

## APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS – ESTUDO EXPERIMENTAL DE MISTURAS DE SOLO E CINZA VOLANTE DE CARVÃO MINERAL

Deyvid de Souza ELIAS<sup>1</sup>; Anderson Borghetti SOARES<sup>2</sup>; Henrique Petisco de SOUZA<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>Universidade Federal do Ceará, deyvidselias@gmail.com; <sup>2</sup>Universidade Federal do Ceará, borghetti@ufc.com.br; <sup>3</sup>Universidade Federal do Ceará, henrique.petisco@gmail.com

### RESUMO

O reaproveitamento de cinzas geradas pela queima do carvão mineral é um assunto de grande relevância no contexto atual. Os elevados volumes de cinzas gerados na produção de energia em termoeletricas, têm estimulado o desenvolvimento de estudos, que visam propor uma destinação adequada a este resíduo, de modo a atenuar possíveis impactos ambientais. Sob esta perspectiva, o presente trabalho estudou a utilização das cinzas volantes como material impermeabilizante em obras ambientais, como camada de fundo de depósitos de resíduos (liners). O estudo obteve parâmetros geotécnicos de mistura de cinzas volantes com diferentes teores de bentonita (5, 10 e 20%), uma vez que a cinza volante estudada não apresentou permeabilidade adequada para este fim. As cinzas volantes utilizadas são oriundas da queima de carvão mineral da usina termoeletrica Pecém I, localizada no município de São Gonçalo do Amarante no estado do Ceará, caracterizadas como um resíduo II-A. O estudo contou com ensaios de caracterização (análise granulométrica, determinação dos limites de liquidez e plasticidade e densidade real), compactação, permeabilidade, ensaios de caracterização química (fluorescência de raios-X) e ensaios mineralógicos (MEV e difração de raios-X) das cinzas volantes, bentonita e misturas. Observou-se que o aumento do teor de bentonita acarretou uma redução na permeabilidade da mistura (na ordem de  $10^{-8}$  m/s). Contudo, a redução da permeabilidade da mistura foi menos significativa do que o esperado para uso como camada impermeabilizante (liner). A provável explicação para este comportamento é que as interações entre as cinzas volantes, água e a bentonita teriam inibido a expansão da bentonita e também uma maior redução da permeabilidade. Sugere-se que sejam testadas mistura de cinzas volantes com outros tipos de solos e agentes estabilizantes (cal, cimento...) a fim de verificar a redução na permeabilidade e possível uso como material impermeabilizante.

**Palavras-chave:** Cinzas volantes. Bentonita. Liners.

### ABSTRACT

*The reuse of ash generated by the burning of coal is an announcement of great relevance in the current context. The high volumes of ash generated in the production of energy in thermoelectric plants, with estimated development of studies, aiming at the proportion of a destination for this waste, in order to mitigate possible environmental impacts. From this perspective, the study focus in the use of fly ash as a waterproofing material in environmental works, as a bottom layer of waste deposits (liners). The study obtained geotechnical mixtures of fly ash with different levels of bentonite (5, 10 and 20%), since a fly ash alone does not have adequate permeability for this purpose. As fly ash comes from the coal burning of the Pecém I thermoelectric plant, located in the municipality of São Gonçalo do Amarante in the state of Ceará, characterized as a residue II-A. The study included characterization tests (granulometry, liquidity limit, plasticity limit and actual density), compaction, permeability and mineral tests (SEM and X-ray diffraction). It was observed that increasing the bentonite content resulted in a reduction in the permeability of the blend (in the order of  $10^{-8}$  m / s). However, the reduction and permeability of the blend are less significant than expected for use as a waterproofing (liner). The likely explanation for this behavior is that as interactions between fly ash, water and a bentonite would have inhibited an expansion of the bentonite and also a greater reduction of permeability. Suggestions and suggestions for mixing fly ash with other types of soils and stabilizing agents (lime, cement ...) in order to verify the reduction in permeability and possible use as a waterproofing material.*

**Key-Words:** Fly ash. Bentonite. Liners.

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a conservação dos recursos naturais e a preocupação com o meio ambiente, assim como a aplicação do conceito de sustentabilidade, tem recebido atenção tanto de pesquisadores, quanto da sociedade. Muitos resíduos e/ou subprodutos resultantes da atividade industrial e comercial, têm sido empregados como novos insumos em obras geotécnicas. Um subproduto com grande potencial de utilização para este fim são as cinzas provenientes da combustão do carvão mineral. O elevado volume de resíduos gerados no processo de queima do carvão mineral, como escórias, cinzas de fundo (ou pesadas) e cinzas volantes (ou leves), reforçam a necessidade de um armazenamento adequado ou da reutilização com outros fins. A utilização do carvão mineral para a geração de energia em usinas termelétricas brasileiras resulta em uma quantidade de cinzas na ordem de três milhões de toneladas/ano (ANEEL, 2013). Dado esse elevado volume de produção e o potencial de impacto negativo sobre o meio ambiente, esse subproduto da queima do carvão mineral se torna um problema para as empresas geradoras de energia. Uma adequada destinação para as cinzas de carvão reduzirá os impactos ambientais e os custos decorrentes do armazenamento.

UBALDO (2005), propôs avaliar a viabilidade da cinza de fundo e cinza volante oriundas da queima da termoeletrônica Jorge Lacerda (Capivari de Baixo-SC), como material alternativo para compor um sistema de cobertura para cobrir pilhas de rejeito geradores de acidez. Nesse estudo as cinzas de fundo, que foram caracterizadas como um resíduo Classe II-A, apresentaram características geotécnicas adequadas para a aplicação como material de cobertura, com comportamento hidráulico de material granular, classificada como resíduo. Resultados semelhantes aos obtidos por UBALDO (2005), foram obtidos por MENDONÇA (2007) em estudos sobre a difusão de oxigênio em camadas de cobertura, utilizando as cinzas da queima do carvão mineral.

LIKIANTCHUKI (2007), obteve baixos valores de permeabilidade para misturas de um solo areno-argiloso com bentonita, para emprego dessas em camadas impermeáveis, obtendo resultados satisfatórios, evidenciando o elevado potencial da bentonita como material impermeabilizante. Neste cenário o presente trabalho propôs-se a avaliar misturas de cinzas volantes de carvão mineral com

bentonita para sua utilização como camadas impermeabilizantes, analisando suas características hidráulicas com o intuito de buscar solução tecnicamente viável e que atenuem os impactos causados por este resíduo ao meio ambiente.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo, foram caracterizadas amostras de cinzas volantes, bentonita e misturas de cinzas com bentonita. Os ensaios, foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMSP) do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da UFC, no Laboratório de Microscopia do Departamento de Geologia da UFC e no Laboratório de Raios-X do departamento de Física da UFC, todos localizados no Campus do Pici em Fortaleza, estado do Ceará.

As cinzas volantes utilizadas são oriundas da queima de carvão mineral na Usina Termelétrica Energia Pecém, localizada no Complexo Industrial e Portuário do Pecém em São Gonçalo do Amarante-CE (FIGURA 1). O carvão mineral, combustível utilizado na termelétrica, é importado da Colômbia. A bentonita utilizada no trabalho é proveniente de doação da empresa *Durametal*, através do engenheiro *Marcio Lobo Rocha*. O material adquirido pela *Durametal* é oriundo da empresa *Bentonita SA*, cuja a jazida de exploração encontra-se na cidade de Boa Vista no estado da Paraíba. As amostras utilizadas no ensaio, foram coletadas e armazenadas no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação Da Universidade Federal do Ceará.

Figura 1 - Vista aérea da UTE Energia Pecém.



Fonte: <http://goo.gl/Edfxbw>.

Para a utilização das cinzas como material impermeabilizante de aterros de resíduos foi necessário testar misturas de cinzas com bentonita.

Nesta pesquisa, foram realizados o estudo e a caracterização das cinzas volantes de carvão mineral (resíduo da UTE Energia Pecém), da bentonita sódica ativada (das jazidas de Boa Vista –PB) e de misturas (de cinza e bentonita). Especificamente, foram misturadas às cinzas volantes, proporções de 5%, 10% e 20% em massa de bentonita sódica ativada em relação à massa total da mistura, como intuito de se obter um material com características impermeabilizantes. Ou seja, buscou-se a obtenção de uma mistura com baixa permeabilidade, com aplicações geotécnicas como material de fundo de depósitos de resíduos em aterros sanitários.

As caracterizações da cinza e da bentonita foi a primeira etapa a ser realizada. A segunda etapa teve como objetivo analisar as características e comportamento geotécnico de misturas em proporções pré-determinadas de cinza e bentonita.

As proporções de bentonita foram escolhidas com base no trabalho de Lukiantchuki (2007), além de considerar outros aspectos importantes, como os custos inerentes a adição de bentonita (quantidade de material, transporte do material, entre outros).

Os ensaios de caracterização das cinzas volantes, da bentonita, e das misturas englobaram a caracterização físico-química (*fluorescência de raios-x*), mineralógica (*difração de raios-x* e *microscopia eletrônica de varredura*) e geotécnicos (*preparação de amostras e determinação do teor de umidade* – NBR6457/1984; *massa específica real dos grãos* – DNER 093/1994; *análise granulométrica* – NBR 7184/1984; *determinação do limite de liquidez* – NBR 6459/1984; *determinação do limite de plasticidade* – NBR7180/1984; *ensaio de compactação* – NBR7182/1986; *determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável* – NBR 14545/2000).

A classificação ambiental das cinzas foi obtida a partir de resultados de ensaios de lixiviação (NBR 10006/2004) e solubilização (NBR 10006/2004), realizados pela *Bioagri a Mérieux NutriSciences Company*, de acordo com o descrito na norma NBR 10004/2004

Desse modo, os resultados obtidos pela referida empresa, foram utilizados como parte da caracterização química.

O programa experimental seguiu uma organização e sequência lógica de tarefas, segundo o propósito do trabalho. Destaca-se que, para facilitar a referência às misturas, foram utilizadas nomenclaturas específicas para cada uma. As nomenclaturas são compostas da letra inicial do nome de cada material seguidas da porcentagem do mesmo na composição da mistura. Por exemplo, a mistura de cinza com adição de 5% de bentonita são referenciadas como C95B05, ou seja, uma mistura composta de 95% em massa de cinza e 5% em massa de bentonita. Desse modo as misturas utilizadas, bem como os materiais, com suas respectivas simbologias estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Simbologia dos materiais e misturas, usadas no presente trabalho.

| MATERIAL/MISTURA | % CINZA | % BENTONITA | SÍMBOLO |
|------------------|---------|-------------|---------|
| Cinza            | 100     | 0           | C       |
| Bentonita        | 0       | 100         | B       |
| Mistura 1        | 95      | 05          | C95B05  |
| Mistura 2        | 90      | 10          | C90B10  |
| Mistura 3        | 80      | 20          | C80B20  |

Fonte: Elias (2015).

As análises de Difração de Raios-X foram realizadas no Laboratório de Raios-X do Departamento de Física, na Universidade Federal do Ceará. Os procedimentos realizados, forneceram uma análise semiquantitativa dos minerais cristalizados presentes nas amostras, determinando os elementos e óxidos presentes nessas, baseado no padrão de difração das mesmas. Foram realizadas análises em duas amostras, uma de cinza e outra de bentonita.

A análise microscópica é realizada através do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Este é um equipamento capaz de produzir imagens de alta resolução, podendo ampliar imagens da superfície de uma amostra em até 300.000 vezes (varia de acordo com o equipamento). As análises de microscopia deste trabalho foram todas realizadas no Laboratório de Microscopia do Departamento de Geologia da UFC.

Foram submetidas a análise de microscopia uma amostra de cinza, uma amostra de bentonita, uma amostra da Mistura 1 (C95B05), uma amostra da Mistura 2 (C90B10) e uma amostra da Mistura 3

(C80B20), estando todas as misturas no estado compactado (na umidade ótima e com energia proctor normal).

Para cada material e mistura foram realizados ensaios de permeabilidade em duplicata, visando dar maior confiabilidade ao resultado. Nesse trabalho foram realizados ensaios de permeabilidade a carga variável devido a quantidade de finos presente na amostra de cinza volante.

## 2.2 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção apresentar-se-ão os resultados obtidos no presente estudo, sendo dado maior ênfase aos resultados obtidos a partir dos ensaios mineralógicos e sobretudo aos ensaios de permeabilidade. As análises completas, como os ensaios geotécnicos de caracterização, os ensaios físico-químicos e informações adicionais poderão ser consultadas em ELIAS (2015).

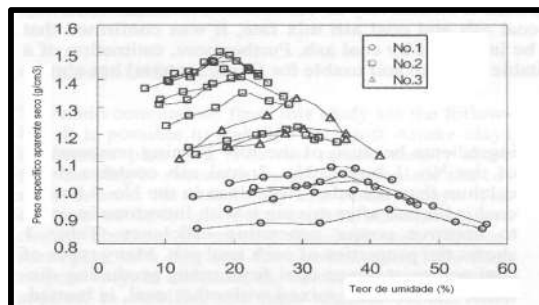
As análises físico-químicas englobaram os ensaios de fluorescência e os ensaios de lixiviação e solubilização. Os ensaios de classificação do resíduo indicaram que a cinza volante é um resíduo Classe II-A (não perigoso, não inerte). Já o ensaio de fluorescência forneceu a composição química da cinza e da bentonita, de modo que os resultados obtidos mostraram que a cinza é composta principalmente por cálcio (Ca) (35,45%), silício (Si) (26,41%), ferro (Fe) (18,65%), alumínio (Al) (9,87%), enxofre (S) (3,82%), potássio (K) (3,04%) e titânio (Ti) (2,14%), com menores concentrações de cloro (Cl) (0,24%), estrôncio (Sr) (0,21%) e manganês (Mn) (0,16%). A alta porcentagem de silício, ferro e alumínio já eram esperadas, pois conforme MENDONÇA (2007) e ROCHA *et al.* (2012), as cinzas de carvão mineral são compostas principalmente dos óxidos  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Consideráveis valores de óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) encontrados deve-se as fases mineralógica de anidrita ( $\text{CaSO}_4$ ) e calcita ( $\text{CaCO}_3$ ). Segundo ROCHA *et al.* (2012) a presença de anidrita ( $\text{CaSO}_4$ ) nas cinzas volantes está intimamente ligada ao processo de dessulfuração interna utilizado durante a queima do carvão mineral, onde há inserção de calcário ( $\text{CaCO}_3$ ) ao longo desta queima, a fim de diminuir as emissões de gases  $\text{SO}_x$  para a atmosfera.

A bentonita apresentou em sua composição elevados teores de sílica (ou óxido de silício -  $\text{SiO}_2$ ), óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e alumina (ou óxido de alumínio

-  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), compondo 93,19% da amostra analisada. O óxido de silício e alumínio são, provavelmente, oriundos da sílica livre e dos argilominerais presentes na amostra, estando, conforme Souza e Santos (1992 *apud* SILVA, 2011) coerentes com a literatura. Segundo Silva (2011), a presença do  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , é típico de argilas do município de Boa Vista-PB, sendo provavelmente, proveniente dos argilominerais do grupo das esmectitas, ou seja, montmorillonita.

A caracterização geotécnica forneceu resultados de acordo com literatura evidenciando a cinza como um material composto por partículas de tamanho de silte, um material não plático, com densidade real ( $G_s$ ) em torno de 2,46, e compactação com curvas semelhantes as obtidas por NISHIKAWA *et al.* (2002) (FIGURA 2), com umidade ótima ( $w_{ot}$ ) em torno de 28% e massa específica aparente seca máxima ( $\rho_{máx}$ ) em torno de 1,32  $\text{g/cm}^3$ .

Figura 2 - Figura 4.5 do trabalho de NISHIKAWA *et al.* (2002).



Fonte: Nishikawa *et al.* (2002).

Já a bentonita apresentou alto teores de argila, com  $w_{ot}$  em torno de 40% e  $\rho_{máx}$  em torno de 1,19  $\text{g/cm}^3$ . As misturas apresentaram valores intermediário entre os parâmetros da cinza e da bentonita de acordo com o teor de cada na composição da mistura.

### 2.2.1 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

#### Difração de Raios-X

Através da análise de difração de Raios-X das amostras de cinza e bentonita buscou-se obter a composição mineralógica desses materiais. As Tabelas 2 e 3 apresentam os resultados obtidos neste ensaio.



Tabela 2 - Composição mineralógica das cinzas volantes obtidas através da Difração de Raio-X.

| NOME DO COMPONENTE | CÓDIGO DE REFERÊNCIA | PONTUAÇÃO | FÓRMULA QUÍMICA                                                    |
|--------------------|----------------------|-----------|--------------------------------------------------------------------|
| Quartzo            | 01-083-0539          | 56        | SiO <sub>2</sub>                                                   |
| Calcita            | 01-086-2339          | 59        | Ca(CO <sub>3</sub> )                                               |
| Gipsita            | 00-036-0432          | 47        | CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O                               |
| Muscovita          | 01-075-0948          | 14        | KAl <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> |
| Mullita, syn       | 01-073-1389          | 23        | Al <sub>2</sub> .4SiO <sub>6</sub> O <sub>4</sub> .8               |
| Hematita, syn      | 01-073-0603          | 14        | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                     |

Fonte: Elias (2015).

Tabela 3 - Composição mineralógica da bentonita obtida através da Difração de Raio-X.

| NOME DO COMPONENTE | CÓDIGO DE REFERÊNCIA | PONTUAÇÃO | FÓRMULA QUÍMICA                                                                                |
|--------------------|----------------------|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Quartzo            | 01-085-1054          | 86        | SiO <sub>2</sub>                                                                               |
| Montmorillonita    | 00-012-0204          | 13        | Nax (Al, Mg) <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> .zH <sub>2</sub> O |

Fonte: Elias (2015).

A análise do difratograma da cinza leve revelou a presença de quartzo, calcita, gipsita, muscovita, mullita e hematita. A gipsita (sulfato de cálcio) e a mullita (silicato de alumínio) são minerais secundários indicando uma intemperização da rocha fonte do carvão mineral. A mineralogia obtida confirma, também, a presença de sulfato e alumínio presente no ensaio de solubilização para as cinzas. A Hematita confirma a presença de óxido férrico obtida pelo ensaio de fluorescência, assim como a calcita confirma a presença do óxido de cálcio, obtido no mesmo ensaio.

A análise do difratograma da bentonita sódica, confirma a presença da esmectita (montmorillonita) responsável pela grande capacidade de expansão da bentonita, quando imersa em água, observada durante o trabalho. E o quartzo é oriundo de sua formação geológica confirmando a análise de fluorescência que revelou na composição da amostra a presença de silicatos. Portanto, pode-se afirmar

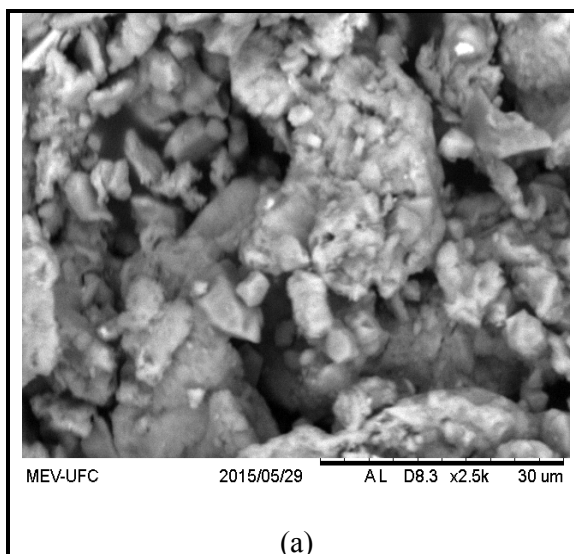
que a bentonita é formada por uma mistura de argilomineral montmorillonita e quartzo.

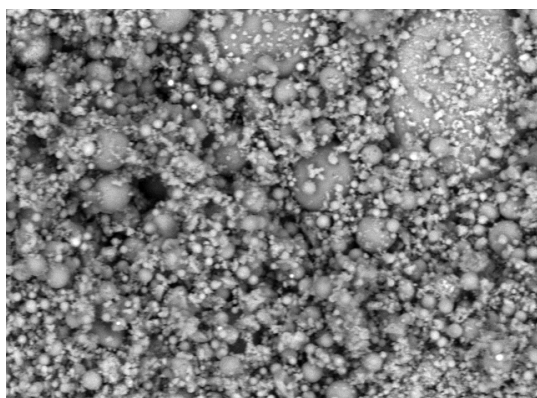
Ubaldo (2005) e Mendonça (2007) avaliando as cinzas volantes obtidas da queima do carvão na Usina Termoeletrica Jorge Lacerda, encontram como constituintes mineralógicos da cinza, os minerais quartzo, caulinita, muscovita, gipsita e pirita. Destaca-se que a composição mineralógica do carvão mineral e consequentemente das cinzas, podem variar de região para região e de jazida para jazida. Além disso a mineralogia da cinza também é influenciada por outros fatores, como o processo de queima do carvão.

#### Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Através da microscopia eletrônica de varredura foi possível confirmar as características das partículas dos materiais. Observou-se a forma esférica das partículas de cinza e a forma lamelar das partículas de argila (FIGURA 3 a e b). Observou-se, também, a diminuição no tamanho dos poros com o aumento do teor de bentonita nas misturas (FIGURA 3 c, d e e), embora, como veremos mais adiante a permeabilidade não tenha diminuído o esperado. Identificou-se, ainda, a formação de aglutinações características, que se traduzem em estruturas mais floculadas e menos permeáveis (FIGURA 3 f).

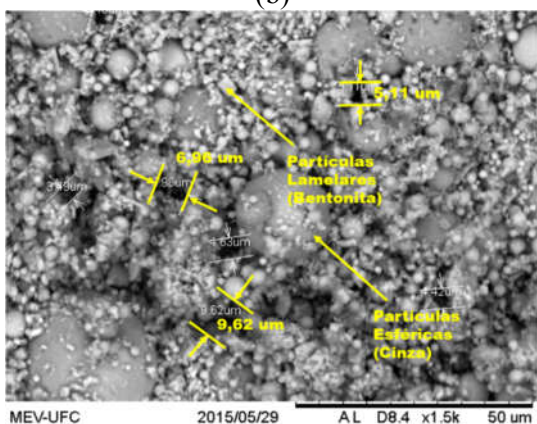
Figura 3 - Imagens obtidas pelo MEV: (a) bentonita; (b) cinza; (c) mistura 1 (C95B05); (d) mistura 2 (C90B10); (e) mistura 3 (C80B20); (f) aglutinações características na mistura 1 (C95B05).





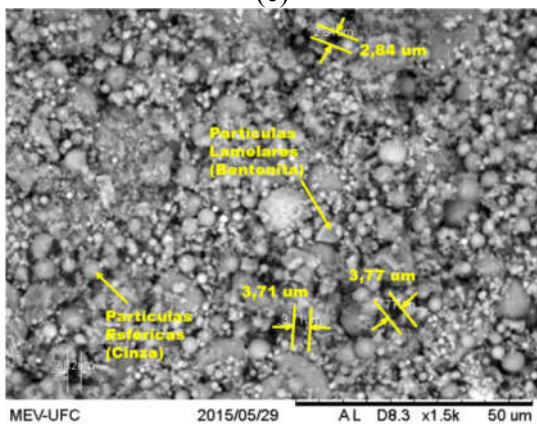
MEV-UFC 2015/05/29 AL D8.6 x1.5k 50 μm

(b)



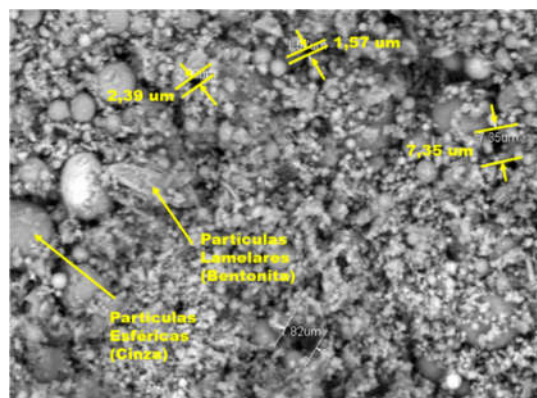
MEV-UFC 2015/05/29 AL D8.4 x1.5k 50 μm

(c)



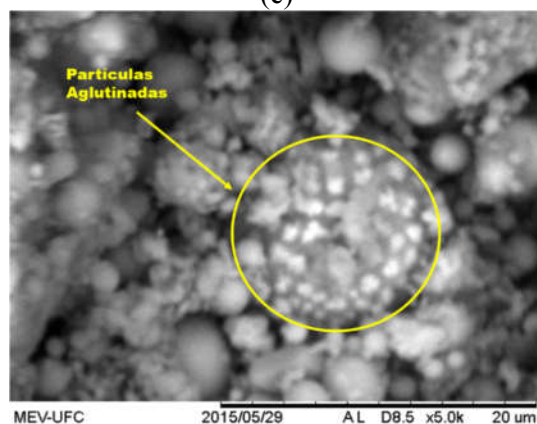
MEV-UFC 2015/05/29 AL D8.3 x1.5k 50 μm

(d)



MEV-UFC 2015/06/03 AL D9.3 x1.5k 50 μm

(e)



MEV-UFC 2015/05/29 AL D8.5 x5.0k 20 μm

(f)

Fonte: Elias (2015).

As aglomerações de partículas observadas, podem evidenciar as interações entre a cinza e bentonita, caracterizando-se, também, possíveis trocas catiônicas. Além disso, tais interações podem ter conduzido a mudanças na concentração de íons entre as camadas das unidades estruturais da montmorilonita, inibindo desse modo inchamento osmótico da bentonita e a consequente redução de permeabilidade.

As Microscopias Eletrônicas de Varredura (MEV) completa, com as análises de EDS, e outras informações adicionais podem ser consultados em ELIAS (2015).

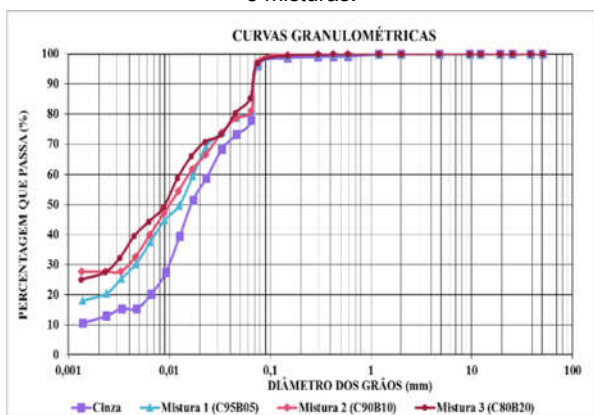
## 2.2.2 ENSAIOS GEOTÉCNICOS

Os ensaios geotécnicos abrangeram caracterização, compactação e permeabilidade

(carga variável). Os resultados obtidos mostraram-se coerentes com os observados na bibliografia.

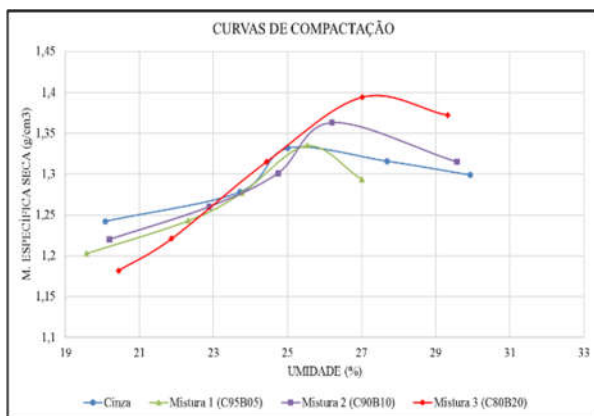
A figura 4 mostra as curvas granulométricas e a figura 5 as curvas de compactação obtidas para as amostras estudadas neste trabalho. Ressalta-se, que curvas de compactação de cinzas volantes foram, semelhantes as apresentadas em Nishikawa et al. (2002 apud UBALDO, 2005).

Figura 4 – Curva Granulométrica das cinzas volantes, solo e misturas.



Fonte: Elias (2015).

Figura 5 – Curvas de Compactação das cinzas volantes e misturas.



Fonte: Elias (2015).

Os ensaios de permeabilidade foram realizados em permeâmetro de paredes rígidas. O tempo médio para a fase de saturação dos corpos-de-prova ensaiados foi de 24 horas.

A Tabela 4 mostra os parâmetros de compactação e os coeficientes de permeabilidade obtidos das cinzas volantes e da bentonita.

Tabela 4 - Condições de compactação e resultados dos ensaios de permeabilidade da cinza e da bentonita.

| AMOSTRA       | W <sub>ens</sub> (%) | W <sub>ot</sub> - W <sub>ens</sub> (%) | ρ <sub>d</sub> (g/cm³) | K (cm/s)                 |
|---------------|----------------------|----------------------------------------|------------------------|--------------------------|
| Cinza (C)     | 24,8                 | 2,2                                    | 1,315                  | 8,5 x 10 <sup>-5</sup>   |
| Bentonita (B) | 40,3                 | -0,3                                   | 1,189                  | *1,0 x 10 <sup>-12</sup> |

Fonte: Elias (2015).

\* O valor do coeficiente de permeabilidade da bentonita sódica (nome comercial *Permagel*) apresentado na tabela foi obtido por Santini [20--].

A Tabela 5, mostra as condições de compactação e resultados dos ensaios de permeabilidade das Misturas 1 (C95B05), Misturas 2 (C90B10) e Misturas 3 (C80B20) respectivamente.

Tabela 5 - condições de compactação e resultados dos ensaios de permeabilidade das Misturas 1 (C95B05), Misturas 2 (C90B10) e Misturas 3 (C80B20).

| AMOSTRA                   | W <sub>ens</sub> (%) | W <sub>ot</sub> - W <sub>ens</sub> (%) | ρ <sub>d</sub> (g/cm³) | K (cm/s)               |
|---------------------------|----------------------|----------------------------------------|------------------------|------------------------|
| Mistura 1 – C95B05 (CP 1) | 25,2                 | 1,1                                    | 1,301                  | 5,9 x 10 <sup>-5</sup> |
| Mistura 1 – C95B05 (CP 2) | 24,9                 | 1,4                                    | 1,299                  | 5,2 x 10 <sup>-5</sup> |
| Mistura 2 – C95B10 (CP 1) | 26,8                 | 0,9                                    | 1,330                  | 3,2 x 10 <sup>-5</sup> |
| Mistura 2 – C95B10 (CP 2) | 26,0                 | 1,7                                    | 1,328                  | 1,3 x 10 <sup>-5</sup> |
| Mistura 3 – C80B20 (CP 1) | 26,9                 | 1,5                                    | 1,371                  | 1,0 x 10 <sup>-5</sup> |
| Mistura 3 – C80B20 (CP 2) | 29,3                 | -0,9                                   | 1,376                  | 1,2 x 10 <sup>-6</sup> |

Fonte: Elias (2015).

Lukiantchuki (2007) determinou a condutividade hidráulica de solos com a adições de bentonita (com teores de 3%, 5% e 7%), obteve diminuições significativas na permeabilidade das misturas de 4,5x10<sup>-4</sup> cm/s do solo puro até 8,76x10<sup>-8</sup> cm/s com a adição de 7% de bentonita. Os resultados apresentados na Tabela 5 mostraram uma pequena diminuição do coeficiente de permeabilidade da mistura com a adição de teores de crescentes de bentonita.



Acredita-se que a menor redução da permeabilidade das misturas obtida neste trabalho, devido a adição de bentonita às cinzas volantes, quando comparada com misturas de solo e bentonita, provavelmente ocorreu pela interação entre a cinza volante e a bentonita, com as cinzas atuando como inibidor do inchamento osmótico da bentonita.

Como foi destacado na análise de microscopia eletrônica de varredura, observaram-se aglomerações de partículas que podem evidenciar a interações entre a cinza e bentonita e possíveis trocas catiônicas. Além disso tais reações podem ter conduzido mudanças da concentração de íons entre as camadas das unidades estruturais da montmorilonita, inibindo desse modo inchamento osmótico da bentonita e a consequente redução de permeabilidade.

### 3 CONCLUSÕES

Este trabalho teve por objetivo de verificar o uso de cinzas volantes de carvão mineral como material geotécnico impermeabilizante. A caracterização mineralógica englobou ensaios de difração de raios-X e de microscopia eletrônica de varredura (MEV) nas amostras de cinzas volantes e bentonita. O MEV das misturas mostrou interações entre as partículas de cinzas e as de bentonita, que resultaram em aglutinações com uma estrutura mais floculada e, portanto, mais permeável que o esperado.

Os resultados dos ensaios de permeabilidade indicaram uma condutividade hidráulica saturada para as cinzas volantes de  $8,5 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ , que é um valor considerado alto para utilização como barreira de fundo em obras ambientais, que deve ser inferior a  $10^{-7} \text{ cm/s}$  (LUKIANCHUKI, 2007). Esses resultados indicaram a necessidade de estudar misturas de cinzas volantes com outros materiais com o intuito de reduzir a permeabilidade do conjunto. Misturas de cinzas volantes e bentonita sódica foram testadas com este objetivo, variando os teores de bentonita em 5, 10 e 20%. Os resultados indicaram uma redução da permeabilidade da mistura até  $1,2 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ , que não foi suficiente para a aplicação proposta. A explicação é que, possa ter ocorrido uma interação entre a bentonita e a cinzas volantes, que impede a expansão da bentonita, como foi observado no trabalho de Cardoso (2005). Recomenda-se, para trabalhos futuros o uso de misturas de cinzas, solos e aditivos (cal, cimento,

etc.) para aplicação das cinzas volantes como material geotécnico impermeabilizante.

### 4 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3 ed. Brasília, 2008. 236 p.

\_\_\_\_\_. **Relatório ANEEL 2013**. Brasília, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

\_\_\_\_\_. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de Compactação, 1986.

\_\_\_\_\_. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 10005**: Lixiviação de Resíduos – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 10006**: Solubilização de Resíduos – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 13292**: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. **NBR 14545**: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2000.

BRANDÃO, M. C.; RODRIGUES, L. M.; SILVA, S. N. Desenvolvimento de revestimentos contendo adições de cinzas da combustão do carvão mineral geradas em ute's. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARVÃO MINERAL, IV, 2013, Gramado. **Anais...** Criciúma: SATC, 2013. p. 211-219.

BORBA, R. F. **Balanço mineral brasileiro 2001**: carvão mineral. Departamento Nacional de Produção Mineral, Brasília, 2001.

CAMARA, L. **Estudo do comportamento de materiais e suas aplicações na engenharia geotécnica**. Relatório PIBIC – Pontifícia



Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

CARDOSO, J. J. B. **Estudo do inchamento de bentonitas sódicas e avaliação de inibidores pela difração de raios X**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005.

CHIES, F., SILVA, N.I.W., ZWONOK, O. Desenvolvimento de Blocos e Tijolos a partir de Cinzas de Fundo de Carvão - CIPECAL. *In*: ROCHA, J.C.; JOHN, V.M. **Utilização de Resíduos na construção Habitacional** – Coletânea Habitar, v. 4, capítulo 7, Porto Alegre: ANTC, 2003.

DAVILLA, C. **Notas de aula: Plasticidade e consistência dos solos**, unidade 4. [S.l.: s.n.], 2008.

DEDAVID, B. A.; GOMES, A. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura** – Aplicações e preparação de amostras. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007. 60 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 093/94**: Determinação da densidade real dos grãos. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Sumário Mineral 2014**. Brasília, 2014.

DOURADO, K. A. **Condutividade hidráulica de materiais de baixa permeabilidade**: Desenvolvimento, construção e teste de um sistema de medida. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

ELIAS, D. S. **Aproveitamento de resíduos sólidos: estudo experimental de misturas de solo e cinza volante de carvão mineral**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Anuário estático de energia elétrica 2013**: ano base 2012. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **Anuário estatístico de energia elétrica 2014**: ano base 2013. Rio de Janeiro, 2014.

GOETHE, C.A. **Sistemas de controle e disposição final das cinzas do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda – SC e da usina termelétrica de Jacuí – RS**. Seminário de estudos da aplicação dos resíduos da combustão do carvão mineral. Anais. Florianópolis, Santa Catarina, 1990.

LEMOS, R. G. **Estudo do comportamento hidráulico, mecânico e químico de barreiras**

**hidráulicas verticais, compostas por solo residual, bentonita e cimento sob ação de substâncias agressivas**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2006

LOPES, L. S. E. **Análise do comportamento mecânico e ambiental de misturas solo-cinzas de carvão mineral para camadas de base de pavimentos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

LOPES, A. S.; GUIDOLIN, J.A. **Interpretação de Análise de Solo** – Conceitos e Aplicações. 3. ed. São Paulo: ANDA, 1989, 64 p.

LUKANTCHUKI, J. A. **Influência do teor de bentonita na condutividade hidráulica e a resistência ao cisalhamento de um solo arenoso utilizado como barreira selante**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

LUZ, A. B.; OLIVEIRA, C. H. 2008. **Rochas e Minerais Industriais**: Usos e Especificações. 2. Ed. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral - CETEM, 2008, p.239-254.

MALLMANN, J. E. C.; ZWONOK, O. O Uso de cinzas volante e de fundo em concreto compactado com rolo (ccr). *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARVÃO MINERAL, IV, 2013, Gramado. **Anais...** Criciúma: SATC, 2013. p. 220-234.

MENDES, L. J. N.; BAZZO, E.; TRACTEBEL, F. **Técnica de análise de carvão e depósitos de cinzas em unidades geradoras de vapor**. [S.l.: s.n.], 2007.

MENDOÇA, R. M. G. **Estudo da difusão de oxigênio em materiais de cobertura**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

NARDI, J.V. **Estabilização de areia com cal e cinza volante; efeito do cimento como aditivo e de brita na mistura**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1975.

PAGANI, B. R. **Estudo de misturas de solo-cimento-cinza-fibra para uso em barreiras verticais de contenção de contaminantes**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

PINTO, S. **Estabilização de areia com cal e cinza volante**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1971.

POZZOBON, C.E. **Aplicações tecnológicas para a cinza do carvão mineral produzida no Complexo Termelétrica Jorge Lacerda**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

RHODE, G.M.; ZWONOK, O.; CHIES, F.; SILVA, N.I.W. **Cinzas de carvão fóssil no Brasil – Aspectos técnicos e ambientais**. Vol.1 Porto Alegre: CIENTEC, 2006.

ROSA, A. D. **Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

SILVA, A. A. **Contribuição ao estudo das bentonitas do município de Boa Vista estado da Paraíba**. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SIQUEIRA, J. S. **Reciclagem de resíduos a partir de cinzas de carvão mineral: Produção de argamassas**. Dissertação (Mestrado em engenharia química). Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

SOARES, V. **Utilização de mistura de solo saprolítico com bentonita na construção de revestimentos de fundo de aterros sanitários**. Dissertação (Mestrado em engenharia). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

TABORDA, L.F.; NÚÑEZ, W.P. Avaliação funcional de um pavimento com base em solo estabilizado com cinza volante e cal. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARVÃO MINERAL, IV, 2013, Gramado. **Anais...** Criciúma: SATC, 2013. p. 235-251.

UBALDO, M.O. **Uso de cinzas de carvão da composição de uma cobertura de rejeitos de mineração**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.