

COMPORTAMENTO DE MISTURAS DE CINZA DE CARVÃO-BENTONITA E AREIA-BENTONITA

Behavior of coal ash-bentonite and sand-bentonite mixtures

Karla Salvagni Heineck*

Nilo Cesar Consoli**

Adriano V. D. Bica***

Juan Antônio Altamirano Flores****

RESUMO - Ensaios de condutividade hidráulica em permeâmetro de parede flexível com carga constante foram realizados em amostras compactadas de cinza de fundo, cinza volante e areia, com adições de 0, 3, 6, 9 e 18% de bentonita. Além disso, com o intuito de avaliar o efeito da inclusão da bentonita e da morfologia das partículas na condutividade hidráulica das misturas, foi feita a análise fotomicrográfica do material em microscópios petrográfico óptico e eletrônico. Foi observado que a adição de bentonita não diminuiu significativamente a condutividade hidráulica das cinzas, reduzida em somente uma ordem de magnitude, de $1,78 \times 10^{-6}$ m/s para $1,39 \times 10^{-7}$ m/s. Em contrapartida, a condutividade hidráulica da areia foi minimizada em cinco ordens de magnitude, de $3,17 \times 10^{-5}$ m/s para $5,15 \times 10^{-10}$ m/s. Dentre os vários fatores que podem ser responsáveis pela dificuldade na diminuição da condutividade hidráulica (granulometria das cinzas, por exemplo), podem ser citados os vazios existentes nas próprias partículas de cinza observados na análise microscópica das misturas, o que não acontece com a areia, que possui partículas sólidas e sem vazios internos.

SYNOPSIS - Flexible-wall hydraulic conductivity tests were carried out on bottom ash, fly ash and compacted specimens of sand with additions of 0, 3, 6, 9 and 18% of bentonite. In order to study the effect of bentonite inclusion and particle morphology on the hydraulic conductivity of the admixtures, an investigation was undertaken based on thin section micrographs. It was found that, for both bottom and fly ash admixtures, bentonite addition reduced only one order of magnitude the hydraulic conductivity, from 1.78×10^{-6} m/s to 1.39×10^{-7} m/s. In the other hand, the sand hydraulic conductivity was reduced five orders of magnitude, from 3.17×10^{-5} m/s to 5.15×10^{-10} m/s. Amongst several factors that can be responsible for the difficulty in reducing hydraulic conductivity (e.g. grain size distribution of ash), can also be recalled the high particle voids observed in the ash by means of microscopic analysis. The same is not true with the sand, which has solid particles, without inner voids.

1 - INTRODUÇÃO

O processo de combustão do carvão mineral dá origem a resíduos genericamente chamados de cinzas, que podem apresentar-se sob diversas formas: escórias, cinzas de fundo e cinzas volantes. As escórias são produzidas nos processos de combustão em leito fixo e por isso as cinzas resultantes apresentam-se normalmente com granulometria grosseira ou em blocos, com elevado teor de carbono não queimado (10 a 20%). Já nos processos de

* Professora-Pesquisadora, PPGEC/UFRGS, e-mail: karla@ppgec.ufrgs.br

** Professor-Pesquisador, PPGEC/UFRGS, e-mail: consoli@ufrgs.br

*** Professor-Pesquisador, PPGEC/UFRGS, e-mail: avdbica@vortexufrgs.br

**** Professor-Pesquisador, IG/UFRGS, e-mail: juan.flores@ufrgs.br

combustão do carvão em forma pulverizada, as cinzas resultantes apresentam granulometria mais fina e dividem-se em duas classes: as cinzas volantes (fly ash) e as cinzas de fundo (bottom ash), que diferenciam-se principalmente pelo tamanho das partículas e forma de obtenção. As cinzas volantes são arrastadas pelos gases de combustão das fornalhas e retiradas por um sistema de captação denominado precipitador eletrostático, enquanto que as cinzas de fundo são coletadas no fundo das fornalhas e transportadas por via aquosa até um tanque de decantação. As cinzas utilizadas neste trabalho provêm da usina termelétrica de Charqueadas, que trabalha com o processo de combustão do carvão na forma pulverizada.

A produção de carvão atual no estado do Rio Grande do Sul é de aproximadamente 3.000.000 ton/ano, representando 60% da produção nacional (Binotto *et al*, 1999). Espera-se que esta produção aumente nos próximos anos, uma vez que a produção hidro-energética tende a decair, ao mesmo tempo que várias usinas termelétricas estarão entrando em operação. Por este motivo, o estado do Rio Grande do Sul apresenta sérios problemas ambientais advindos da disposição inadequada deste resíduo.

Neste contexto, o presente trabalho visa contribuir para uma diminuição dos riscos potenciais dos resíduos ao meio ambiente através do estudo do comportamento hidráulico, bem como da morfologia destas cinzas, possibilitando, assim, o seu aproveitamento e disposição adequados.

2 - ESTUDOS ANTERIORES

Vários autores tem estudado o uso de materiais adequados para a construção de barreiras para a contenção de resíduos (*liners*). Para tal, é necessário que sejam conhecidas em especial as propriedades hidráulicas dos materiais a serem utilizados. Estudos recentes sobre barreiras de contenção tem indicado a substituição de uma certa porcentagem da argila constituinte do *liner* por um material arenoso (Graham *et al*, 1989; Yan Ree *et al*, 1992; Brandl, 1992; Han, 1996; Alston *et al*, 1997). Segundo os autores, tal mistura originaria um material com propriedades melhoradas: menor tendência a contração do que argilas puras ou siltes, índice de vazios baixo, estabilidade climática e maior facilidade de construção. Outro enfoque dado pelos autores nesta linha de pesquisa foi a utilização da cinza em substituição da areia, na construção de *liners* (Shackelford, 1994; Han, 1996), uma vez que a cinza possui características físicas semelhantes e possui também propriedades ecologicamente aceitáveis no que diz respeito à lixiviação nas misturas solo-cinza (Han, 1996; Tessari, 1998).

A utilização da cinza, com aditivos estabilizantes ou não, tem sido avaliada por vários estudos realizados recentemente (Zwonok *et al*, 1984; Shackelford, 1994; Han, 1996; Rohde, 1996; Tessari, 1998; Thomé, 1999). Na maioria dos casos, foram reportados altos valores de condutividade hidráulica para as cinzas sem aditivos ou estabilizantes. Por outro lado, vários estudos mostram que para cinzas estabilizadas quimicamente ou somente com adição de solos argilosos, os valores da condutividade hidráulica das misturas são, na maioria, inferiores a 10^{-9} m/s (Zwonok *et al*, 1984; Han, 1996).

Neste contexto, também tem sido pesquisada a adição de bentonita em solos cuja condutividade hidráulica esteja acima do nível aceitável (10^{-9} m/s) para a sua utilização em *liners* (Graham *et al*, 1989; Kozicki *et al*, 1994; Umedera *et al*, 1996; e Sivapullaiah, 1996). Segundo estes autores, a adição de porcentagens de bentonita até 14% seria suficiente para reduzir a condutividade hidráulica a níveis aceitáveis (Yan Ree *et al*, 1992; Kozicki *et al*, 1994; Umedera *et al*, 1996; Alston *et al*, 1997).

Apesar de ser conhecido o fato da maioria das cinzas possuírem condutividade hidráulica elevada, não há claramente estabelecido na literatura o mecanismo do comportamento

hidráulico, deste material. Desta forma, o propósito do presente estudo é avaliar este mecanismo, não somente medindo a condutividade hidráulica da cinza com ou sem adição de bentonita, mas também através da análise microscópica da morfologia das partículas constituintes deste material.

3 - MATERIAIS

3.1 - Introdução

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram preparados para os ensaios de caracterização segundo a NBR 6457/86. Todos os ensaios de caracterização física foram realizados baseando-se em suas respectivas normas brasileiras: NBR 7181/84 – Análise granulométrica; NBR 6459/84 – Determinação do limite de liquidez; NBR 7180/84 – Determinação do limite de plasticidade e NBR 6508/84 – Determinação da massa específica.

3.2 - Cinzas

3.2.1 - Considerações gerais

As cinzas utilizadas nesta pesquisa são provenientes da Usina Termelétrica de Charqueadas, localizada no município de Charqueadas, no estado do Rio Grande do Sul. São produzidas através da queima do carvão mineral retirado das minas do município de Capão do Leão, localizado no mesmo estado.

No caso da Mina do Leão, os principais constituintes da matéria mineral estão mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Maiores constituintes da matéria mineral em carvões (%) - (Sánchez, 1987)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	P ₂ C ₅	MnO ₂	TiO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Perda ao fogo (1000°C)
23,7	10,5	1,0	0,74	0,03	<0,01	0,44	0,19	0,14	0,44	62,8

Na Usina Termelétrica de Charqueadas, a cinza de fundo, após o tempo necessário para a drenagem da mesmas nos tanques de decantação, é transportada e depositada em minas de carvão desativadas.

Fisicamente, as cinzas em geral são constituídas de partículas esféricas ou tendendo a esféricas. Entretanto, esta é uma descrição simplificada que não consegue transmitir a complexidade morfológica e a heterogeneidade deste material.

O mecanismo da formação das partículas de cinza é descrito por Andrade (1985). Este modelo sugere que o produto final do processo de combustão consiste em partículas esféricas de cinza que podem ser sólidas (plerosferas) ou ocas (cenosferas), micropartículas e cristais. Estas partículas esféricas resultam da fusão dos constituintes carbonosos do carvão sobre uma superfície inerte com a qual mantêm pouca interação superficial. As gotas deste material fundido podem coalescer formando esferas maiores. As esferas ocas, denominadas cenosferas, são produzidas em um estágio posterior à formação das plerosferas, e surgem quando gases e vapores são gerados dentro da esfera fundida, provocando sua expansão. Este mecanismo pode também formar cenosferas contendo outras esferas em seu interior.

A expansão demasiada dos gases formados dentro das cenosferas pode conduzir à formação de micro-partículas, através da explosão das mesmas. Estas partículas menores podem coalescer ou aglomerar, formando partículas irregulares maiores.

As propriedades morfológicas e mineralógicas da cinza serão discutidas posteriormente na análise das fotomicrografias do material.

3.2.2 - Cinza de fundo

A cinza de fundo proveniente da usina termelétrica de Charqueadas é um material não plástico, que pode ser classificado de acordo com a NBR 6502/95 como uma areia fina, e de acordo com o sistema de classificação unificado, como uma areia siltosa – SM. A distribuição granulométrica apresentada na Figura 1 mostra um material composto por 2,2% de argila (<0,002 mm), 29,3% de silte (0,002 a 0,074 mm) e 68,5% de areia, sendo que a porção areia constitui-se de 54,5% de areia fina (0,074 a 0,42 mm) e 14% de areia média (0,42 a 2 mm). Os índices físicos da cinza estão listados na Tabela 2.

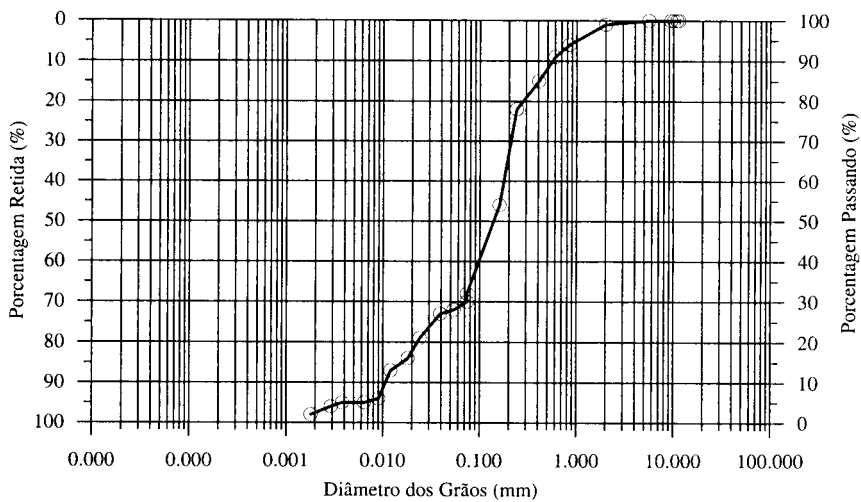


Fig. 1 - Curva granulométrica da cinza de fundo

Tabela 2 - Índices físicos da cinza de fundo	
Índices físicos	Cinza de fundo
Massa específica do solo, ρ (g/cm ³)	2,30
Diâmetro efetivo, D_{10}	0,011 mm
Limite de plasticidade, LP	NP

A caracterização mineralógica através de difração de raios-X foi realizada por Calarge *et al* (1998), Thomé (1999) e Chies *et al* (1999). Os autores descrevem a cinza de fundo como sendo um material onde foi identificada a presença de fases cristalina e amorfa. A fase cristalina é constituída de mulita e quartzo como minerais principais, hematita e magnetita em menores proporções. A mulita origina-se das reações de mulitização da caulinita e ilita-esmectita, associadas ao carvão, no processo de combustão. O quartzo é um mineral de origem detrítica e infusível nas condições de calcinação das termelétricas. A hematita e magnetita,

presentes como minerais secundários, são decorrentes da oxidação dos sulfetos de ferro na forma de pirita, marcassita e pirrotita. A presença de amorfos está representada sob a forma de material vitrificado, observado na análise petrográfica.

A textura e morfologia das partículas, determinadas por microscopia convencional, mostram partículas opacas angulosas e sub-angulosas, que correspondem à fração não calcinada do carvão (Figura 2, detalhe a). Observa-se a presença de material não calcinado a parcialmente calcinado, mostrando porosidade interna caracterizada pela expansão da partícula, sugerindo transição entre plerosferas (Figura 2, detalhe c) e cenosferas (Figura 2, detalhes a, b e d). As partículas esféricas são opacas (Figura 2, detalhe c) e(ou) translúcidas (Figura 2, detalhe d). A fração fina é derivada da fragilização de partículas opacas parcialmente calcinadas, com indicação de expansão de gases no interior das mesmas.

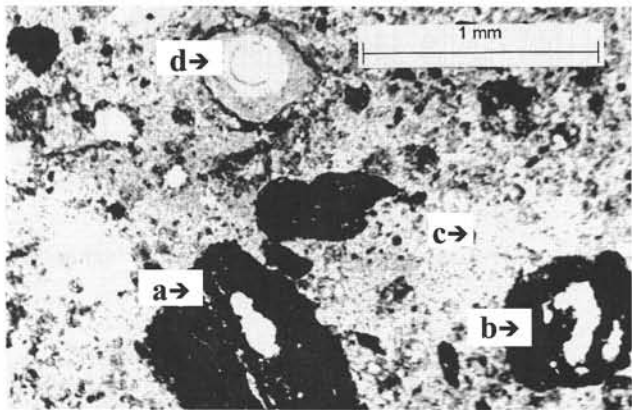


Fig. 2 – Fotomicrografia da cinza pesada (aumento: 48 vezes)

A análise química da cinza de fundo mostra que a mesma é composta principalmente por sílica, alumina e óxido de ferro, com percentagens menores de óxidos de cálcio, óxidos de magnésio, sulfatos e outros componentes, conforme a Tabela 3:

Tabela 3 – Análise química da cinza de fundo de Charqueadas (%) (Sánchez *et al*, 1998)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	TiO ₂	Perda ao fogo
64,40	24,50	4,5	1,31	0,40	0,14	1,60	2,63

Quanto ao potencial de toxidez, resultados obtidos nos testes de lixiviação e solubilização aplicados à cinza de fundo de Charqueadas não ultrapassaram o limite máximo determinado pela Norma Brasileira NBR 10.004, podendo então ser classificado como um resíduo inerte, classe III (Sánchez *et al*, 1998; Tessari, 1998; Thomé, 1999).

3.2.3 - Cinza volante

A cinza volante proveniente da usina termelétrica de Charqueadas pode ser classificada geotecnicamente como um silte, segundo a NBR 6502/95 e como um silte inorgânico – ML, segundo a classificação unificada. A Figura 3 mostra que este material é composto por 2,2% de

argila (< 0,002 mm), 86,7% de silte (0,002 a 0,075 mm) e 11,1% de areia fina (0,074 a 0,42 mm). A seguir, a Tabela 4 mostra alguns índices físicos do material.

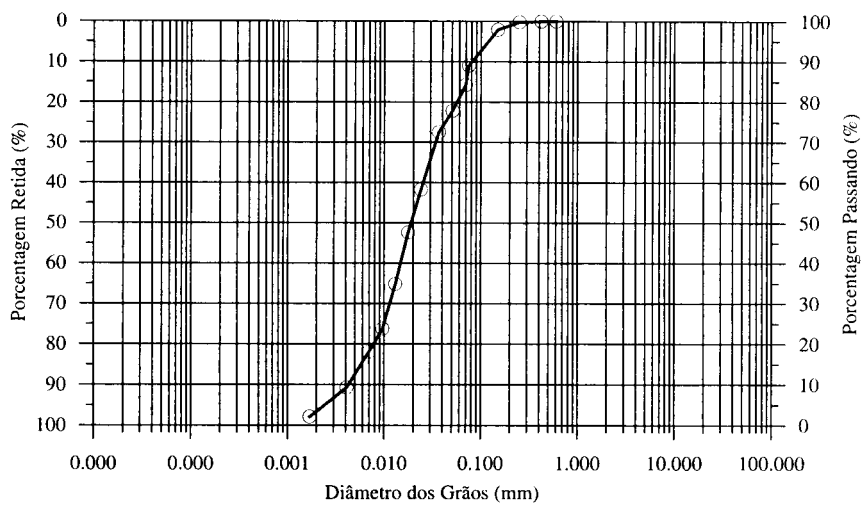


Figura 3 – Curva granulométrica da cinza volante

Tabela 4 - Índices físicos da cinza volante	
Índices físicos	Cinza volante
Massa específica do solo, ρ (g/cm ³)	2,21
Diâmetro efetivo, D_{10}	0,00424 mm
Limite de plasticidade, LP	NP

As formas principais observadas nas partículas de cinza volante são esféricas com vazios, juntamente com grãos angulosos. Segundo Zwonok e Chies (1984), existem, como componentes secundários, partículas com material carbonoso, que ocorrem na forma de lascas e massas porosas, predominantemente nas frações mais grosseiras, tornando a textura mais áspera.

A composição química é constituída basicamente por óxidos de Silício, Alumínio e Ferro, conforme a Tabela 5.

Tabela 5 – Análise química da cinza volante de Charqueadas (%) (Sánchez *et al*, 1998)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	TiO ₂	Perda ao fogo
62,20	26,00	2,90	1,26	-	1,41	1,10	1,85

A cinza volante, da mesma forma que a cinza de fundo, não apresenta potencial de toxidez quando avaliada em ensaios de lixiviação. Por outro lado, quando testada em ensaios de solubilização, alguns parâmetros apresentaram concentrações superiores às permitidas pela norma NBR 10004, sendo, portanto classificada como resíduo não inerte ou classe II (Sánchez *et al*, 1998).

3.3 - Areia

A areia utilizada neste estudo foi extraída de uma jazida localizada no município de Osório – RS. Trata-se de um areia fina (NBR 6502/95), limpa e de granulometria uniforme que, segundo Spinelli (1999), tem o quartzo como material correspondente a 99% da sua composição mineralógica, sendo o restante composto por glauconita, ilmenita, turmalina e magnetita. Não foi observada a presença de matéria orgânica.

Este material teve sua curva granulométrica e índices físicos determinados por Diaz (1998), conforme apresentado na Figura 4 e na Tabela 6:

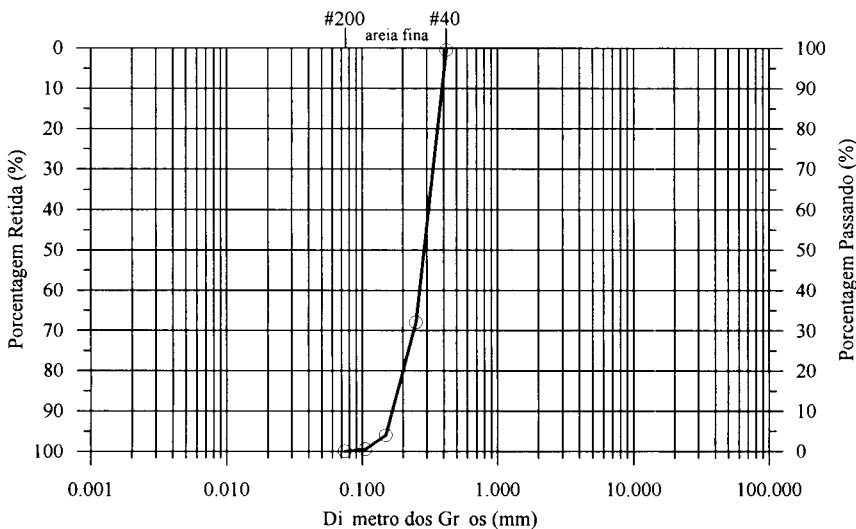


Fig. 4 - Curva granulométrica da areia (Diaz, 1998)

Tabela 6 - Índices físicos da areia de Osório (Diaz, 1998)

Índices físicos	Areia de Osório
Massa específica do solo, ρ (g/cm ³)	2,62
Diâmetro efetivo, D_{10}	0,16mm

3.4 - Bentonita

A bentonita utilizada nas matrizes de areia e cinza foi uma bentonita sódica comercial ativada com carbonato de sódio, comercializada na forma pulverizada. É composta por 50,42% de argila (< 0,002 mm), 46,17% de silte (0,002 a 0,075 mm) e 3,41% de areia fina (0,074 a 0,42 mm), podendo ser classificada geotecnicamente como uma argila, segundo a NBR 6502/95, e como CH (argila inorgânica de alta plasticidade), segundo a classificação unificada. A distribuição granulométrica, bem como seus índices físicos são mostrados na Figura 5 e na Tabela 7.

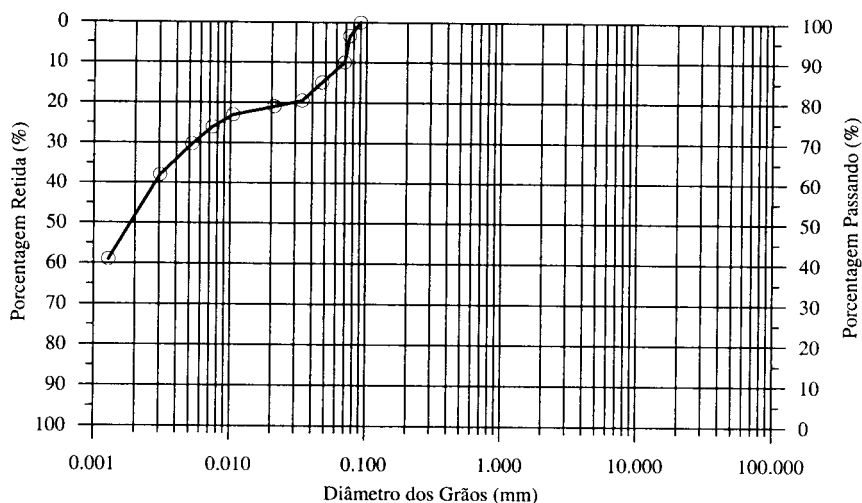


Fig. 5 - Curva granulométrica da bentonita

Tabela 7 - Índices físicos da Bentonita

Índices físicos	Bentonita
Massa específica do solo, ρ (g/cm ³)	3,1
Diâmetro médio, D_{50}	0,0021 mm
Limite de liquidez, LL	600 %
Limite de plasticidade, LP	45 %

4 - PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 - Generalidades

Como parte do programa experimental, foram realizados ensaios de compactação com energia Proctor Normal e testes de condutividade hidráulica em misturas de cinza volante com bentonita e cinza de fundo com bentonita. Ambas as cinzas foram testadas com teores de 0, 3, 6, 9 e 18% de bentonita em peso seco da mistura, e com parâmetros ótimos de compactação obtidos das curvas de compactação com energia Proctor Normal, realizadas para cada teor de bentonita.

Cada mistura teve a condutividade hidráulica testada para vários pontos da curva de compactação, a fim de avaliar a influência do teor de umidade e densidade na resposta hidráulica das mesmas. Ainda, com o objetivo de comparar o resultado das cinzas com um solo com características previamente conhecidas, avaliou-se também a condutividade hidráulica da areia com 0 e 18% de bentonita.

Posteriormente, foi feita a análise microscópica das cinzas, da areia e das misturas com bentonita em microscópio óptico de luz transmitida com o objetivo de explicar os resultados obtidos nos testes de condutividade hidráulica. Também foram realizadas análises das cinzas

em microscópio eletrônico de varredura (MEV), para a comprovação da existência de poros nas partículas.

4.2 - preparação das amostras

A moldagem dos corpos de prova foi realizada em moldes bi-partidos de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura. As amostras foram compactadas estaticamente em três camadas, controlando o peso da mistura adicionada e a altura das camadas de forma a obter a densidade desejada, procurando atingir os parâmetros de compactação determinados através das curvas de compactação com energia Proctor Normal, segundo NBR 7182/86. Estas curvas, mostradas na Figura 6, foram obtidas para cada teor de bentonita, uma vez que esperava-se que a adição de argila iria modificar as propriedades das misturas.

A quantidade de bentonita adicionada à mistura foi determinada em relação à massa de solo seco da matriz. Os componentes foram adicionados em um recipiente na seguinte sequência: solo, bentonita e água. Esta sequência foi a mais apropriada, pois permitiu a homogeneização dos componentes secos da mistura, antes de ser acrescentada a água. Os corpos de prova foram preparados um a um, ou seja: cada corpo de prova teve uma mistura de solo, bentonita e água preparada separadamente. A mistura foi feita manualmente até ser obtida a homogeneização, verificada visualmente. Durante este processo todas as precauções foram tomadas no sentido de se evitar as perdas de umidade por evaporação. Todos os corpos de prova tiveram seus componentes misturados (solo, bentonita e água) e acondicionados em saco plástico por 24 horas para equalização da umidade. Somente após passado o tempo de equalização os corpos de prova foram moldados conforme descrito anteriormente.

Concluído o processo de moldagem, os corpos-de-prova foram pesados com precisão de 0,01 gf e medidos com precisão de 0,01 cm. Os critérios adotados para a aceitação dos corpos de prova em relação aos parâmetros de compactação γ_d e ω foram 2% e 3% de tolerância, respectivamente. Todos os corpos de prova moldados fora destas limitações foram descartados e substituídos.

As cinzas possuem um teor de umidade ótimo muito alto e um pico de densidade máxima pouco pronunciado, dificultando, em alguns casos, a sua determinação. Vale ressaltar que para a confecção dos corpos de prova cujas curvas de compactação não definiram a umidade ótima, foi adotada a máxima umidade possível que possibilitasse a moldagem da amostra. Tanto na confecção dos corpos de prova, como nos ensaios de compactação, foi adotado um tempo de repouso para as misturas, ou seja, as cinzas ou a areia eram misturadas com a bentonita e compactadas somente 24 horas após a mistura. Tal procedimento foi adotado para permitir a equalização da umidade na amostra, antes da compactação.

Não foi observada uma diferença significativa da influência da adição de 9 e 18% de bentonita nas curvas de compactação da cinza de fundo. Por este motivo, foram adotados os parâmetros da curva de compactação da areia com 9% de bentonita para a confecção dos corpos de prova de areia com 18% de bentonita.

A massa específica real dos grãos foi determinada para cada mistura experimentalmente, com o objetivo de conhecer a porosidade das misturas após a confecção dos corpos de prova, conforme apresentado na Tabela 8. Os números entre parêntesis representam a massa específica real dos grãos das misturas calculados baseando-se no peso seco de cada material da mistura e da porcentagem de adição de cada um. Como exemplo, a cinza de fundo com 6% de bentonita: $2,30$ (cinza de fundo) $\times 94\% + 3,10$ (bentonita) $\times 6\% = 2,35$.

Em média, os valores de índice de vazios calculados baseando-se nos dois métodos de estimativa da massa específica real dos grãos apresentaram resultados variando entre 0 e 5% (valores de índice de vazios até 5% mais altos para os corpos de prova com 18% de bentonita,

calculada com a massa específica indicada em parêntesis). Em função da baixa variabilidade dos resultados, adotaram-se os valores de massa específica baseados nos testes de laboratório.

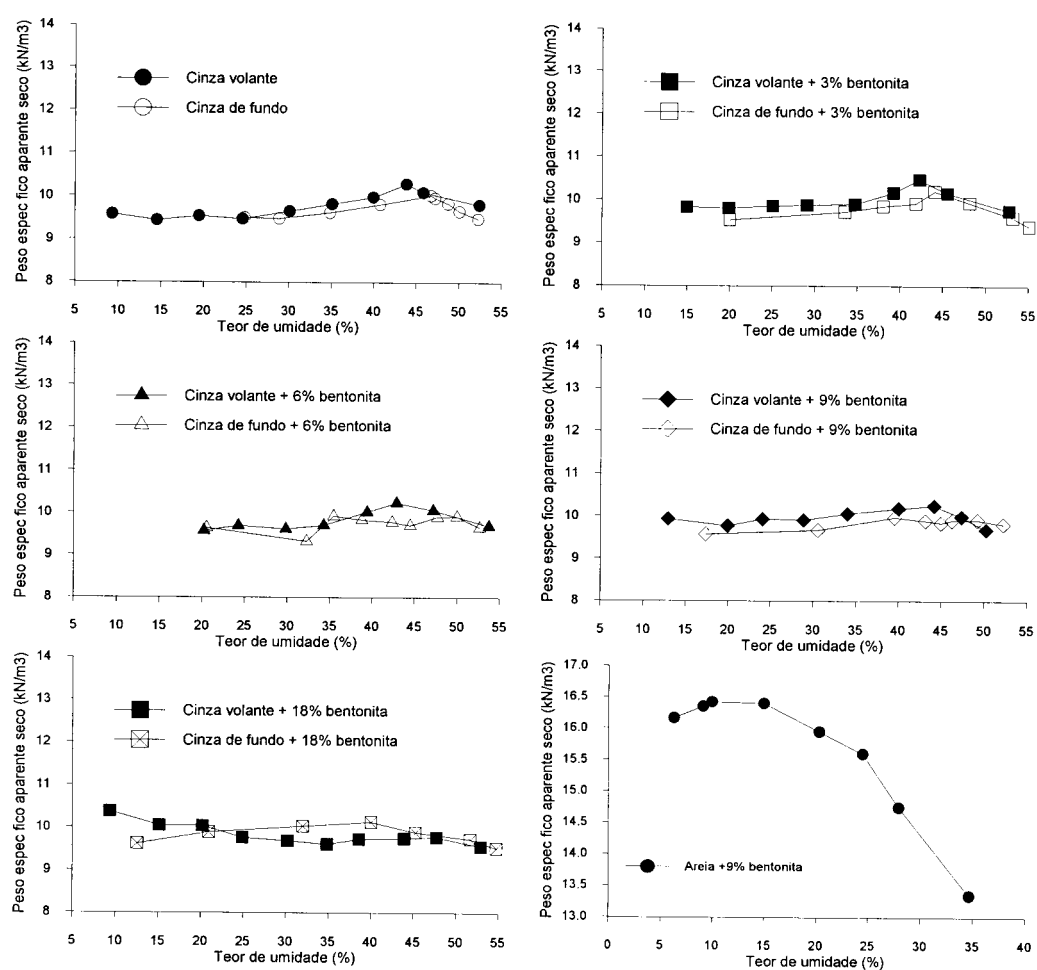


Fig. 6 - Curvas de compactação da cinza de fundo, cinza volante e areia com vários teores de bentonita

Tabela 8 – Massa específica real dos grãos das misturas

Teor de bentonita	Massa específica, ρ (g/cm ³)		
	Cinza de fundo	Cinza volante	Areia
0%	2,30	2,21	2,63
3%	2,31 (2,32)	2,21 (2,24)	-
6%	2,31 (2,35)	2,23 (2,26)	-
9%	2,34 (2,37)	2,24 (2,29)	-
18%	2,35 (2,44)	2,30 (2,37)	2,67 (2,71)

As amostras, logo após compactadas, eram instaladas no permeâmetro e imediatamente testadas. As amostras para a análise microscópica foram retiradas dos corpos de prova, após os ensaios de condutividade hidráulica.

5 - MÉTODOS DE ENSAIO

5.1 - Condutividade hidráulica

Após a instalação das amostras no permeâmetro de parede flexível (e.g. Daniel *et al*, 1984; Boynton *et al*, 1985; Carpenter *et al*, 1986; Daniel *et al*, 1990; Daniel, 1994) foi estabelecida a fase de saturação dos corpos de prova, que consistia em duas etapas: (1) percolação de água, da base para o topo do corpo de prova, durante aproximadamente 24 horas ou até que não se percebessem bolhas de ar saindo da amostra; (2) aplicação da contra-pressão através de incrementos de tensão de 50 kPa na tensão confinante, no topo e na base do corpo de prova, mantendo a tensão efetiva constante em aproximadamente 20 kPa. Após a fase de saturação aumentava-se a tensão confinante até que a tensão efetiva atingisse o valor em que o ensaio seria conduzido, ou 100 kPa, tomando-se o cuidado de esperar o tempo necessário para a amostra adensar. Ao final do adensamento, media-se a variação volumétrica do corpo de prova para que se pudesse calcular o índice de vazios da amostra depois de adensada. A garantia de saturação da amostra foi monitorada através da medição do parâmetro B de Skempton, medido nos dois últimos níveis de tensões possíveis, limitado pela contra-pressão máxima utilizada.

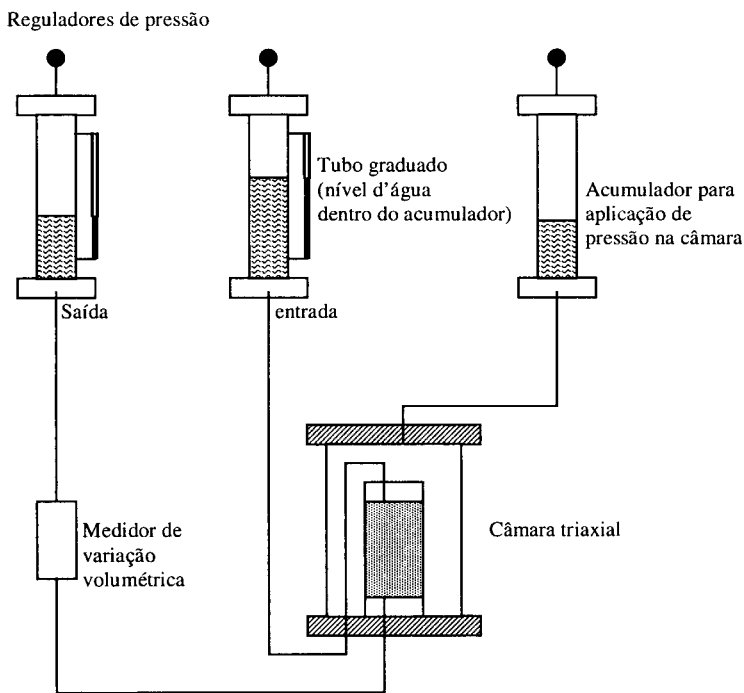


Fig. 7 - Esquema do permeâmetro de parede flexível

O gradiente hidráulico foi aplicado na amostra através do incremento de tensão no topo da amostra e da diminuição, de mesma magnitude, em sua base. Tal procedimento minimiza as diferenças de tensões efetivas aplicadas ao longo da amostra. Baseando-se na medição de volume de água que entra e que sai da amostra, através de tubos graduados conectados aos acumuladores de entrada e saída de água, foi estimado o momento em que o fluxo manteve-se estável, e a partir deste momento calcula-se a condutividade hidráulica, de acordo com a Lei de Darcy. Um medidor de variação volumétrica externo também foi utilizado para a medição do volume de água que sai da amostra. Considerando que a variação do volume de água dentro dos acumuladores é muito pequena e as tensões aplicadas muito altas, foi assumido que a variação na carga hidráulica é desprezável. Como resultado, o teste foi considerado como um teste de carga constante.

Todos os ensaios foram realizados com gradiente constante de aproximadamente 10, conforme ASTM D 5084-90. Um esquema do equipamento utilizado pode ser observado na Figura 7.

5.2 - Fotomicrografia das misturas

O estudo fotomicrográfico das misturas foi realizado através da análise de lâminas delgadas impregnadas com resina, em microscópio óptico de luz transmitida. Algumas amostras foram impregnadas também com corante, a fim de facilitar a observação dos vazios do material, uma vez que o corante aparece nas lâminas preenchendo estes espaços vazios. A lâmina delgada foi confeccionada do corte da amostra impregnada em placas, que são coladas em lâmina de vidro e levadas a rebaixamento até atingir a espessura de observação necessária para este método.

A análise fotomicrográfica das cinzas foi realizada em amostras confeccionadas de duas maneiras diferentes, conforme se explica seguidamente.

- a) Amostras impregnadas com resina e corante foram feitas a partir da separação das frações fina, média e grossa da cinza por peneiramento, para uma melhor visualização da morfologia dos grãos. Após a separação por faixa granulométrica, os corpos de prova foram moldados estaticamente com os parâmetros ótimos da curva de compactação com energia Proctor Normal e posteriormente impregnados. Os corpos de prova preparados com separação por faixa granulométrica foram confeccionados sem adição de bentonita. Para a cinza de fundo foram confeccionadas amostras em três faixas granulométricas distintas e para a cinza volante foi separada somente a fração mais grossa do restante, conforme a Tabela 9.
- b) Amostras sem corante foram retiradas de corpos de prova após a realização dos ensaios de condutividade hidráulica. Foram analisadas misturas de areia, cinza de fundo e cinza leve, todas com 18% de bentonita.

Tabela 9 – Intervalos granulométricos das amostras analisadas em microscópio óptico

Cinza de fundo	Fração fina (passante na # 100 e retido na # 200)	0,075 a 0,15 mm
	Fração média (passante na # 40 e retido na # 60)	0,25 a 0,425 mm
	Fração grossa (passante na # 10 e retido na # 20)	0,85 a 2,0mm
Cinza volante	Fração grossa (retido na # 200)	> 0,075 mm

Foi realizada também uma análise fotomicrográfica das partículas de cinza em microscópio eletrônico de varredura (MEV) com o propósito de identificar e visualizar os vazios das partículas. A preparação das amostras de cinza foi feita de acordo com os procedimentos gerais descritos por Tovey (1986). A execução das imagens foi feita no Laboratório de Metalurgia Física, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, a partir da obtenção de imagens de elétrons secundários em um microscópio eletrônico de varredura.

6 - RESULTADOS E ANÁLISE

6.1 - Condutividade hidráulica

6.1.1 - Geral

As propriedades iniciais das amostras dos ensaios realizados na umidade ótima e densidade máxima da curva de compactação de cada mistura estão resumidas na Tabela 10. O índice de vazios e a porosidade das amostras que estão listados na tabela foram calculados após a fase de adensamento, com base nos resultados de variação volumétrica obtidos durante a aplicação da tensão efetiva de 100 kPa. O grau de saturação apresentado na Tabela 10 foi obtido antes da percolação d'água e da aplicação de contra-pressão. Portanto, o grau de saturação das amostras no momento do ensaio de condutividade hidráulica é superior ao apresentado na tabela, resultando em parâmetros B próximos à unidade.

Tabela 10 – Propriedades iniciais das amostras e resultados

Material	% bentonita	Índice de vazios, e	Porosidade, <i>n</i>	Grau de saturação inicial, S (%)	Parâmetro B	k (m/s)
Cinza de fundo	0	1,31	0,57	77,5	0,96	1,78x10 ⁻⁶
	3	1,33	0,57	80,3	0,98	1,68x10 ⁻⁶
	6	1,28	0,56	68,3	0,94	7,34x10 ⁻⁷
	9	1,39	0,58	73,8	0,95	3,06x10 ⁻⁷
	18	1,33	0,57	65,2	0,92	1,39x10 ⁻⁷
Cinza volante	0	1,15	0,53	80,7	0,98	5,67x10 ⁻⁷
	3	1,16	0,54	78,7	0,97	4,25x10 ⁻⁷
	6	1,17	0,54	78,1	0,93	2,16x10 ⁻⁷
	9	1,13	0,53	86,3	0,96	1,29x10 ⁻⁷
	18	1,19	0,54	79,3	0,92	1,12x10 ⁻⁷
Areia	0	0,76	0,43	33,7	0,98	3,17x10 ⁻⁵
	18	0,95	0,49	97,0	0,95	5,15x10 ⁻¹⁰

6.1.2 - Cinzas

O efeito do teor de bentonita está ilustrado na Figura 8. Tanto para a cinza de fundo como para a cinza volante, a adição de bentonita não alterou significativamente o resultado da condutividade hidráulica das misturas, reduzida em somente uma ordem de magnitude para a cinza de fundo (de $1,78 \times 10^{-6}$ m/s para $1,39 \times 10^{-7}$ m/s) e em menor escala para a cinza volante (de $5,67 \times 10^{-7}$ m/s para $1,12 \times 10^{-7}$ m/s). Tal fato leva a concluir que, mesmo adicionando uma grande quantidade de argila expansiva (18%), os vazios formados pelos grãos porosos e angulosos da cinza não são preenchidos, resultando em um material ainda muito permeável.

O efeito da adição de bentonita na areia está ilustrado na Figura 8 através de uma linha pontilhada, em virtude de não existirem dados entre os extremos apresentados (0 e 18%); portanto, não é conhecida a relação entre adição de bentonita e condutividade hidráulica neste intervalo.

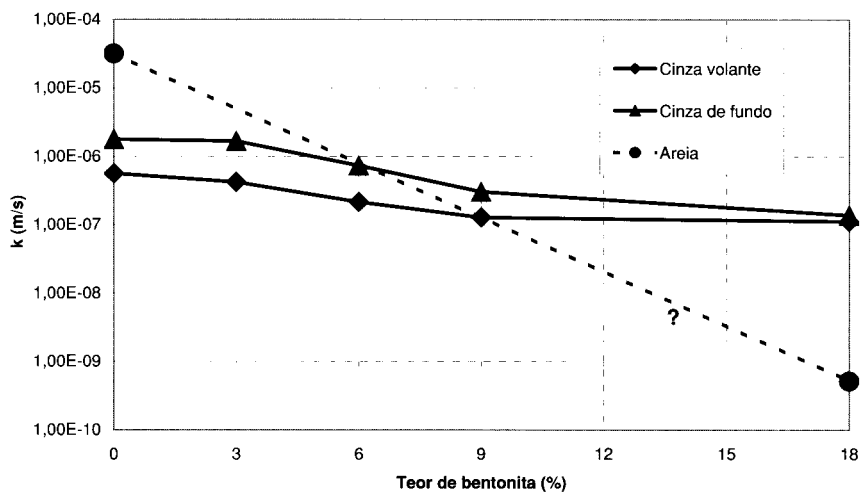


Fig. 8 – Efeito dos teores de bentonita adicionados na condutividade hidráulica dos materiais estudados

6.1.3 - Areia

Foram realizados somente ensaios de condutividade hidráulica na areia sem bentonita e com a adição máxima (18%), no intuito de comparar com o comportamento das cinzas. Concluiu-se que a adição de bentonita na areia resultou em uma redução significativa da condutividade hidráulica, de $3,17 \times 10^{-5}$ m/s para $5,15 \times 10^{-10}$ m/s, minimizando o resultado em cinco ordens de magnitude.

Analisando estes resultados e comparando-os com os resultados das cinzas, pode ser concluído que o fator preponderante para o comportamento diferenciado destes materiais seria a morfologia dos grãos da matriz das misturas, uma vez que a bentonita quando misturada na areia, que possui grãos pouco angulares e sem porosidade interna, mostrou ser capaz de reduzir com grande eficiência a condutividade hidráulica das misturas.

6.2 - Fotomicrografia

6.2.1 - Cinzas

Como mostra a Figura 9, observada ao microscópio óptico, a cinza de fundo caracteriza-se por uma grande variação de tamanho de grão e de forma, mostrando a predominância de partículas angulosas a sub-angulosas de material opaco e translúcido. Por outro lado, é igualmente freqüente a presença de corpos esféricos (cenosferas e plerosferas) opacos (Figura 9.2 – detalhe c) e translúcidos (Figura 9.1 – detalhe b, 9.3 – detalhe f, 9.4 – detalhe g). Salienta-se também a ocorrência de partículas que mostram a transição da partícula, de sólida a oca (de plerosferas a cenosferas - Figura 9.4 – detalhe h).

Os grãos tendem a apresentar contatos do tipo pontual (Pettijohn *et al*, 1987), sendo raros os contatos longitudinais. Deve ser ressaltada a porosidade das partículas opacas e translúcidas, bem como seus contornos externos extremamente irregulares (Figura 9.1 – detalhe a, 9.2 – detalhe e), o que seria responsável pela alta condutividade hidráulica do material. A orientação dos poros da partícula (definidos como PP – Figura 9.1) guarda relação com a estrutura sedimentar primária do material. Os poros indicados na figura correspondem aos locais de material carbonoso volatilizado e expandido durante o processo de queima do carvão.

Outra característica que pode ser observada é a presença de cenosferas (esferas ocas) permeáveis (Figura 9.3 – detalhe f, 9.4 – detalhe h), sugerindo fragilidade da partícula e facilidade de penetração de fluido em seu interior.

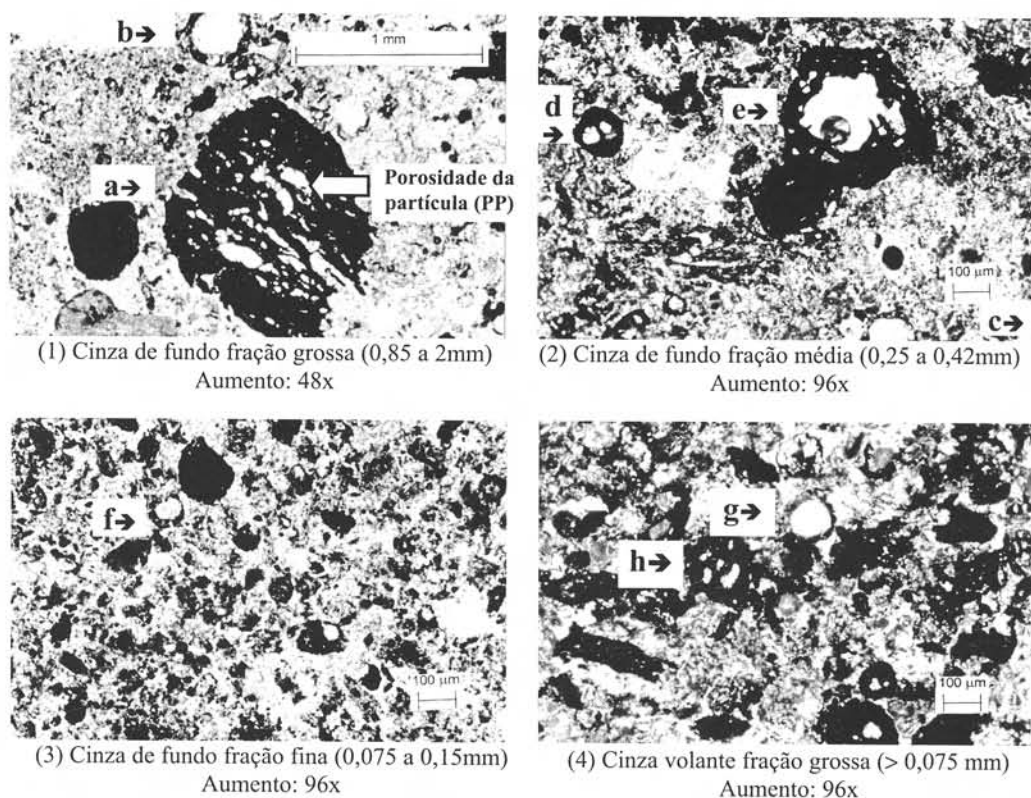


Fig. 9 – Fotomicrografias das cinzas de fundo e volante separadas por faixas granulométricas

É significativa a geração de finos com predominância de material translúcido por efeito do processo de compactação, que sugere uma fragilidade pronunciada destes componentes (Figura 9.3).

Morfologicamente, como pode ser observado na Figura 10, as amostras de cinza de fundo e cinza volante mostram-se análogas.

Assim, como foi observado nas fotos anteriores, nota-se a presença de plerosferas translúcidas e opacas (Figura 10.1 – detalhe i e 10.2 – detalhe j), bem como grãos extremamente irregulares e porosos (Figura 10.1 – detalhe k e 10.2 – detalhe m). As partículas de bentonita aparecem distribuídas aleatoriamente. (Figuras 10.1- detalhe n e 10.2 – detalhe o).

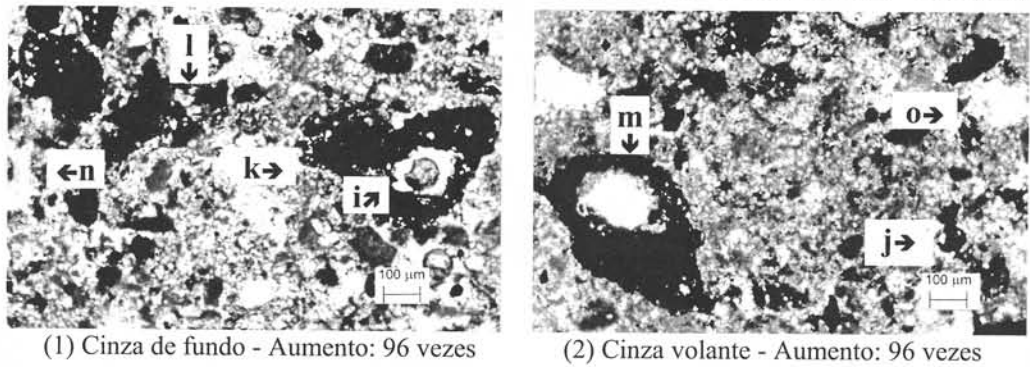


Fig. 10 – Fotomicrografias das cinzas de fundo e volante com 18% de bentonita, sem separação por faixa granulométrica

Foram realizadas fotomicrografias em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) para comprovar a existência de poros nas partículas, observados nas imagens obtidas com microscópio óptico de luz transmitida (Figura 9.1, por exemplo). Na Figura 11 observa-se nitidamente a morfologia da partícula de cinza volante, onde pode ser visualizado um poro de aproximadamente 16 µm (aumento de 1500 vezes). O detalhe da Figura 11.1 mostra a região onde foi realizada a imagem da Figura 11.2, em um aumento de 4500 vezes. Portanto, as imagens de MEV comprovam a hipótese de que a alta condutividade hidráulica das cinzas deve-se à grande porosidade das partículas, que pode ser observada nitidamente na Figura 11.

A imagem de MEV mostra também a presença de corpos esféricos, previamente observados nas fotomicrografias obtidas com microscópio óptico.

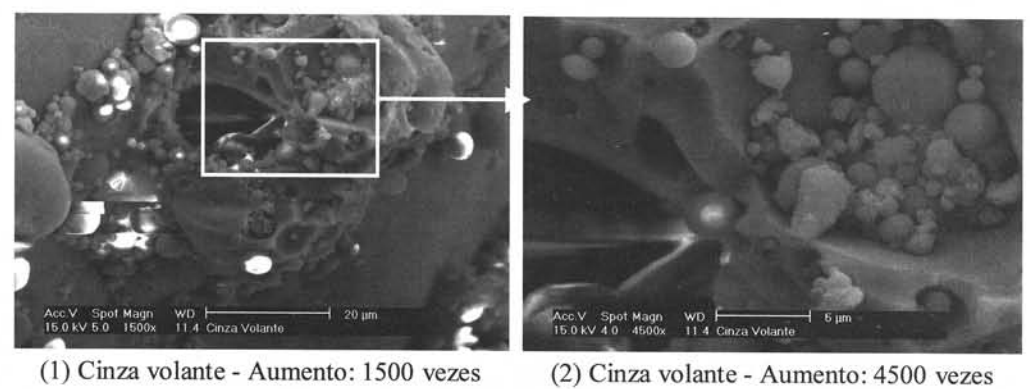


Fig.11 – Fotomicrografias em MEV da cinza volante

6.2.2 - Areia

A areia reflete uma natureza clássica que define uma relação textural entre as partículas na forma de contatos do tipo longitudinal predominante (Figura 12.2 – detalhe p) e pontual subordinado (Pettijohn *et al*, 1987). A distribuição das partículas é aleatória. Os grãos são arredondados a sub-arredondados, com ocorrência subordinada de grãos sub-angulosos.

A areia é constituída dominantemente por grãos de quartzo monocristalinos (Figura 12.2 – detalhe p), que dão formas sub-angulosas aos grãos arredondados primitivos.

Os grãos de quartzo policristalinos são representados por indivíduos de quartzitos e sílex. Opacos e turmalinas são raros.

A bentonita aparece “cobrindo” os grãos de areia, formando uma matriz argilosa responsável pela diminuição da condutividade hidráulica. Observa-se, também, aglomerados de partículas de bentonita de tamanho equivalente ao tamanho dos grãos de areia (Figura 12.2 – detalhe r). Os pontos escuros que aparecem no detalhe q das Figuras 12.1 e 12.2 são falhas na impregnação das amostras.

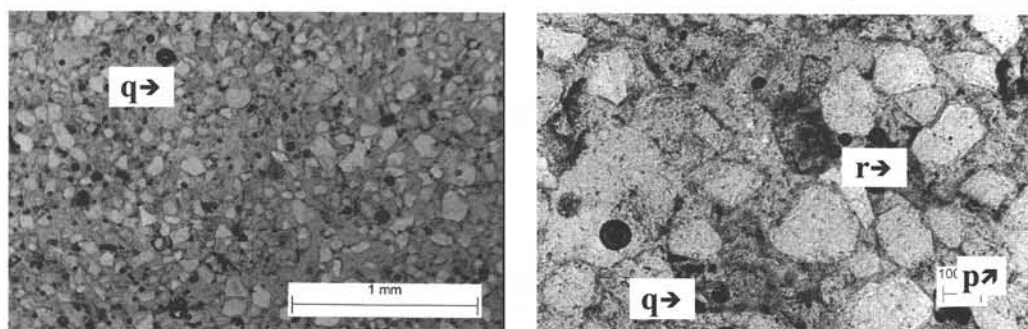


Fig. 12 – Fotomicrografias da areia com 18% de bentonita

7 - CONCLUSÕES

Baseando-se na investigação de laboratório, observou-se que para as cinzas de fundo e volante, a adição de bentonita não resultou em uma redução significativa da condutividade hidráulica das misturas, uma vez que para a cinza de fundo foi reduzida em somente uma ordem de magnitude (de $1,78 \times 10^{-6}$ m/s para $1,39 \times 10^{-7}$ m/s) e em menos de uma ordem de magnitude para a cinza volante (de $5,67 \times 10^{-7}$ m/s para $1,12 \times 10^{-7}$ m/s). A maior diminuição na condutividade hidráulica foi observada nas misturas cuja matriz era constituída de areia (de $3,17 \times 10^{-5}$ m/s para $5,15 \times 10^{-10}$ m/s), mostrando que um dos fatores que governa a condutividade hidráulica das misturas é a morfologia dos grãos constituintes da matriz.

Para a areia, cujos grãos são sólidos e onde predominam os contatos longitudinais entre partículas, a adição de bentonita pode diminuir a condutividade hidráulica. Em contrapartida, para as cinzas, onde os grãos apresentam-se extremamente angulosos, porosos e onde predominam os contatos pontuais entre partículas, a adição de bentonita até os níveis estudados não foi capaz de reduzir substancialmente a condutividade hidráulica, sugerindo que seria necessária uma quantidade muito maior de bentonita para que fosse provavelmente alcançada uma redução significativa até os níveis desejados.

Vários fatores podem ser responsáveis pela dificuldade na diminuição da condutividade hidráulica das cinzas com a adição de bentonita, dentre eles a sua granulometria (praticamente

100% da cinza volante possui grãos do tamanho silte; a cinza pesada possui aproximadamente 30% de grãos deste tamanho). Tal fato provavelmente deve dificultar a obtenção de uma mistura homogênea de cinza e bentonita e a eliminação de aglomerados constituídos exclusivamente por partículas de cinza, inibindo o envolvimento das partículas individuais por bentonita. Além disso, a morfologia dos grãos de cinza observada na análise fotomicrográfica do material, mostrando os poros existentes nas partículas de cinza, possivelmente indica que a água passaria com facilidade por estes poros, resultando na alta condutividade hidráulica das cinzas observada no programa experimental.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar os seus agradecimentos ao CNPq (Projeto Edital Universal 479804/2001-0) e ao Projeto ProDoc/Capes, pelo apoio fundamental para a execução desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alston, C.; Daniel, D.E.; Devroy, D.J. Design and construction of sand-bentonite liner for effluent treatment lagoon, Marathon, Ontario. *Canadian Geotechnical Journal*. v. 34, n. 6, p. 841-852, 1997.
- American Society for Testing and Materials. Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter: D 5084. Philadelphia, 1990. 8p.
- American Society for Testing and Materials. Standard Terminology relating to soil, rock and contained fluids: D 653. Philadelphia, 1997.
- American Society for Testing and Materials. Standard Classification of Soils for Engineering Purposes: D 2487. Philadelphia, 1993. 11p.
- Andrade, A..Caracterização das Cinzas Volantes do Carvão de Candiota. Porto Alegre, 1985. 152p. Dissertação (mestrado em engenharia metalúrgica e dos materiais) - PPGEMM/UFRGS.
- Associação Brasileira de Norma Técnicas. Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização: NBR 6457. Rio de Janeiro,1986, 9p.
- Associação Brasileira de Norma Técnicas. Solo – Análise granulométrica: NBR 7181. Rio de Janeiro,1984c, 13p.
- Associação Brasileira de Norma Técnicas. Solo – Determinação do limite de liquidez: NBR 6459. Rio de Janeiro,1984a, 6p.
- Associação Brasileira de Norma Técnicas. Rochas e solos – Terminologia: NBR 6502. Rio de Janeiro,1995, 18p.
- Associação Brasileira de Norma Técnicas. Resíduos Sólidos: NBR 10004. Rio de Janeiro,1987. 63p.
- Associação Brasileira de Norma Técnicas. Solo – Determinação do limite de plasticidade: NBR 7180. Rio de Janeiro,1984b, 4p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. Grãos de Solo que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica: NBR 6508. Rio de Janeiro,1984, 8p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. Solo - Ensaio de Compactação: NBR 7182. Rio de Janeiro,1986a, 10p. Origem: Projeto NBR 7182/84.

- Binotto, R.B.; Teixeira, E.C.; Sánchez, J.C.; Nanni, A.S.; Fernandes, I.D.; Migliavacca, D.M. Avaliação ambiental da região do baixo Jacuí, RS, Brasil: Localização, Descrição e Caracterização dos resíduos provenientes das atividades de processamento de carvão. Relatório Técnico, 37p. Porto Alegre: FEPAM, CIENTEC, 1999.
- Boynton, S.S.; Daniel, D.E. Hydraulic conductivity tests on compacted clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, v.111, n.4, p. 465-478, 1985.
- Brandl, H. Mineral liners for hazardous waste contaminant. *Géotechnique*, London, v.42, n.1, p.57-65, 1992.
- Calarge, L.M.; Silva, L.I.W.; Chies, F.; Zwonok, O. Desenvolvimento de tijolos maciços a partir de cinzas pesadas e cal hidratada. I – Caracterização da cinza pesada. In.: II SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL, 1998, Porto Alegre. p. 122 –127.
- Carpenter, G.W.; Stephenson, R.W. Permeability testing in the triaxial cell. *Geotechnical Testing Journal*, v.9, n.1, p. 3-9, março 1986.
- Chies, F.; Zwonok, O.; Silva, N.I.W.; Calarge, L.M.; Morel, N.F. Projeto CIPECAL – Desenvolvimento de Blocos e Tijolos a partir de Cinzas de fundo e Cal hidratada. Publicação interna, Porto Alegre, 1999. CIENTEC, FUNDAÇÃO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA.
- Daniel, D.E.; Trautwein, S.J.; Boynton, S.S.; Foreman, D.E. Permeability testing with flexible-wall permeameters. *Geotechnical Testing Journal*, v.7, n.3, p. 113-122, set. 1984.
- Daniel, D.E.; Benson, C.H. Water-content density criteria for compacted soil liners. *Journal of Geotechnical Engineering*, v.116, n.12, p. 1811-1830, 1990.
- Daniel, D.E. State-of-the-art: Laboratory hydraulic conductivity tests for saturated soils. In.: HYDRAULIC CONDUCTIVITY AND WASTE CONTAMINANT TRANSPORT IN SOIL, 1994, Philadelphia. ASTM STP 1142, ASTM, 1994. p. 30-78.
- Díaz, J.G. Estudo do Comportamento de Fundações Superficiais em Solos Cimentados. Porto Alegre, 1998. 137p. Dissertação (mestrado em engenharia) - CPGEC/UFRGS.
- Graham, J.; Saadat, F.; Gray, M.N.; Dixon, D.A.; Zhang, Q.Y. Strenght and volume change behaviour of a sand-bentonite mixture. *Canadian Geotechnical Journal*. v. 26, n. 2, p. 292-305, 1989.
- Han, D. Use potential of fly ash-residual soil mixture as a dyke material. *Environmental Geotechnics*. Balkema, Rotterdam, p. 721-726, 1996.
- Kozicki, P.; Harty, S.; Kozicki, J. P. Design and construction of soil-bentonite liners and two case histories. In.:1st INTERNATIONAL CONGRESS ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNICS, Jul 1994, Alberta, Canada. Proceedings... 1994, 1v., p. 713-719.
- Pettijohn, F.J.; Potter, P.E.; Siever, R. Sand and Sandstone, New York: Springer-Verlag, 1987. Second Edition, 551p.
- Rohde, G.M. Cinzas de carvão no Brasil: restrições ambientais e medidas mitigadoras. Relatório Técnico, 39p. Porto Alegre: CIENTEC, 1996.
- Sánchez, J.C.D. Emissão de Elementos-Traço Provenientes da Combustão de Carvão em Caldeira de Grande Porte. Porto Alegre, 1987. 151p. Dissertação (mestrado em engenharia metalúrgica e dos materiais) - PPGEMM/UFRGS
- Sánchez, J.C.D.; Zwonok, O.; Fernandes, I.D.; Teixeira, E.C. Caracterização de cinzas de carvão e sua classificação segundo NBR 10004. In.: II SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL, 1998, Porto Alegre. p. 458-465.
- Shackelford, C.D.; Glade, M.J. Constant-flow and constant-gradient permeability tests on sand-bentonite-fly ash mixtures. In.: In.: HYDRAULIC CONDUCTIVITY AND WASTE CONTAMINANT TRANSPORT IN SOIL, 1994, Philadelphia. ASTM STP 1142, ASTM, 1994. p. 521-545.

- Sivapullaiah, P.V.; Sridharan, A.; Stalin, V.K. Swelling behaviour of soil-bentonite mixtures. *Canadian Geotechnical Journal*. v. 33, n. 5, p. 808-814, 1996.
- Spinelli (1999) Comportamento de Fundações Superficiais em Solos Cimentados. Porto Alegre, 1999. 133p. Dissertação (mestrado em engenharia) - CPGEC/UFRGS.
- Tessari, M. A. Ensaios de Placa em Camadas de Cinza Pesada de Carvão Tratadas com Cimento. Porto Alegre, 1998. 84p. Dissertação (mestrado em engenharia) - CPGEC/UFRGS.
- Tovey, N. K. Microfabric, chemical and mineralogical studies of soils: techniques. *Geotechnical Engineering*, Amsterdam, v.17, p.131-163, 1986.
- Thomé, A. Comportamento de Fundações Superficiais Apoiadas em Aterros Estabilizados com Resíduos Industriais. Porto Alegre, 1999. 238p. Tese (doutorado em engenharia) - CPGEC/UFRGS
- Umedera, M.; Fujiwara, A; Hyodo, M. Murata, H.; Yasufuku, N. Effect of suction on the mechanical behaviour of bentonite-sand mixtures. *Environmental Geotechnics*. Balkema, Rotterdam, p. 169-172, 1996.
- Yan Ree, C.C.D; WESTSTRATE, F.A.; MESKERS, C.G.; BREMMER, C.N. Design aspects and permeability testing of natural clay and sand-bentonite liners. *Géotechnique*, London, v.42, n.1, p.49-56, 1992.
- Zwonok, O.; Chies, F. Projeto CICASOL – Pavimentos de solos estabilizados com cinza volante e cal. Publicação interna, Porto Alegre, 1984. CIENTEC, FUNDAÇÃO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA.