

# Melhoramento de Solo com Incorporação de Resíduos de Siderurgia

Ciro Loyola Tessari

Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil, cirotessari@gmail.com

Rebecca Pezzodipane Cobe

Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil, re\_cobe@hotmail.com

Patrício José Moreira Pires

Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil, patricio.pires@gmail.com

**RESUMO:** Este trabalho apresenta um estudo técnico experimental sobre a utilização de escória Dry Pit (escória de alto forno resfriada ao ar) e escória KR (escória de aciaria originada no processo de pré-tratamento de dessulfuração do ferro gusa pelo processo de Kambara Reactor) como aditivos para a estabilização química de um solo de baixa consistência, com o objetivo de melhorar as características geomecânicas desse solo. Para tanto, foram moldados corpos de prova com solo puro, e solo com diferentes porcentagens de adições de cimento Portland, escória KR e escória Dry Pit. As amostras moldadas foram submetidas aos ensaios de cone *fall* e de palheta para obtenção da resistência ao cisalhamento não drenada. O acompanhamento das amostras foi feito até o quadragésimo segundo dia após a moldagem. A partir dos resultados obtidos, observou-se que a escória KR configurou-se como um bom agente estabilizante tanto quando aplicado como adição única, quanto em conjunto com o cimento. A escória Dry Pit como adição única apresentou ganhos de resistência pouco expressivos. No entanto, quando adicionada em conjunto com o cimento obteve ganhos de resistência significativos, mostrando que houve uma boa interação entre esses materiais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Melhoramento de solos, estabilização química, adição de escórias de alto forno e de aciaria, aproveitamento de resíduos.

## 1 INTRODUÇÃO

A resistência do solo é um fator crítico de qualquer obra de engenharia, tendo em vista que todos os esforços da estrutura são suportados pela fundação. Apesar de estar presente em abundância no substrato, muitas vezes o solo não possui as características geomecânicas necessárias para suportar os esforços solicitantes.

Nas últimas décadas, é cada vez maior a quantidade de projetos de Engenharia Civil construídos sobre espessas camadas de solo mole. Nestas condições, faz-se necessária a utilização de métodos de melhoramento de solo,

que são processos que os adequam a uma determinada proposta de construção, a fim de se obter a estabilidade do corpo de terra contra falha ou movimento.

Dentre os diversos tipos existentes de melhoramento de solos, a estabilização química, foco deste estudo, tem como objetivo aumentar a sua resistência e capacidade de carga, e minimizar os efeitos de recalques absolutos por meio de aplicação de agentes estabilizantes.

Vários tipos de aditivos químicos são usados atualmente na estabilização química de solos. Dentre os mais usados e eficazes, tem-se o cimento e a cal. Conhecer as propriedades geotécnicas do solo é crucial para a escolha do

aditivo mais apropriado para obter-se a resistência desejada e a viabilidade econômica do projeto. Dessa forma, é importante estudar e testar as interações do solo com os agentes estabilizantes que se pretende utilizar.

O escopo deste trabalho consiste no estudo da aplicação de escórias de siderurgia – tipos Dry Pit de alto forno e KR de aciaria – com o objetivo de estabilizar um solo de baixa consistência, a argila bentonita. A bentonita foi escolhida por ser um solo com propriedades bem conhecidas e que, por possuir consistência muito baixa, representa um caso extremo de estabilização no contexto da construção civil.

Essas escórias são resíduos gerados durante o processo de fabricação do aço. A adição desses materiais tem como propósito aliar o benefício da estabilização do solo com o aproveitamento de resíduos industriais. O uso de coprodutos apresenta como vantagens ambientais e econômicas: a redução do investimento em energia que seria investido no processamento de materiais virgens, o provimento de destinação adequada aos resíduos e a redução do impacto gerado pela extração de minerais virgens em jazidas.

O principal parâmetro de análise utilizado nesta pesquisa foi a resistência ao cisalhamento não drenada. Com o objetivo de se avaliar a resistência não drenada ao longo do tempo, foram feitos ensaios de cone e palheta em laboratório. Para isso, foram moldadas amostras com seis combinações de diferentes proporções de solo e adições de cimento e escórias. O cimento foi usado com o objetivo de se ter um aditivo de referência para possibilitar uma comparação dos resultados obtidos com as escórias.

## 2 MATERIAIS

Neste estudo utilizou-se a bentonita sódica ativada proveniente de jazida do estado da Paraíba. A principal característica desse material, segundo Rezende (2008), é a grande expansibilidade quando em contato com a água, aumentando várias vezes o seu volume, formando géis tixotrópicos. A caracterização da bentonita foi realizada e se encontra no Item 4

Análise e discussão de resultados.

Foi utilizado o Cimento Portland composto com Escória de Alto Forno (CP III 40 RS) como aditivo de referência para avaliar o desempenho das adições de escórias. Esse tipo de cimento foi escolhido por apresentar maior resistência a ambientes agressivos, considerando que este estudo tem como objetivo o melhoramento de solos moles, que eventualmente apresentam essas condições.

As escórias de siderurgia são resíduos gerados no processo de produção do aço. A escória Dry Pit ou escória bruta é um tipo de escória gerada dentro dos altos fornos e que passa por processo lento de resfriamento. Já a escória KR é gerada no processo de pré-tratamento de dessulfuração do ferro gusa que sai dos altos fornos e se dirige aos convertedores pelo processo de Kambara Reactor.

A escória Dry Pit, depois de moída, apresentou aproximadamente 16% de grãos finos e 84% de grãos miúdos. A estrutura dessa escória é cristalina devido ao resfriamento lento que permite a cristalização desse material. Segundo Thomaz (2015), essa característica influi negativamente no potencial cimentante devido ao baixo teor de material vítreo presente nesse tipo de escória. Por outro lado, a relação  $\text{CaO/SiO}_2$  desse material é de 1,24, superior a 1, o que aliado ao alto teor de alumínio indica um possível potencial aglomerante. A composição química está apresentada na tabela 1.

Tabela 1. Composição química da escória DryPit. Fonte: Arcelor Mittal Tubarão (2015)

| Composição química |                  |                                |        |       |       |
|--------------------|------------------|--------------------------------|--------|-------|-------|
| FeO                | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO    | MgO   | TiO   |
| 0,45%              | 33,65%           | 12,42%                         | 41,60% | 7,95% | 0,73% |

A escória KR utilizada apresentou aproximadamente 10% de grãos finos e 90% de grãos miúdos. A composição química da escória KR está apresentada na Tabela 2. Analisando essa composição, observa-se que a relação  $\text{CaO/SiO}_2$  dessa escória é de aproximadamente 3,76, bem superior a 1, o que indica um bom potencial aglomerante.

Tabela 2. Composição química da escória KR. Fonte: Mendonça et al. (2013)

| Composição química |                  |                                |        |       |        |
|--------------------|------------------|--------------------------------|--------|-------|--------|
| FeT                | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO    | MgO   | Outros |
| 30,01%             | 10,38%           | 3,15%                          | 39,04% | 3,14% | 14,28% |

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Corpos de prova

Para analisar o efeito de cada aditivo na estabilização da bentonita foram ensaiadas amostras com seis diferentes composições. Para cada composição, foram moldadas duas amostras de forma a possibilitar comparação dos resultados, proporcionando maior precisão e confiabilidade dos dados obtidos. As porcentagens dos materiais de cada composição estão indicadas na Tabela 3.

Tabela 3. Composição das amostras.

| Composição | Bentonita | Cimento Portland | Escória KR | Escória Dry Pit |
|------------|-----------|------------------|------------|-----------------|
| 1          | 100%      | -                | -          | -               |
| 2          | 90%       | 10%              | -          | -               |
| 3          | 90%       | -                | 10%        | -               |
| 4          | 90%       | 5%               | 5%         | -               |
| 5          | 90%       | -                | -          | 10%             |
| 6          | 90%       | 5%               | -          | 5%              |

A composição 1 não possui nenhuma adição, pois tem como objetivo possibilitar a comparação de seus resultados com os obtidos nas amostras com adições, de forma a verificar o ganho de resistência devido às adições.

O cimento foi usado como aditivo de referência e, por esse motivo, as amostras da composição 2 possuem apenas o cimento como adição. Essas amostras servirão como base para a verificação da eficiência das escórias KR e Dry Pit como adições.

As amostras da composição 3 são equivalentes às amostras da composição 5. Ambas possuem apenas escória como adição, sendo que a primeira possui escória KR e a última escória Dry Pit.

Além dessas, também foram testadas composições contendo 5% de cimento e 5% de um tipo de escória, com o objetivo de avaliar a interação dessas escórias com o cimento na estabilização química da bentonita. Essas composições são a 4 e a 6, contendo escória KR e escória Dry Pit, respectivamente.

De acordo com Liu e Evett (2004), em estabilizações de solo, cujo aditivo é o cimento, a quantidade adicionada para se obter um solo mais resistente que o solo natural é proporcionalmente pequena, variando normalmente de 7% a 14% do peso do solo. Baseado nessas porcentagens de adições sugeridas por Liu e Evett, optou-se por usar um valor intermediário de 10% de adição nas amostras testadas nesse estudo.

Todas as amostras testadas neste estudo são amostras do tipo remoldadas em laboratório, sendo assim, os termos amostra indeformada ou amostra amolgada não se aplicam nesse estudo, já que as amostras não foram retiradas diretamente do campo em seu estado natural.

As amostras foram moldadas com teor de umidade próximo ao limite de liquidez do solo (bentonita). Sendo assim, como esse solo possui um limite de liquidez extremamente alto em comparação com outros solos, as amostras foram moldadas com um teor de umidade muito elevado, em torno de 500%.

A bentonita e a escória KR foram inseridas na amostra exatamente na granulometria em que foram recebidas. O cimento, por apresentar alguns poucos torrões, foi penerado e apiloado. Já a escória Dry Pit possuía uma granulometria um pouco maior do que a da escória KR e, para que pudesse ser feita uma comparação de resultados partindo-se da mesma granulometria, a escória Dry Pit foi moída em laboratório através de um moedor de bolas até que atingisse granulometria próxima a da escória KR.

O procedimento de moldagem de cada uma das doze amostras consistiu nas seguintes etapas: (1) Pesagem dos materiais nas proporções exatas da composição da amostra, incluindo a medida certa de água; (2) Mistura a seco dos materiais; (3) Adição de um pouco de água e início do processo de mistura com auxílio de uma espátula de laboratório e uma espátula de pedreiro; (4) Repetição do item 3

até que toda a água medida para a amostra tivesse sido adicionada e até a completa homogeneização da amostra; (5) Retirada de três pequenas amostras para aferição da umidade de acordo com o procedimento recomendado pela norma ABNT NBR 6457:1986; (6) Identificação do tubo em que a amostra foi moldada com o número da amostra; (7) Moldagem da amostra no tubo com auxílio de uma espátula em finas camadas, iniciando-se das paredes do tubo para o centro e de baixo para cima do tubo, num formato cônico, e (8) Vedação da parte superior das amostras com uma película plástica para evitar a perda de umidade da amostra.

### 3.2 Ensaios de laboratório

A presente pesquisa apresenta o resultado de dois tipos de ensaios de laboratório não convencionais para a determinação da resistência ao cisalhamento não drenada ( $S_u$ ), sendo eles o ensaio de cone *fall* e o ensaio de palheta. Além dos ensaios para obtenção do parâmetro de resistência não drenada que foram feitos nos corpos de prova, realizou-se ainda ensaios para caracterização física da bentonita.

Os principais aspectos que justificam a adoção destes ensaios não convencionais são a simplicidade, a velocidade e o baixo custo com que se obtêm os dados experimentais, permitindo ainda, o maior número de determinações para uma mesma amostra quando comparados aos ensaios de laboratório usuais.

Devido à limitação do espaço na superfície superior das amostras, a partir do trigésimo quinto dia de cada mistura, todos os ensaios passaram a ser feitos na superfície inferior das amostras, sendo que os ensaios de cone no trigésimo quinto dia foram realizados tanto na superfície superior quanto na superfície inferior. Mesmo com a aplicação de vedação nas amostras para evitar a perda de umidade, as superfícies inferiores preservaram um teor de umidade maior devido ao extensivo programa de ensaios nas amostras.

#### 3.2.1 Ensaios de Caracterização da Bentonita

A caracterização da bentonita consistiu na realização dos seguintes ensaios: sedimentação (ABNT NBR 7181:1984), limite de liquidez pelo ensaio de Casagrande (ABNT NBR 6459:1984), limite de plasticidade (ABNT NBR 7180:1984) e determinação da massa específica (ABNT NBR 6508:1984).

#### 3.2.2 Ensaio de Cone (*Cone Fall*)

O ensaio de cone de laboratório é um método simples em que um cone metálico é colocado verticalmente sobre a amostra, com a ponta ligeiramente em contato com a superfície do solo e ao ser liberado cai livremente pelo seu próprio peso. Através da medida da profundidade de penetração pode ser mensurada a resistência não drenada.

Não existe uma norma brasileira de regulamentação desse ensaio, por isso neste estudo os procedimentos do ensaio foram realizados seguindo as recomendações da norma europeia ISO/TS 17892-6.

Um estudo apresentado por Hansbo (1957) mostra que a relação entre a penetração do cone e a resistência não drenada do solo, em kPa, é dada pela Equação 1.

$$S_u = k \times g \times \left(\frac{W}{h^2}\right) \quad (1)$$

Onde  $W$  é a massa do cone em gramas,  $g$  é a aceleração do cone em queda em  $m/s^2$ ,  $h$  a profundidade de penetração do cone no solo em milímetros e  $K$  é uma constante empírica que depende do ângulo e da rugosidade do cone.

Para os ensaios de cone foi utilizado o equipamento denominado penetrômetro de cone para solos, comercializado pela empresa Solotest. O cone que acompanha o equipamento tem ângulo interno de  $30^\circ$  e peso do conjunto cone e haste de 80 g e a rugosidade média do cone de  $0,40 \mu m$ . Os ensaios de cone foram realizados nas superfícies das amostras.

A especificação técnica da norma europeia ISO/TS 17892-6 para o ensaio de cone de laboratório indica valores de  $K$  de 0,8 a 1,0 para cone de  $30^\circ$ , para uma rugosidade média do cone inferior a  $0,8 \mu m$ . Nesse estudo, foram adotados os valores da constante empírica  $K$

igual a 0,90 e aceleração da gravidade igual a 9,81 m/s<sup>2</sup>.

Os ensaios de cone foram realizados nos seguintes dias após a moldagem de cada amostra: 1, 4, 7, 14, 21, 28, 35 e 42 dias. Na Figura 1, está ilustrado o procedimento do ensaio imediatamente antes e após a liberação do cone.



Figura 1. Antes e depois do ensaio de cone.

### 3.2.3 Ensaio de Palheta (*Mini Vane Test*)

O ensaio de palheta de laboratório consiste em inserir verticalmente na amostra de solo uma palheta de seção cruciforme com quatro pás radialmente opostas, e em seguida aplicar uma rotação a velocidade constante e padronizada, medindo-se o torque necessário para causar o cisalhamento da superfície cilíndrica do solo, em condições não drenadas.

Com base no torque medido e dimensões da palheta é possível determinar a resistência ao cisalhamento não drenada do solo em kPa com base nas Equações 2 e 3, considerando o solo isotrópico.

$$S_u = \frac{T}{k} \times 10^{-4} \quad (2)$$

$$K = \frac{\pi \times D^2}{10^9} \left( \frac{H}{2} + \frac{D}{6} \right) \quad (3)$$

Onde T é o torque máximo medido em kgf.cm, D é o diâmetro e H a altura da palheta em milímetros.

Para os ensaios de palheta de laboratório realizados neste estudo, foi utilizado o equipamento motorizado fabricado pela empresa Wykeman Farrance Engineering Ltda. Acompanha o equipamento um conjunto de

quatro molas com respectiva calibração, sendo que, para os ensaios realizados, foi utilizada a mola mais flexível por ser a mais adequada para medir as baixas resistências de cisalhamento não drenadas envolvidas. A Figura 2 mostra o equipamento utilizado durante a execução de um dos ensaios.



Figura 2. Equipamento utilizado para ensaio de palheta – ensaio em execução.

Os procedimentos adotados no ensaio foram baseados na norma internacional ASTM D4648. Conforme recomendado por essa norma, preliminarmente à execução dos ensaios, foi feita a calibração da mola. Neste estudo, foi adotada a palheta com relação 1:1 e dimensões iguais a 12,7 mm, para que fosse possível a realização de ensaios em duas camadas da amostra, respeitando os espaçamentos mínimos entre dois ensaios exigidos pela norma.

Os ensaios de palheta tiveram início no décimo quarto dia de cada amostra (após serem moldadas) e foram realizados semanalmente em todas as amostras até o quadragésimo segundo dia.

## 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A partir da caracterização da bentonita realizada em laboratório, obtiveram-se os seguintes resultados: massa específica ( $G_s$ ) igual a 2,57 g/cm<sup>3</sup>, limite de liquidez (LL) igual a 548,42%, limite de plasticidade (LP) igual 40,40% e índice de plasticidade (IP) igual a 508,02%.

O resultado do ensaio de granulometria realizado com a bentonita mostrou se tratar de um material muito fino, com 98,13% de finos e

1,87% de agregados miúdos. Além disso, notou-se que é um material mal graduado, pois sua granulometria é bastante uniforme.

A bentonita utilizada, segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solo, é classificada como CH – Clay of high plasticity, ou seja, trata-se de uma argila com alto índice de plasticidade.

Os resultados dos ensaios de laboratório – ensaio de cone (*cone fall*) e de palheta (*mini vane test*) – estão apresentados nas Figuras 3 e 4, respectivamente.

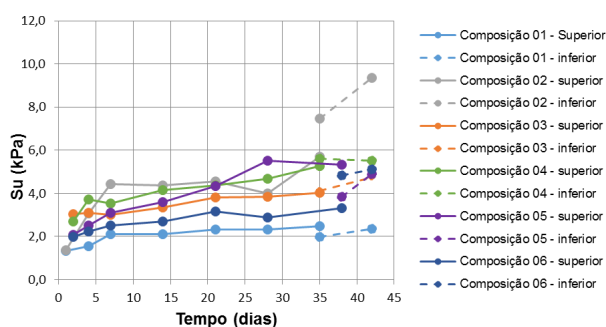


Figura 3. Ensaio de Cone – Variação da resistência não drenada com o tempo.

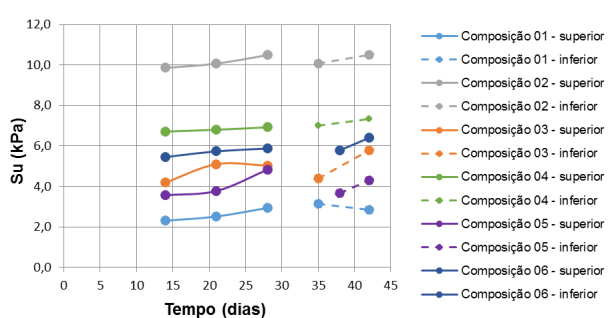


Figura 4. Ensaio de Palheta – Variação da resistência não drenada com o tempo.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios de cone e de palheta, foi possível analisar o comportamento dos materiais utilizados com relação à resistência ao cisalhamento não drenada ( $S_u$ ). Esse parâmetro foi analisado ao longo do tempo e, em geral, todas as composições testadas obtiveram ganho de resistência.

O resumo dos resultados obtidos com os ensaios de cone e de palheta está apresentado na Tabela 5. O ganho de resistência das composições com adições (composições 2, 3, 4, 5, 6) foi relacionado, em termos de porcentagem, com a resistência máxima

atingida pela composição de bentonita pura (composição 1).

Tabela 4. Resumo comparativo dos resultados obtidos nos ensaios de cone e palheta.

| Composição                      | 1    | 2     | 3    | 4    | 5    | 6    |
|---------------------------------|------|-------|------|------|------|------|
| $S_{u\text{máx}}$ Cone (kPa)    | 2,50 | 9,00  | 4,70 | 5,50 | 5,50 | 5,20 |
| Ganho de resistência (cone)     | -    | 360%  | 188% | 220% | 220% | 208% |
| $S_{u\text{máx}}$ Palheta (kPa) | 3,30 | 10,50 | 5,80 | 7,40 | 4,40 | 6,40 |
| Ganho de resistência (palheta)  | -    | 318%  | 176% | 224% | 133% | 194% |

Em linhas gerais, observa-se que as resistências obtidas pelos ensaios de palheta são superiores às obtidas pelos ensaios de cone. Segundo Head (1994), tal fato pode ser justificado, pois diferentes tipos de ensaios podem fornecer divergentes resultados de resistência ao cisalhamento não drenada.

Para os ensaios de laboratório de cone e de palheta, uma das principais razões que justificam a diferença entre as resistências obtidas é o fato de eles serem realizados em camadas diferentes da amostra, o que proporciona diferentes condições de umidade.

Conforme esperado, a composição 2 foi a que obteve o melhor resultado de ganho de resistência, tendo em vista que o cimento foi escolhido como agente estabilizante de referência neste estudo justamente por possuir grande potencial aglomerante.

As composições que obtiveram o segundo e terceiro melhor resultado foram as composições 4 e 6, respectivamente, ambas contendo adições de escórias e cimento, mostrando que houve uma boa interação entre esses materiais.

As determinações dos resultados de  $S_u$  obtidas por meio do ensaio de cone da composição 5 foram superiores aos obtidos com o ensaio de palheta, o que diverge das demais composições.

Comparando-se as resistências obtidas entre as composições que possuíam adições somente de escórias, a composição 3, que contém adição de escória KR, alcançou resultado superior ao da composição 5, que contém adição de escória Dry Pit. Este resultado era esperado, tendo em

vista que a escória KR, diferentemente da Dry Pit, é reconhecida pelo seu bom potencial aglomerante.

Vale destacar, entretanto, que embora a escória Dry Pit não seja reconhecida pelo seu poder aglomerante, a adição dessa escória com cimento alcançou bons resultados, superando, inclusive, o resultado alcançado pela adição somente de escória KR. Esse resultado pode ser justificado devido à presença de carbonatos do cimento que podem ter estabilizado a escória Dry Pit, tendo em visto que a adição de cal e/ou cimento é uma forma de estabilização desse material.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os valores de resistência ao cisalhamento não drenado determinados para as composições, por meio dos ensaios de cone e de palheta, apresentaram resultados compatíveis com o esperado para os resíduos/cimento adicionados ao solo (bentonita), o que evidencia que a metodologia experimental adotada foi satisfatória.

A escória KR apresentou bons resultados de ganho de resistência nas composições em que foi usada como aditivo. No entanto, essa escória possui característica expansiva, o que pode ser um fator limitante para algumas aplicações, como, por exemplo, em sub-bases de leitos rodoviários. Entretanto, para técnicas de estabilização de solo que utilizam bulbos de compressão para acelerar a expulsão de água do solo pela malha de drenos previamente cravada, essa propriedade pode ser vista como uma vantagem. Isso porque a expansibilidade dessa escória pode auxiliar na compressão exercida pelos bulbos sobre o solo.

A escória Dry Pit, quando adicionada como aditivo único, apresenta algum ganho de resistência, porém pouco significativo. No entanto, quando adicionada em conjunto com o cimento, observou-se que o ganho de resistência foi substancial. Sendo assim e, considerando que a escória Dry Pit não apresenta expansibilidade, a adição desse material juntamente com o cimento poderia ser aplicada para a estabilização de solos moles por meio de

técnicas de estabilização de massa com aplicação de aglomerantes em pó.

Diante do que foi estudado e dos resultados obtidos pelos ensaios de laboratório realizados nesse trabalho, percebeu-se que os resíduos de siderurgia testados podem ser aproveitados para o melhoramento de solos, visando-se obter ganhos de sustentabilidade e economia. No entanto, para que se confirme a viabilidade da aplicação desses resíduos, sugere-se a realização de testes em escala real, a utilização de outros tipos de cimento, o estudo de outros teores de adições de resíduos e ainda a execução de outros tipos de ensaios.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos à equipe do Laboratório de Solos da Universidade Federal do Espírito Santo pelo apoio na realização dos ensaios e aos colaboradores da empresa Arcelor Mittal Tubarão por valorizarem desde o início a nossa pesquisa e por nos fornecerem os materiais necessários à realização dos ensaios.

## REFERÊNCIAS

- American Society for Testing and Materials. **D4648/D4648M-10**: Standard test method for laboratory miniature vane shear test for saturated fine-grained clayey soil, 2010.
- Arcelor Mittal Tubarão. Escória de alto forno. Disponível em: <[http://www.cst.com.br/produtos/co\\_produtos/catalogo\\_produtos/escoria\\_forno/](http://www.cst.com.br/produtos/co_produtos/catalogo_produtos/escoria_forno/)> Acesso em 12 de mar. 2015.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6457**: amostras de solo – Preparação para ensaios de Compactação e Caracterização. Rio de Janeiro, 1986.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6459**: solo - determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6508**: grãos de solo que passam na peneira de 4,8mm - determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7180**: solo - determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7181**: solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

- catálogo\_produtos/escoria\_forno/> Acesso em 12 de mar. 2015.
- European Comimittee for Standardization. **ISO/TS 17892-6**: Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing soil - Part 6: Fall cone test. Switzerland, 2004.
- Hansbo, S. (1957) **A New Approach to the Determination of the Shear Strength of Clay by the Fall Cone Test**. Royal Swedish Geotechnical Institute, Proceeding 14, Stockhol, 47 p.
- Head, K. H. (1994) Manual of soil laboratory testing. 2nd Ed. London: Pentech Press, 2 v.
- Liu, C.; Evett, J.B. (2004) **Soils and foundations**. 6th ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- Mendonça, R. L. et al. Responsabilidade social e empresarial no tratamento de resíduos. Trabalho apresentado na III Conferência internacional de gestão de resíduos da America Latina, São Paulo, 2013. Disponível em : <[http://gral.eng.br/g/images/easyblog\\_images/73/RESPONSABILIDADE-SOCIAL-E-EMPRESARIAL-NO-TRATAMENTO-DE-RESIDUOS-GRAL2013.pdf](http://gral.eng.br/g/images/easyblog_images/73/RESPONSABILIDADE-SOCIAL-E-EMPRESARIAL-NO-TRATAMENTO-DE-RESIDUOS-GRAL2013.pdf)>. Acesso em: 15 abr. 2015.
- Rezende, M. M. Bentonita. 2008. Disponível em: <<http://www2.dnrm.gov.br/assets/galeriaDocumento/SumarioMineral2008/Bentonita.pdf>> Acesso em: 30 de abr. 2015.
- Thomaz, E. C. S. Escória de alto forno: fabricação. Disponível em: <[http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/cimentos\\_concretos/escoria\\_fabricacao.pdf](http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/cimentos_concretos/escoria_fabricacao.pdf)> Acesso em: 14 de mar. 2015.