda tendem a gerar alguns impactos ao ambiente. Dessa forma, o grande desafio atual das empresas de mineração consiste em minimizar os impactos ao meio ambiente e reduzir os riscos de acidentes através da adoção de projetos mais otimizados.

A construção de barragens de contenção de rejeitos pode ser realizada com o próprio rejeito ou utilizando materiais provenientes das atividades de lavra (estéreis) e solos naturais de áreas de empréstimo. Por questões econômicas, as empresas de mineração adotam barragens não compactadas de rejeito granular depositado hidráulicamente (aterros hidráulicos). Essas estruturas são normalmente executadas com os equipamentos da própria mineradora com controle sistemático do processo de disposição dos rejeitos. Entretanto, a forma hídrica de lançamento implica a formação de depósitos com complexo compor-

tamento geotécnico, exigindo o conhecimento das características físicas do rejeito, particularmente a resistência ao cisalhamento, o adensamento e a permeabilidade.

Adicionalmente, o processo de segregação natural das partículas do rejeito na praia de deposição pode tornar-se um fenômeno bastante complexo em face das diferentes densidades dos minerais presentes. Esse processo de segregação hidráulica constitui um fenômeno bastante comum nos rejeitos de minério de ferro, em virtude da interação de diferentes granulometrias e densidades dos grãos de sílica e dos óxidos de ferro (Ribeiro, 2000).

Devido a essa grande variabilidade de fatores, torna-se difícil avaliar o comportamento dessas estruturas (Ribeiro & Assis, 2002). Dessa forma, algumas metodologias de controle de execução de barragens de rejeitos têm sido propostas, estabelecendo correlações entre os parâmetros de resistência e a densidade dos rejeitos constituintes dos depósitos (Espósito, 2000). Com base nessas metodologias, pode-se verificar as mudanças no comportamento da estrutura e quantificar as variações nos parâmetros geotécnicos durante a formação do depósito pela deposição hidráulica.

Contudo essa avaliação tende a apresentar problemas associados às metodologias usuais de determinação da densidade nos depósitos arenosos (frasco de areia e cilindro de cravação). Nesse contexto, o desenvolvimento desse trabalho está relacionado à avaliação da aplicabilidade do "penetrolgger" na rotina de monitoramento de campo do procedimento executivo das barragens de rejeitos construídas com a técnica de aterro hidráulico.

## 2. Descrição do penetrolgger

O penetrolgger pode ser definido como um pequeno cone estático que permite a determinação da resistência de ponta até uma profundidade de 80 centímetros. Esse equipamento foi desenvol-

vido especialmente para medir a resistência à penetração do solo de uma sonda de pequenas dimensões cravada com uma velocidade regular. Posteriormente, a adoção de um dispositivo de armazenamento garantiu grande autonomia para a realização de extensas campanhas de campo (Shanker, 2000).

A cravação do equipamento é realizada manualmente, dispensando os complexos sistemas de cravação dos aparelhos mais sofisticados. Durante todo o ensaio, a velocidade de penetração é regularmente controlada, podendo ser mantida em 2 cm/s através de uma placa de reflexão.

O equipamento completo consiste de um jogo de hastes com quatro cones de diferentes diâmetros e ângulos de inclinação de ponta e de um sistema de controle conectado a uma célula de medição de carga (Figura 1). O sistema de controle é composto por uma tela ajustável de LCD (8), um painel de controle (9) e um nível (10). O cone (4) é parafusado na extremidade inferior da haste (3). Além disso, o equipamento pode ser acoplado a um computador através de um cabo porta de comunicação (7).

## 3. Programa experimental

Os estudos desenvolvidos nessa pesquisa compreenderam a realização de ensaios de laboratório e campo em amostras de um rejeito de minério de ferro de uma barragem localizada na região do Quadrilátero Ferrífero, denominada FE1.

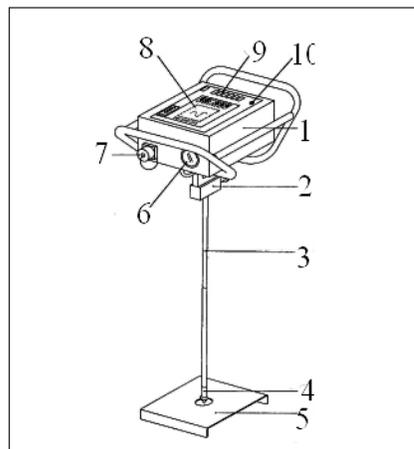


Figura 1 - Vista geral do penetrolgger.

A caracterização geotécnica desse material compreendeu a execução de ensaios de determinação da granulometria, densidade dos grãos e índices de vazios máximo e mínimo. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia da UFOP (Gomes et al., 2002).

### 3.1 Caracterização geotécnica do rejeito

Os ensaios de granulometria e densidade dos grãos ( $G_s$ ) foram executados de acordo com as normas técnicas padronizadas no Brasil. A Figura 2 ilustra a curva granulométrica do rejeito estudado com as respectivas frações granulométricas apresentadas na Tabela 1.

A determinação da densidade dos grãos e dos índices de vazios máximo e mínimo objetivou avaliar a variação das características dos rejeitos ao longo da praia de rejeitos. Assim, foram coletadas amostras a 1 m do lançamento (amostra 01) e a 20 m do lançamento (amostra 02).

Os elevados valores de densidade dos grãos obtidos, variando entre 3,84 e 3,88, indicaram a influência das partículas de óxido de ferro na composição mineralógica dos rejeitos (Ribeiro, 2000). Adicionalmente, deve-se destacar que os valores máximos e mínimos dos índices de vazios foram obtidos de acordo com as normas da ASTM (American Society for Testing and Materials).

### 3.2 Ensaios de Campo

O programa experimental de campo contou com a realização conjunta de ensaios para determinação da densidade relativa ( $D_r$ ) através do cilindro biselado e do penetrológico na região da praia de deposição de rejeitos. A campanha foi realizada através da marcação em campo de uma grande malha quadrangular composta por 5 seções longitudinais e 4 transversais ao eixo da barragem. As seções longitudinais foram espaçadas em 15 metros e as seções transversais distantes 50 metros entre si (Figura 3). Entretanto deve-se destacar que o posicionamento do mangote de descarga de

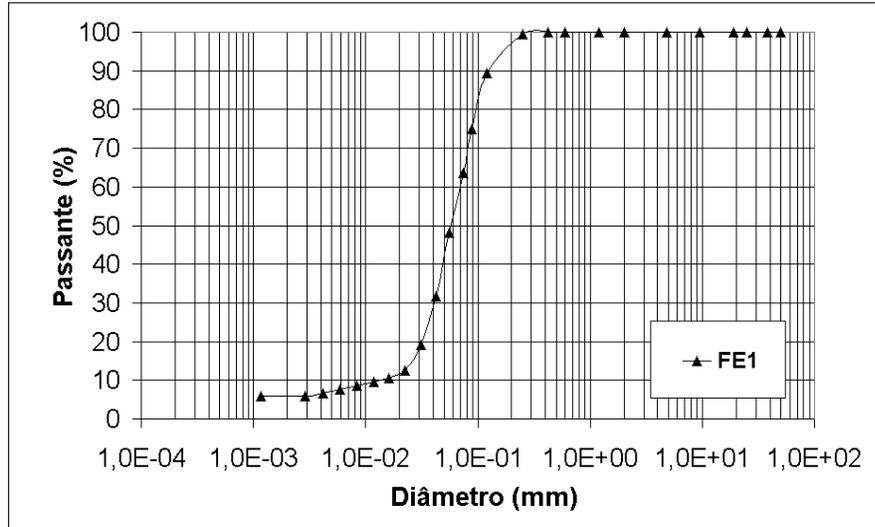


Figura 2 - Curva de distribuição granulométrica do rejeito FE1.

Tabela 1 - Distribuição granulométrica do rejeito FE1.

Rejeito	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
FE1	53	41	6

Tabela 2 - Parâmetros geotécnicos do rejeito FE1.

Amostra	$G_s$	$e_{min}$	$e_{max}$
1	3,88	0,92	1,55
2	3,84	0,91	1,49

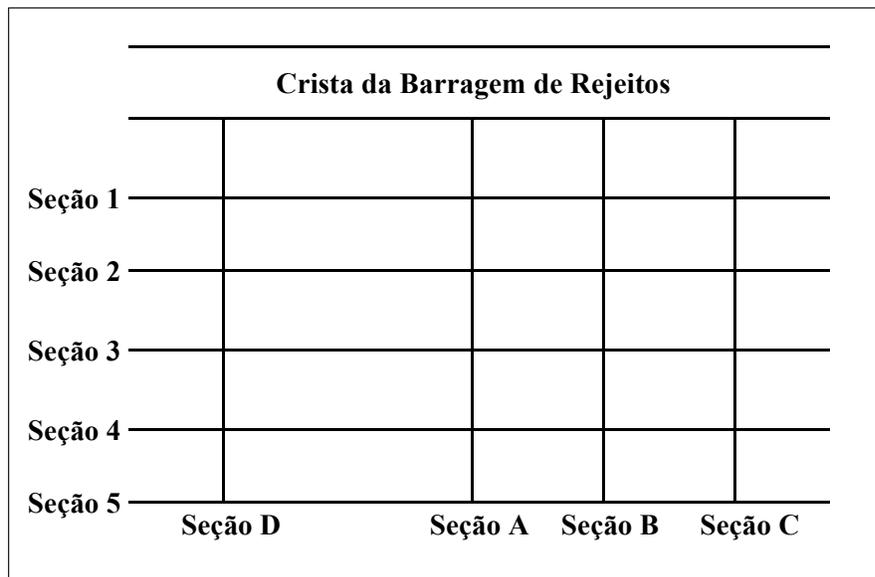


Figura 3 - Seccionamento da praia de deposição de rejeitos.

rejeitos entre as seções A e D implicou a adoção de um espaçamento maior (100 metros) entre essas duas seções.

## 4. Apresentação e análise dos resultados

### 4.1 Avaliação da densidade

A avaliação da densidade de solos granulares, utilizando o penetrolgger, é normalmente realizada através de correlações com a resistência de ponta obtidas em câmaras de calibração. A impossibilidade da realização dessa calibração em laboratório motivou a execução de procedimentos de comparação direta das medidas da resistência de ponta com a densidade relativa em todos os pontos da praia de deposição anteriormente definidos. Assim, a Tabela 3 apresenta os resultados do peso específico natural ( $\gamma$ ), teor de umidade e peso específico seco ( $\gamma_d$ ), obtidos através do cilindro de cravação.

A análise dos resultados obtidos com o cilindro de cravação permitiu o agrupamento dos pontos com peso específico seco mais próximos. Assim, a Figura 4 apresenta o perfil de variação da resistência de ponta medida com o penetrolgger em todos esses pontos.

Considerando a resistência de ponta nos 20 centímetros superficiais, correspondente ao estrato investigado pelo cilindro biselado, pode-se observar um bom ajuste de valores. Essa condição favorável das curvas permitiu buscar uma correlação entre a densidade relativa ( $D_r$ ), o peso específico seco ( $\gamma_d$ ) e a resistência de ponta medida com o penetrolgger. Assim, as equações foram obtidas através de um parâmetro denominado gradiente de resistência de ponta ( $G$ ), definido como a inclinação média das curvas. O gradiente de resistência de ponta adotado foi calculado para faixa de 5 a 20 centímetros de profundidade. Esse procedimento foi baseado em algumas análises anteriormente realizadas em solos granulares de diques holandeses (Karky, 2000). Dessa forma, foram construídas as curvas de tendência

Tabela 3 - Densidades obtidas pelo cilindro biselado.

Ponto	$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de Umidade (%)	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )
1A	1,68	3,90	1,62
1B	1,63	6,47	1,53
1C	1,72	2,91	1,68
1D	1,54	1,46	1,52
2A	1,78	4,29	1,71
2B	1,58	1,35	1,56
3A	1,64	7,58	1,52
3B	1,57	3,46	1,52
3C	1,68	7,41	1,56
4A	1,92	15,22	1,67
4B	1,62	5,50	1,53
5A	1,77	7,58	1,64
5B	1,58	3,73	1,53
5C	1,82	8,34	1,68

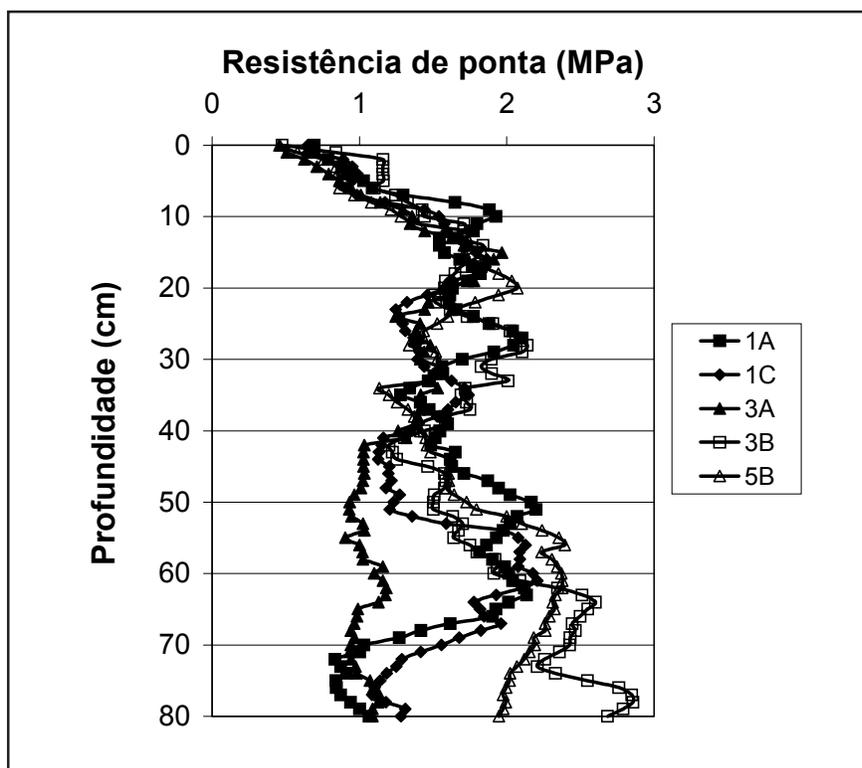


Figura 4 - Agrupamento dos pontos de densidades próximas.

respectivamente para o peso específico seco e para a densidade relativa (Figuras 5 e 6).

Os valores dos coeficientes de determinação indicaram o bom ajuste linear dos pontos, principalmente na correlação com a densidade relativa. A dispersão observada nos gráficos relaciona-se a algumas dificuldades encontradas na execução do cilindro biselado e na avaliação dos índices de vazios do rejeito. Porém, de forma preliminar, pode-se afirmar que os resultados obtidos atestaram a relação direta entre a resistência de ponta e a densidade de rejeitos granulares, reforçando a potencialidade do penetrológico na rotina do controle executivo de barragens de rejeito.

## 4.2 Avaliação do processo de segregação hidráulica

A segregação hidráulica representa a tendência de a fração sólida dos rejeitos depositar-se de forma diferenciada na praia de deposição, criando um gradiente de concentração e interferindo diretamente na composição granulométrica do depósito. O fluxo de uma polpa de rejeitos na praia provoca uma seleção das partículas e sua conseqüente

deposição em diferentes locais ao longo da trajetória do fluxo. Esse fenômeno tende a gerar uma enorme variabilidade estrutural, alterando significativamente os parâmetros de resistência, deformabilidade e condutividade hidráulica (Ribeiro, 2000).

As análises do processo de segregação nos depósitos formados através da técnica do aterro hidráulico têm sido comumente realizadas levando-se em consideração apenas o tamanho das partículas sedimentadas. Entretanto, na condição de os sedimentos apresentarem características mineralógicas muito diferentes, a segregação hidráulica pode tornar-se um fenômeno muito mais complexo.

De maneira geral, os grãos lançados hidráulicamente na praia tendem a se depositar nas proximidades dos pontos de descarga, em função da energia de transporte (Vick, 1983). Entretanto esse processo de segregação hidráulica encontra-se condicionado a diversos fatores, tais como o tipo de fluido, o tipo de sedimento, a distribuição granulométrica dos rejeitos, a concentração da lama, as condições de fluxo e a presença de aditivos químicos utilizados na polpa.

Assim, destaca-se que o processo de seleção das partículas pode ocorrer em função do peso e não necessariamente de seu tamanho. Esse fenômeno torna-se mais evidente quando as diferenças de densidade dos grãos dos materiais apresentam valores significativos. Nesse caso se enquadram os rejeitos de minério de ferro, que apresentam composição mineralógica constituída basicamente por partículas de sílica e ferro. Os grãos de sílica normalmente são mais grossos, enquanto as partículas de minério de ferro têm densidade dos grãos mais elevada.

Dessa forma, buscando avaliar o processo de segregação hidráulica na praia de deposição, a Figura 7 apresenta os resultados de resistência de ponta obtidos ao longo da Seção A. Embora apresente alguma dispersão, a análise desse gráfico permite identificar uma perda de resistência com o afastamento em relação aos pontos de descarga dos rejeitos (crista). Esse comportamento pode estar associado à concentração de partículas com maior diâmetro e com maior teor de ferro nas proximidades da região de lançamento, indicando a ocorrência de um padrão de segregação hidráulica influenciado diretamente pela densidade das partículas de minério de ferro.

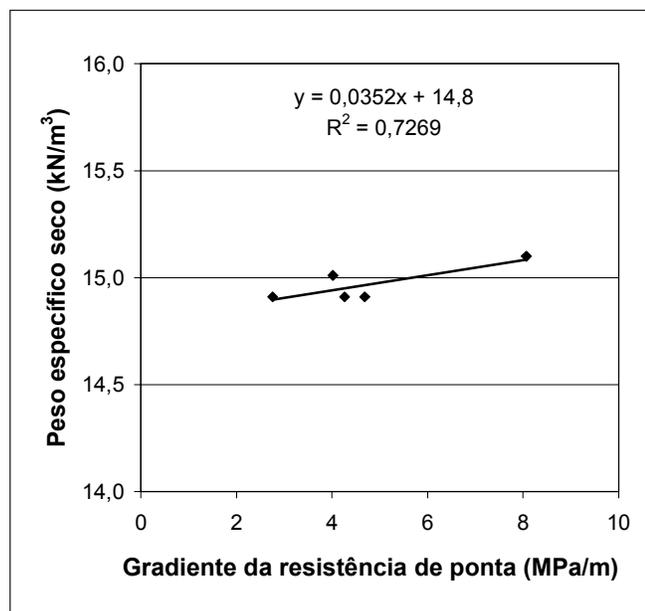


Figura 5 - Correlação entre o peso específico seco e o gradiente da resistência de ponta.

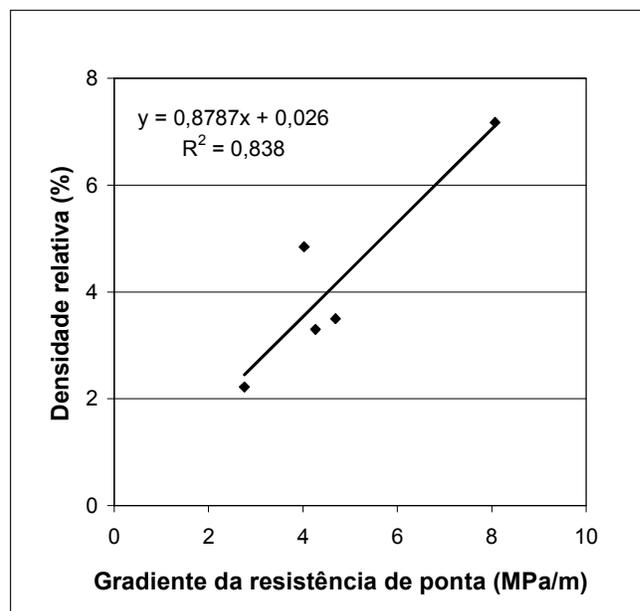


Figura 6 - Correlação entre a densidade relativa e o gradiente da resistência de ponta.

### 4.3 Comparação dos resultados do penetrolgger com o CPTU

A necessidade de avaliar a qualidade dos resultados do penetrolgger motivou a realização de uma comparação de seus valores com aqueles anteriormente obtidos em uma campanha de ensaios de piezocone realizados na mesma área da barragem (Albuquerque Filho, 2003). A combinação da variação da resistência de ponta ao longo da profundidade na região do ponto 2A através das duas técnicas permitiu a construção do gráfico apresentado na Figura 8.

A comparação dos resultados indicou uma maior uniformidade na variação da resistência de ponta obtida no ensaio de piezocone (CPTU). Esse comportamento pode ser explicado pelo controle absoluto da velocidade de cravação (2 cm/s) da sonda do piezocone, proporcionado pelo eficiente sistema de ancoragem para aplicação de cargas do penetrometro mecânico. Assim, a fixação rígida do equipamento ao terreno representa uma garantia adicional de qualidade na geração dos dados (Robertson & Campanella, 1983). Nesse sentido, os resultados demonstraram que, embora possa ser orientada pelo painel de controle, a velocidade de cravação do penetrolgger condiciona-se diretamente à experiência do operador. Entretanto os resultados atestaram a pequena interferência do processo de cravação manual do penetrolgger na magnitude da resistência de ponta medida.

### 5. Conclusões

O razoável ajuste linear das curvas de tendência, relacionando a resistência de ponta com o peso específico e a densidade relativa, atestou a grande potencialidade do penetrolgger na determinação da densidade *in situ* das barragens de rejeitos alteadas com a técnica do aterro hidráulico. Além disso, a facilidade de operação do equipamento, a rapidez e o baixo custo dos ensaios constituem as principais razões para a popu-

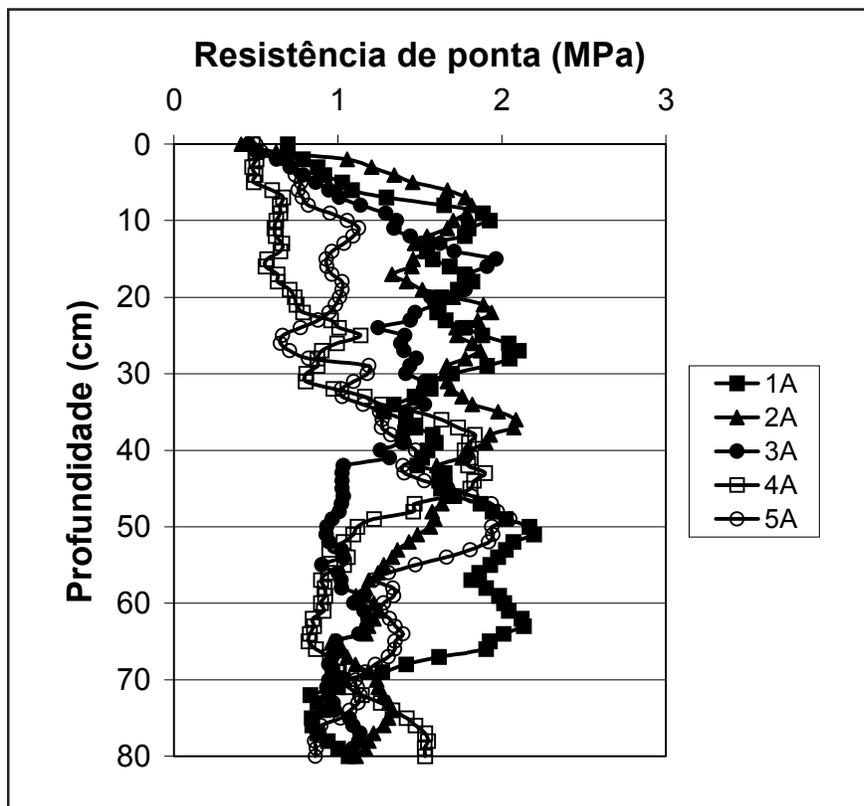


Figura 7 - Valores de resistência de ponta ao longo da seção A.

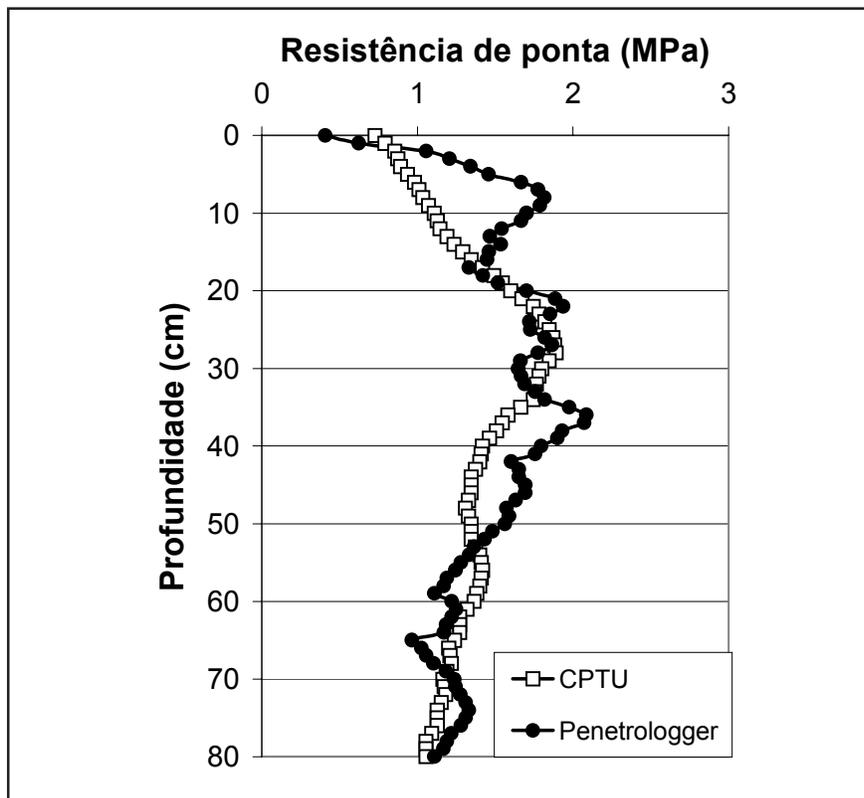


Figura 8 - Resultados dos ensaios de piezocone e penetrolgger realizados na região do ponto 2A.

larização do penetrológico na rotina das empresas mineradoras.

O processo de segregação hidráulica das partículas do rejeito foi comprovado pela variação da resistência de ponta ao longo de todas as seções transversais da área experimental. O aumento da capacidade de suporte (resistência) nas proximidades dos pontos de descarga dos rejeitos representou um indício da concentração de partículas mais grossas e com maior teor de ferro nessa região da praia de deposição. Esse comportamento demonstrou a ocorrência de um padrão de segregação hidráulica influenciado diretamente pela densidade das partículas de minério de ferro.

Adicionalmente, a comparação direta com os resultados de ensaios de pizecone realizados na área experimental indicou a pequena interferência da cravação manual do penetrológico na magnitude da resistência de ponta medida.

Para finalizar, buscando dirimir algumas deficiências relacionadas à determinação da densidade e aferir melhor o modelo, as próximas etapas dessa pesquisa consistem na realização de extensas campanhas de calibração em laboratório, na ampliação do programa de investigação com o penetrológico em diferentes barragens de minério de ferro e

na realização de estudos relacionados à identificação da forma e estrutura dos minerais presentes nos rejeitos (ensaios de microscopia óptica e eletrônica e difração de raios X).

## 6. Agradecimentos

Os autores agradecem à CVRD pelo apoio estrutural e ao CNPq pelo financiamento da pesquisa.

## 7. Referências bibliográficas

- ABNT. Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. NBR 6508. Associação Brasileira de Normas Técnicas. São Paulo. 1984a.
- ABNT. Solo - Análise granulométrica. NBR 7191. Associação Brasileira de Normas Técnicas. São Paulo. 13 p. 1984b.
- ALBUQUERQUE FILHO, L.H. Análise do comportamento geotécnico de sistemas de disposição de rejeitos através de ensaios CPTU. In: SEMINÁRIO DE QUALIFICAÇÃO DO MESTRADO EM GEOTECNIA. Ouro Preto: UFOP, 2003.
- ASTM. Standard test method for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table. D4253. American Society for Testing and Materials. 1991a.
- ASTM. Standard test method for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density. D4254. American Society for Testing and Materials. 1991b.
- ESPÓSITO, T.J. *Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico*. Brasília: Universidade de Brasília, 2000. (Tese de Doutorado).
- GOMES, R.C., PEREIRA, E.L., RIBEIRO, L.F.M., SILVA, J.T.G. Evaluation of liquefaction potential of grained tailings. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNICS, 4. Rio de Janeiro, 1, p. 329-333. 2002.
- KARKY A. *Cone penetration test at shallow depth. The influence of cone shape*. 2000. (M.Sc. Thesis H.E. 060).
- RIBEIRO, L.F.M. *Simulação física do processo de formação dos aterros hidráulicos aplicado a barragens de rejeitos*. Brasília: Universidade de Brasília, 2000. (Tese de Doutorado).
- RIBEIRO, L.F.M., ASSIS A.P. The hydraulic deposition tests applied to tailings dams evaluation. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNOLOGY AND GLOBAL SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 6. Seoul, n. 1, p. 45-55. 2002.
- ROBERTSON, P. K., CAMPANELLA, R.G. Interpretation of cone penetrometer test, Part I: Sand. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 20, n. 4, p. 718-733, 1983.
- SHANKER R. *Cone penetration test at shallow depth in sand. The influence of equipment*. 2000. (M.Sc. Thesis H.E. 062).
- VICK, S.G. *Planning, design and analysis of tailings dams*. John Wiley & Sons, Inc., 1983. 369 p.

Artigo recebido em 04/12/2003 e  
aprovado em 03/11/2004.

**REM - Revista Escola de Minas**

\*\*\*\*\*

**www.rem.com.br**

\*\*\*\*\*

**www.scielo.br**