

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS E  
SUAS APLICAÇÕES NA ENGENHARIA GEOTÉCNICA  
(Aplicação de Cinzas de Carvão como Condicionadores de Solo)**

**Aluna: Luiza Camara**

**Orientadora: Michéle Dal Toé Casagrande  
Co-orientadora: Patrícia Österreicher-Cunha**

**Introdução**

Atualmente é de grande importância saber qual é a melhor maneira de descartar, ou, de preferência, reaproveitar todos os tipos de resíduos sólidos gerados pelas mais variadas atividades humanas. Isso tem sido um grande desafio para cientistas e empresários, devido a grande preocupação com o esgotamento dos recursos naturais.

O tema escolhido para este trabalho, análise da utilização de cinzas de carvão, volante e pesada, provenientes de termelétricas em misturas com solo para o estudo de um possível condicionamento do mesmo, foi motivado pela busca de práticas sustentáveis, na redução de impactos ambientais e que, conseqüentemente dão um fim mais nobre a materiais antes descartados.

As cinzas estudadas são derivadas do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, localizado no município de Capivari de Baixo, no estado do Rio Grande do Sul, região no território brasileiro que concentra a exploração de carvão mineral, e conseqüente geração de energia por usinas termelétricas. O solo utilizado é proveniente do campo experimental da PUC-Rio, é um solo residual de gnaiss maduro.

Atualmente grande parte desses resíduos é descartada em grandes bacias de sedimentação, a céu aberto, como na Figura 1, podendo ocasionar diversos problemas de cunho ambiental e, a partir do seu reaproveitamento torna-se possível a diminuição do consumo de recursos naturais e, conseqüentemente, a obtenção de benefícios econômicos e ambientais.



Figura1. Bacia de sedimentação para descarte de resíduos

O objetivo principal desta pesquisa é verificar a viabilidade do aproveitamento das cinzas de carvão mineral, volante e pesada, em misturas com solo regional do município do Rio de Janeiro, verificando se tal prática pode trazer benefícios a esse solo, através de ensaios laboratoriais, para três períodos de cura distintos, avaliando-se o efeito das cinzas sobre a microbiota de um solo tropical.

## Revisão Bibliográfica

Segundo Pinto (1971) e Nardi (1975) as cinzas vulcânicas como aditivo às argamassas vêm sendo usadas há cerca de 2.000 anos, pelos romanos, antes da era cristã, que as coletavam no sopé do vulcão Vesúvio, localizado em Pozzuoli, na Itália, explicando, desta forma, a denominação, pozolana. Já a cal pode ser citada como um dos primeiros materiais de construção da Engenharia, utilizada pelos chineses, juntamente com argila, para construção da Muralha da China. Com o desenvolvimento industrial do século XX, e crescimento das termelétricas, a quantidade de cinzas provenientes da queima do carvão aumentou demasiadamente, fazendo com que surgissem inúmeras pesquisas com objetivo de empregá-las com fins comerciais, resolvendo o problema de descarte de um resíduo e sugerindo o seu reaproveitamento, poupando a exploração de mais recursos naturais.

O carvão mineral já foi considerado o recurso energético não renovável mais abundante do país, com reservas nacionais atingindo 32,4 bilhões de toneladas e conseqüentemente apontado como a alternativa mais eminente para o petróleo, uma vez que possibilitava resultados positivos em curto prazo e considerando o domínio sobre sua tecnologia de aproveitamento como combustível desde o início da sociedade industrial. (GOETHE, 1990, apud POZZOBON,1999)

Em todo o mundo, mais de 4 bilhões de toneladas de carvão são consumidas anualmente como combustível em usinas termelétricas. (ROHDE *et al.*, 2006). No panorama mundial de geração de energia elétrica, a oferta mundial de energia apresenta, segundo dados de 2003, a seguinte distribuição: carvão fóssil, 39%; gás natural, 19%; energia nuclear, 17%; hídrica, 16%, petróleo, 7% e outras fontes, 2%.

A Figura 2 é demonstrada a participação do carvão mineral na oferta interna de energia no Brasil, de acordo com os dados do Balanço Energético Nacional de 2010, com base nos dados do ano de 2009. Atualmente, apesar da maior parte da oferta de energia, no Brasil, ser derivada de fontes não renováveis, na Figura 3 se vê o crescimento da participação das fontes renováveis de energia. O carvão mineral é utilizado como combustível para geração de energia térmica. No Brasil, devido a aspectos geográficos e a dimensão do território, as termelétricas, que empregam carvão mineral como combustível, estão situadas geograficamente próximas aos principais jazidas carboníferas do país, nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. (VIEGAS, 1977; ROHDE *et al.*, 1996 apud POZZOBON,1999)

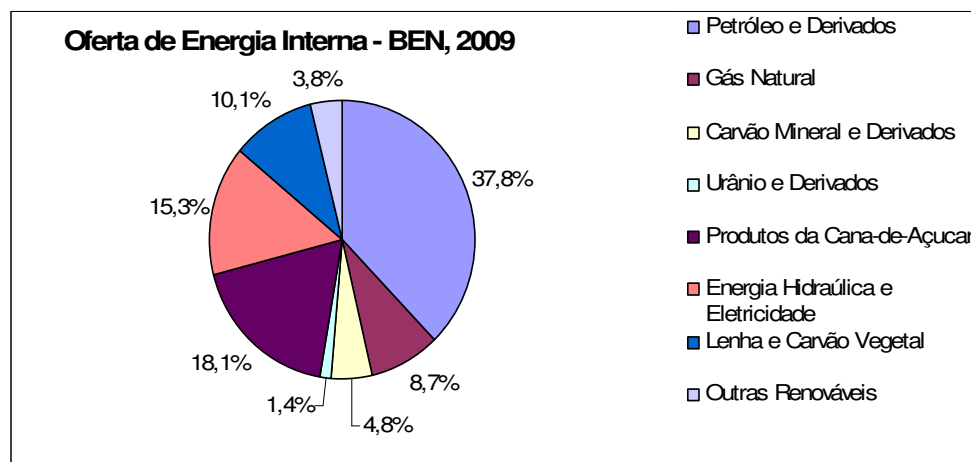


Figura 2. Gráfico representativo da Oferta Interna de Energia no Brasil com dados de 2009 (Fonte: EPE, 2010)

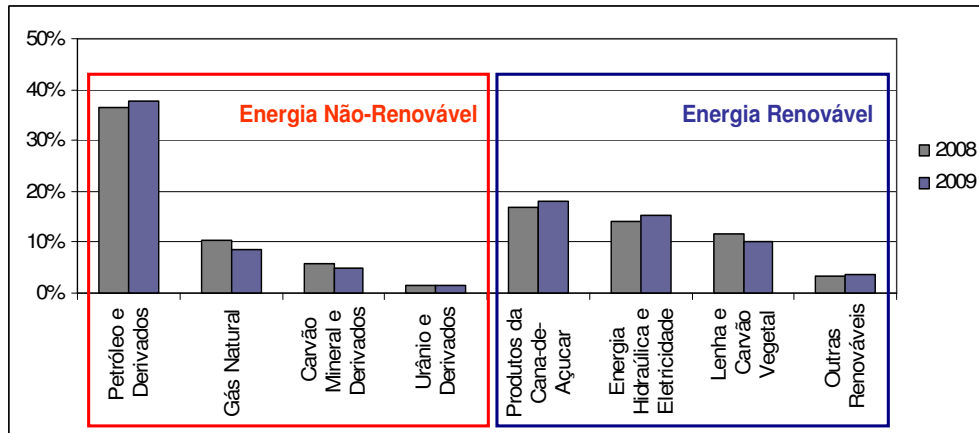


Figura 3. Comparação das Diferentes Fontes de Energia, no Brasil, em 2008 e 2009. (Fonte: EPE, 2010)

É importante citar que as usinas termelétricas podem utilizar outro tipo de combustíveis, e por este motivo, são classificadas quanto ao tipo de combustível. As usinas convencionais são aquelas que utilizam derivados de petróleo, gás, energia nuclear e carvão mineral, e as não convencionais, que usam biomassa, resíduos orgânicos e outros, de acordo com Viegas (1997). Pesquisas da ELETROBRÁS mostram que em 1997, aproximadamente metade da energia térmica gerada nas usinas convencionais, era gerada pela queima do carvão mineral.

### As Cinzas e o Meio Ambiente

As cinzas de carvão mineral por definição são resíduos sólidos industriais e por este motivo restrições ambientais são impostas as mesmas. Por outro lado, o contínuo aumento dos critérios de controle por parte das agências ambientais e a crescente relevância da implantação de conceitos e atitudes sustentáveis, incentiva o reaproveitamento destes resíduos para outras finalidades.

O potencial poluidor das cinzas depende das concentrações dos elementos tóxicos e do grau de solubilização destes elementos no ambiente natural. Gothe (1990) ressalta que as cinzas de carvão mineral contêm metais pesados em sua composição química e desta forma, devem ser submetidas a ensaios ambientais, como o de lixiviação, para proceder na classificação de resíduos sólidos.

Apesar destas ressalvas, as cinzas de carvão mineral, como demonstrado por diversas pesquisas ao longo dos anos, Marciano Jr. (1996, apud POZZOBON, 1999), Parsa *et al.* (1996 apud POZZOBON, 1999) e Weng & Huang (1994, apud POZZOBON, 1999), podem ser utilizadas inclusive com a finalidade de estabilização de resíduos.

### Origem e Classificação das Cinzas

De acordo com Rohde *et al* (2006) a formação das cinzas se dá pela combustão direta do carvão, matéria-prima sólida, constituída por duas frações intimamente misturadas, uma orgânica (material volátil mais carbono fixo) e uma fração mineral (argilas, quartzo, piritas, carbonatos, etc.). Pela ação do calor a fração orgânica gera voláteis e coque, enquanto a fração mineral se transforma em cinza com uma mineralogia modificada, tendo em vista, a perda de água das argilas, decomposição dos carbonatos, oxidação dos sulfetos, etc. Para Nardi (1975), as cinzas consistem em

componentes não combustíveis de carvão, além de partículas não queimadas devido à combustão incompleta do carvão pulverizado. A Figura 4 apresenta o processo de queima do carvão mineral em usinas termelétricas. Na geração de energia termelétrica pela queima do carvão mineral são gerados resíduos (40% em peso destes), correspondente à fração das cinzas, sendo 60% cinzas volantes e 40% cinza de fundo.

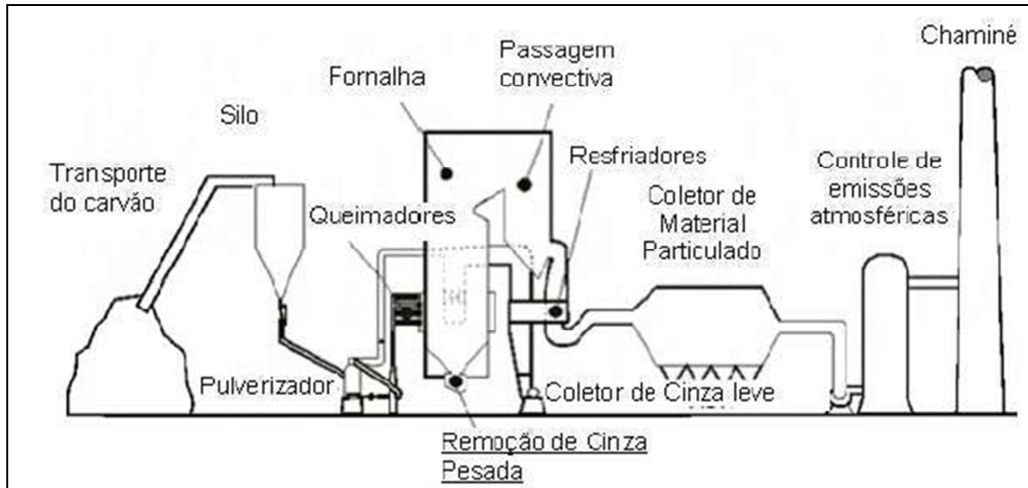


Figura 4. Processo de Queima do Carvão Mineral em Usinas Termelétricas (Fonte: University of North Dakota - Coal Ash Research Center. obtida no dia 25 de março de 2002 em <http://www.undeerc.org/carrc/html/CoalCombustion.html>, apud FARIAS, 2005)

Segundo Rohde *et al.* (2006), as cinzas apresentam-se de diferentes formas conforme o processo de gaseificação ou queima do carvão e podem ser classificadas como:

- Escória/Cinza Grossa (*slag ou boiler slag*): originada nos processo de combustão ou gaseificação do carvão em grelhas fixas e móveis, apresentam-se, frequentemente, com granulometria grosseira e blocos sinterizados, com elevados teores de carbono não queimado (10-20%). São retiradas pelo fundo das fornalhas, após resfriamento com água.

- Cinza de Fundo/Cinza Pesada/Cinza Úmida (*bottom ash*): originadas nos processos de combustão do carvão em forma pulverizada e da queima ou gaseificação do carvão em leito fluidizado, contém geralmente teores de carbono não queimado de 5 a 10%. São cinzas mais pesadas e de granulometria mais grossa, que caem para o fundo das fornalhas e gaseificadores, de onde são frequentemente retiradas por um fluxo de água, principalmente nas grandes caldeiras de usinas térmicas e centrais de vapor.

- Cinza Leve/ Cinza Volante (*fly ash*): constituídas de partículas extremamente finas (100% menor que 0,15mm), leves e que são arrastadas pelos gases de combustão de fornalhas ou gases gerados em gaseificadores industriais. Grande parcela dessas partículas é retida por um sistema de captação – filtros de tecido, ciclones, precipitadores eletrostáticos, etc. As grandes unidades produtoras deste tipo de cinzas são as usinas termelétricas e centrais de vapor. Em descrição mais detalhada de Rohde *et al.* (2006), cinzas volantes são definidas como materiais particulados sílico-aluminosos, de textura siltosa, remanescentes da matéria mineral calcinada nos processos de combustão de carvão pulverizado, em ambiente oxidante e de alta temperatura, extraídos por meios eletrostáticos dos gases de combustão.

As propriedades físico-químicas das cinzas oriundas da combustão do carvão mineral em usinas termelétricas são influenciadas por diversos fatores, tais como a composição do carvão; grau de beneficiamento e moagem do carvão; tipo, projeto e operação da caldeira; sistema de extração e manuseio das cinzas, como observado por Goethe (1990): “Devido a estes fatores, as cinzas vão mostrar variação na sua composição e propriedades físico-químicas, não só de usina para usina, mas de caldeira para caldeira na mesma usina e até numa mesma caldeira em tempos diferentes”.

Existem ainda outros sistemas de classificação das cinzas de carvão, Brasil, entre os quais se pode dar destaque a: sistema de graduação, fundamentado na finura e/ou perda ao fogo, como no estado físico e sistemas triangulares, onde diferentes classes podem ser definidas com base no conteúdo de material sílico, cálcico e férrico. A umidade de especificação pode ser atingida por secagem sem prejuízos para a qualidade das cinzas. Dependendo do tipo de utilização altas umidades podem ser benéficas. A especificação pode ser atendida por moagem e britagem. Nem sempre maior finura vai significar maior qualidade. Vai depender do tipo de aproveitamento.

Na verdade, no Brasil, ainda não existe legislação específica para as cinzas derivadas de carvão mineral, e em termos práticos as mesmas são classificadas como resíduos sólidos, fazendo com que para sua utilização seja necessária uma aprovação específica, cada caso individualmente, além de monitoramento ambiental prolongando. Segundo Rhode *et al.* (2006), atualmente a produção de cinzas da combustão de carvão, das termelétricas região sul do país e outras unidades industriais, atinge aproximadamente 4.000.000 toneladas por ano das quais somente em torno de 50% são aproveitadas. O Quadro 1 apresenta as principais características das cinzas estudadas.

Resíduo	Características	Produto Elaborado	Vantagens
Cinza de Fundo	Subproduto da combustão do carvão; partículas com tamanho de 0,08 a 20mm; forma angular; muito porosa	Cimento Agregado Leve Sub-base de Solo Estabilizado	Economia de Energia Aumento da Capacidade de produção para um gasto de capital relativamente mais baixo.
Cinza Volante	Subproduto da combustão do carvão, partículas menores carregadas pelos gases da combustão para chaminés.	Cimento Concreto Agregado Leve Sub-base de solo estabilizado Fíller de asfalto Tijolo	Economia de energia Aumento da capacidade de produção para um gasto de capital relativamente mais baixo. Textura fina. Baixa Massa Específica Facilidade de combinação com a cal livre (propriedade pozolânica)

Quadro 1. Características da cinza volante e pesada, produtos, vantagens (Fonte: POZZOBON, 1999)

## **Cinza Volante**

Em geral, no processo de queima do carvão, as cinzas volantes, devido a baixa densidade, flutuam até as chaminés, onde são coletadas mecanicamente por precipitadores eletrostáticos ou outro tipo de mecanismo que venha ser utilizado com este fim, onde sofrem um processo de resfriamento e com o auxílio de equipamentos pneumáticos são transportados até os silos de armazenagem. Neste momento, como grande parte das cinzas volantes, no Brasil, já é destinada a reutilização de diversas formas, parte das cinzas são separadas para a realização de análise de parâmetros físicos e químicos, com a finalidade de determinar a variação de tais propriedades e conferir o enquadramento dentre dos requisitos aplicáveis.

As cinzas volantes são capazes de desenvolver reações pozolânicas, e que quando misturadas a cal possuem características semelhantes à reconhecida mistura para estabilização de solos, solo/cal, como observado por ROSA (2009) e outros diversos estudos.

Quanto às características químicas das cinzas volantes oriundas das termelétricas da região sul do país, pode-se dizer que mais de 90% consistem em sílica, alumina e óxido de ferro, além de óxido de cálcio, magnésio, sódio, potássio, titânio e outros em menores teores. É importante lembrar que a composição química das cinzas volantes está profundamente relacionada com as características dos carvões dos quais são originadas. Já quanto as características físicas, normalmente, as cinzas volantes são caracterizadas por uma granulometria siltosa, às vezes, com presença de areias, são materiais não plásticos e não coesivos, com a massa específica dos grãos variando entre 2050kg/m<sup>3</sup> e 2200kg/m<sup>3</sup>.

Considerando as características mineralógicas, de uma forma geral, as cinzas volantes, constituem-se predominantemente, de material vítreo de natureza sílico-aluminosa e em menor proporção de compostos cristalizados. A morfologia das partículas varia de acordo com as condições de queima, portanto as cinzas volantes provenientes da combustão de carvão pulverizado, contém predominantemente partículas esféricas com pequenas quantidades de cenosferas e de partículas irregulares. (ROHDE *et al.*, 2006)

## **Cinza de Fundo**

Como já descrito anteriormente, as cinzas de fundo são resíduos sólidos gerados a partir da combustão de carvão pulverizado, de granulometria maior que as cinzas volantes. Rohde *et al.* (2006), define as cinzas de fundo mais detalhadamente, como uma mescla de materiais agregados e particulados, silicoaluminosos, de textura areno-siltosa, remanescentes da matéria mineral calcinada, nos processos de combustão de carvão pulverizado, em ambiente oxidante e de alta temperatura.

No processo de queima do carvão mineral, as cinzas de fundo, resíduos sólidos, são coletadas em um recipiente preenchido com água, posicionado embaixo da câmara de combustão. Quando é atingida uma quantidade suficiente de cinza pesada no recipiente, com o auxílio de um jato de água de alta pressão, é retirado e conduzido por canal de limpeza para tanques de disposição ou bacias de decantação para a diminuição da elevada umidade. (NARDI,1998 apud FARIAS, 2005)

Assim como as cinzas volantes, as propriedades físico-químicas da cinza de fundo variam com a composição do carvão, do grau de moagem adotado no beneficiamento na pré-queima e, também, do sistema de extração e transporte da cinza após a queima. (GOETHE, 1990)

As cinzas de fundo não possuem a mesma vasta reutilização das cinzas volantes, talvez por este motivo, ainda não são conhecidas normas e regulamentações

que regularizem e forneçam diretrizes para seu uso em diversos fins. Segundo Rohde (2006), estas cinzas podem ser definidas por materiais pozolânicos, embora ainda não reconhecidas pela NBR 12653:1999, ou pela mais difundida ASTM 618C. Este autor baseia seu argumento nas recentes pesquisas que comprovam o comportamento pozolânico das cinzas de fundo. Nessas pesquisas, em temperaturas ambiente, em menor grau que as cinzas volantes, as cinzas de fundo apresentam a capacidade de reação com a cal, em presença de água, para formar compostos com propriedades cimentantes.

Quanto a composição química das cinzas de fundo, são constituídas predominantemente de silicatos e aluminatos amorfos, com valores de sílica superiores a 60%. Dado que a composição química depende diretamente da fonte de carvão do qual a cinza foi gerada, o Federal Highway Administration (1998) relata que as cinzas derivadas de linhitas ou carvões sub-betuminosos têm uma percentagem maior de cálcio do que as cinzas derivadas de antracito ou carvão betuminoso.

A variação da granulometria das cinzas de fundo é grande, entretanto, na maioria dos casos, revelam características granulares, com grande parte dos grãos da fração areia e silte e baixos teores de argila, além de serem materiais não plásticos e não coesivos. Do ponto de vista mineralógico, essa cinza é constituída por uma fase vítrea silico-aluminosa e associada a carbono na fase amorfa. Quanto as características morfológicas são apresentadas quatro tipos principais: partículas transparentes arredondadas e irregulares, partículas opacas angulosas a subangulosas e, finalmente, de forma esféricas. (ROHDE, 2006).

É importante ressaltar que no Brasil, a principal utilização das cinzas originadas da combustão do carvão mineral ocorre na substituição de parte do clínquer portland por cinza volante na fabricação do Cimento Portland Pozolânico. E que, atualmente, 100% das cinzas volantes provenientes do Complexo Termelétrico de Jorge Lacerda – origem das cinzas do presente estudo – é consumido pela indústria do cimento.

### **Solo-Cinza Volante**

A estabilização de solos com cinza volante, como já citado anteriormente, em misturas de solo-cinza-cal, teve suas primeiras aplicações nas décadas de 1920 e 1930, conforme Rohde *et al.* (2006).

A adição de cinza volante a solos que inicialmente não seria adequada a estabilização com cal, foi idealizada primeiramente por Herrin & Mitchell (1961 apud ROSA, 2009), segundo estes autores, a adição de material pozolânico como as cinzas volantes, auxiliavam nos níveis de reação com a cal, quando no solo não existia, originalmente, a quantidade desejada de pozolana. De acordo com Nardi (1975), a estabilização pozolânica provém da reação entre a cinza-volante e cal, formando um composto que possui propriedades cimentantes.

Nardi (1975) afirmou que os processos clássicos de estabilização de solos são normalmente de difícil aplicação a solos mal graduados e uniformes, desprovidos de finos, dado que a uniformidade das partículas do solo dificulta a cimentação, devido ao maior volume de vazios e o menor número de contatos entre os grãos de solo. Rosa (2009), seguindo o mesmo raciocínio, diz que solos arenosos, com escassez de argila coloidal, não reagem satisfatoriamente à cal, e que a adição de cinza volante pode torná-los reativos à esta, substituindo a fração fina do solo, argila.

Segundo Mateos (1961, apud ROSA 2009), as reações que ocorrem na mistura solo, cinza volante, cal e água são de natureza complexa, no fenômeno físico-químico envolvido, parte da cal combina-se com as partículas de solo e outra parte com o dióxido de carbono presente na fase água e ar do solo, e ainda a terceira parte,

remanescente, combina-se com a cinza volante, originando a reação de natureza pozolânica.

A energia de moldagem dos corpos de prova de misturas solo-cinza volante-cal também pode ser um fator influente na ocorrência de reações pozolânicas, Mallmann (1996, apud ROSA, 2009) observou que o aumento desta energia gerava um acréscimo na resistência, provavelmente devido a maior número de reações pozolânicas desenvolvidas com a aproximação das partículas, ocasionada pelo aumento da energia.

O tempo de cura, a temperatura ambiente ( $\pm 21^{\circ}\text{C}$ ) pode ser considerado o principal fator influente na resistência à compressão simples, como mostrado por estudos realizados por análise de variância. As variações de temperatura, como citado anteriormente, afetam diretamente as reações pozolânicas, sabe-se que tais reações cessam a temperaturas inferiores a  $7^{\circ}\text{C}$ , e que são aceleradas a temperaturas elevadas. De forma que, Nardi (1975) sugeriu a realização da cura a altas temperaturas para verificar a resistência potencial de misturas pozolânicas com maior eficiência.

Kaniraj & Havanji (1996) relatam que com o aumento do teor de cinza volante presente na mistura solo-cinza volante-cal hidratada observa-se uma redução do peso específico máximo aparente seco e aumento da umidade ótima, para uma mesma energia de compactação. (e.g. CERATTI, 1979) Ainda segundo estes autores, o aumento da quantidade de cinza volante na mistura, também, implica na redução do peso específico real dos grãos das misturas. E que corpos de prova compactados na condição de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo, apresentam para uma determinada energia de compactação, aumento da porosidade e do índice de vazios, para teores crescentes de cinza volante. O que na opinião destes estudiosos, poderia tornar interessante a utilização de cinza volante para processos de estabilização na construção de aterros, principalmente em solos moles.

### **Solo-Cinza de Fundo**

A estabilização de solos com a cinza pesada é mais recente e menos usual que misturas com cinzas volantes. Todavia, recentemente, muitos estudos foram desenvolvidos com a finalidade de analisar as características e propriedades das misturas de solo-cinza pesada com ou sem a adição de cal, como por exemplo: Leandro (2005), Farias (2005), Nunes *et al.* (1996) Schroeder (1994), dentre outros.

As cinzas pesadas são, reconhecidamente, materiais com menor atividade pozolânica que as cinzas volantes. Segundo Dawson *et al.* (1991, apud FARIAS, 2005) o poder cimentante das cinzas de fundo está relacionado com o tipo e quantidade de carbonatos presentes em sua composição química, sendo que em virtude dos baixos percentuais de óxido de cálcio pode-se esperar limitações no desenvolvimento de reações autocimentantes. Este fato pode ser interpretado como uma justificativa para as cinzas pesadas ainda não possuírem um grande índice de reaproveitamento no Brasil e no mundo. Atualmente, a maioria das cinzas de fundo produzidas nas usinas termelétricas é depositada nas bacias de decantação, diferentemente das cinzas volantes, em que grande parte, ou até sua totalidade são vendidas como matéria-prima para outras indústrias.

Farias (2005) assegura que a utilização destas cinzas na engenharia rodoviária é uma realidade há muitos anos em países como no Reino Unido e nos Estados Unidos.

### **Programa Experimental**

Ambas as cinzas, volante e de fundo (Figuras 6 e 7) são provenientes do processo de queima do carvão mineral, originárias do Complexo Termelétrico Jorge

Lacerda, localizado no município de Capivari de Baixo, no Estado de Santa Catarina (Figura 5). Ambas as cinzas foram encaminhadas por intermédio da SATC – Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina, em tonéis para o Laboratório de Geotecnia da PUC-Rio, no Rio de Janeiro, para a realização dos ensaios.

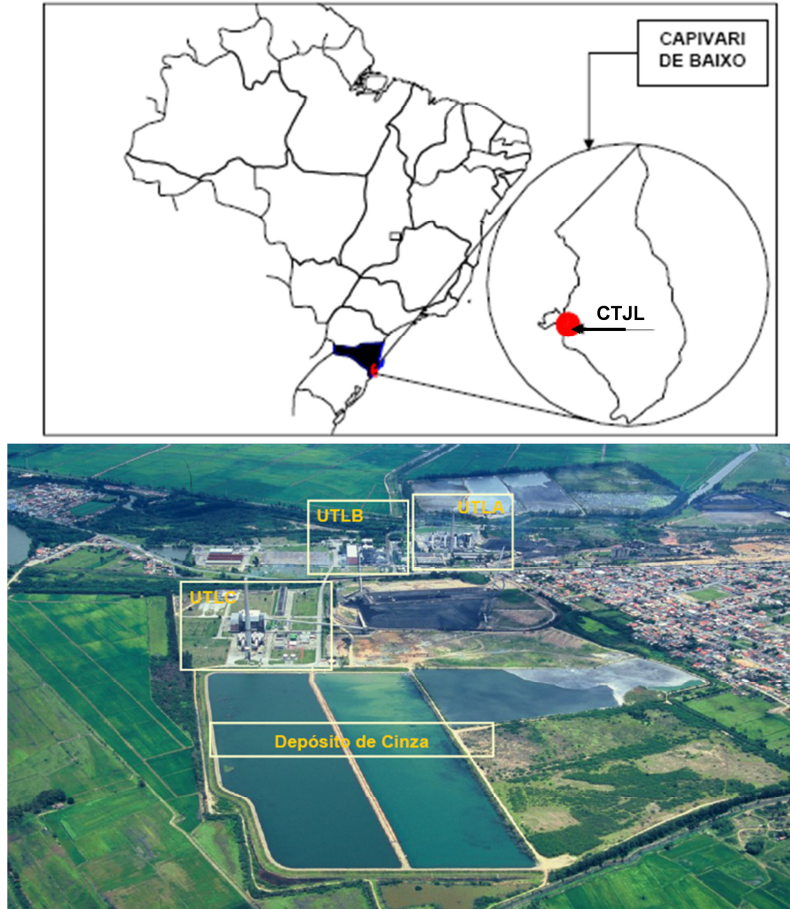


Figura 5. Localização do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda (Fonte: Leandro, 2005)



Figura 6. Cinza de Fundo (Fonte: Lopes, 2011)



Figura 7. Cinza Volante (Fonte: Lopes, 2011)

O Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, atualmente é considerado o maior complexo termelétrico movido a carvão mineral da América Latina. Pertence à Companhia Tractebel Energia, que por sua vez, faz parte do Grupo Franco-Belga GDF-Suez. O complexo é composto por três usinas termelétricas (A, B e C) com capacidade de produção instalada de 857 Megawatts. As usinas utilizam o carvão mineral do tipo CE 4500, conforme classificação da Portaria 100/87 do Conselho Nacional do Petróleo, publicado no Diário Oficial da União em 1º de Abril de 1987, com baixo teor calorífico, e conseqüentemente alto teor de cinzas. As especificações do carvão mineral utilizado, CE 4500, podem ser verificadas no Quadro 2.

Características	CE 6000	CE 5900	CE 5200	CE 4700	CE 4500	CE 4200	CE 3700	CE 3300	CE 3100
<b>Poder Calorífico Superior Mínimo Base Seca (Kcal/Kg)</b>	5700	5900	5200	4700	4500	4200	3700	3150	2950
<b>Granulometria (mm)</b>	35X0	50X0	(*)	50X0	(*)	50X0	50X0	50X0	75X0
<b>Umidade Máxima Total (%)</b>	15	20	10	19	10	19	15	17	15
<b>Conteúdo Máximo de Cinza (%)</b>	25	22	35	35	43	40	47	54	57
<b>Conteúdo Máximo de Enxofre (%)</b>	6,5	1,5	2,5	1,5	3,5	1,5	1,5	1,5	1,0
<b>Índice de Inchamento (FSI)</b>	-	-	<2	-	<2	-	-	-	-

Quadro 2. Especificações dos Carvões Energéticos Brasileiros. (Fonte: Portaria 100/1987 – CNP apud POZZOBON, 1999)

Como apresentado os principais componentes das cinzas, tanto de fundo quanto volante, são o silício, alumínio e ferro, o que também foi analisado nos estudos de Ubaldo (2005). A representatividade destes elementos foi mantida nas misturas estudadas, de onde pode se concluir que tais elementos químicos também devem estar presentes em grande quantidade no solo utilizado. Rezende (1999, apud VIZCARRA, 2010) afirmou que os componentes principais do solo são  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e participantes ativos do processo de estabilização.

Para realização desse trabalho utilizou-se o solo coluvionar proveniente da área experimental da PUC-Rio (Figura 8). As características do solo, que serão apresentadas a seguir, foram obtidas através de ensaios realizados no laboratório de geotecnia da PUC-Rio em Março de 2011.

Concluiu-se que o solo ensaiado é uma argila silto-arenosa. Os resultados obtidos da granulometria e da curva de sedimentação mostraram que o tamanho de grão principal é menor do que 0,0418mm (conforme diâmetros alcançados  $D_{10}=0,0002\text{mm}$ ,  $D_{15}=0,0003\text{mm}$ ,  $D_{30}=0,0007\text{mm}$ ,  $D_{50}=0,0011\text{mm}$ ,  $D_{60}=0,0418\text{mm}$  e  $D_{85}=0,3852\text{mm}$ ), confirmando que o solo é uma argila, com frações de silte e areia.

A umidade natural encontrada foi de 1,09% e a densidade seca do solo de 2.651 g/cm<sup>3</sup>. Os limites de plasticidade e de liquidez encontrados foram 39% e 53%, respectivamente. Com isso, o solo pode ser classificado como uma argila silto-arenosa medianamente plástica e dura, com valores de  $\text{IP} = 14$  e  $\text{IC} = 3,71$ ; valores esses que descrevem essa argila como sendo uma caulinita.

A energia de compactação usada no ensaio foi de 5,97 kg-cm/cm<sup>3</sup>. O resultado mostrado através da curva de compactação do Proctor normal, feito para umidades entre 19% e 30%, é um ponto máximo de densidade específica de 1,55 g/cm<sup>3</sup>. A umidade ótima calculada neste ponto foi de 24,7%.



Figura 8. Solo sendo preparado para o ensaio de compactação.

Foram montados microcosmos com 1500 g de solo deformado: (i) com 5% de cinzas volantes (V), (ii) com 5% de cinzas de fundo (F) e (iii) microcosmos com solo sem tratamento constituíram o controle (C). Os microcosmos foram mantidos à temperatura constante, cobertos de maneira a evitar contaminação do solo, permitindo, porém, trocas gasosas, evaporação de água inclusive. Determinou-se a atividade microbiana por hidrólise de FDA (diacetado de fluoresceína), onde o método utilizado foi baseado numa modificação feita por Adam e Duncan (2001). Determinou-se também o teor de carbono oxidado por permanganato de potássio, e ainda a incorporação de leucina pela comunidade bacteriana do solo. Essas análises

permitiram uma avaliação sobre como a adição dessas cinzas afeta a atividade microbiana do solo.

A estrutura e atividade das comunidades microbianas refletem a interação dinâmica entre a microbiota e o ambiente que ela habita. Avaliar seu estado metabólico permite monitorar processos de biodegradação (Zwolinski, 2000). A atividade degradadora microbiana total foi quantificada a partir da medição da hidrólise de diacetato de fluoresceína (FDA) realizada pelos micro-organismos do solo. O método utilizado foi baseado numa modificação feita por Adam e Duncan (2001) e Green et al. (2006) em uma metodologia desenvolvida por Schnurer e Rosswall (1982).

A hidrólise de FDA é amplamente aceita como um método enzimático para medir todas as atividades microbianas, seja de populações cultiváveis ou não cultiváveis, em uma grande variedade de amostras ambientais, visto que enzimas extracelulares como esterases, lipases e proteases, que são abundantes em solos e estão envolvidas na decomposição de muitos tipos de tecidos, possuem a capacidade de catalisar a hidrólise de FDA. Além disso, o método costuma correlacionar-se bem com algumas das mais precisas medições de biomassa e incorporação de carbono, além de ser mais rápido, preciso, simples de se processar e reproduzível. A habilidade de hidrolisar FDA mostra-se muito difundida, especialmente entre os maiores decompositores, bactérias e fungos (Adam & Duncan, 2001; Brohon et al., 2001; Green et al., 2006).

Algumas modificações foram adotadas mediante dados obtidos com testes diversos:

- O solo não é peneirado nem macerado, a menos que realmente necessário. Retirar manualmente raízes, pedregulhos e outros elementos maiores, deixando somente o solo.
- A incubação é feita em estufa sem qualquer agitação. Os testes mostraram que a agitação diminui a hidrólise de FDA, o que vai ao encontro dos testes de Green et al (2006). Assim sendo, não é necessária a utilização de lerlenmeyers, a incubação pode ser feita diretamente nos tubos falcon que servirão para centrifugação.
- A temperatura de incubação pode ser feita na temperatura na qual se encontravam as amostras. A temperatura de 30°C corresponde ao máximo de hidrólise observado por Adam e Duncan, ou seja, traduz o potencial degradador da amostra.
- O filtrado é recolhido diretamente em provetas graduadas, permitindo a medida direta do volume filtrado.

Foram montados microcosmos com 1500 g de solo deformado: com 5% de cinzas volantes (V), com 5% de cinzas de fundo (F); microcosmos com solo sem tratamento constituíram o controle (C). Os microcosmos foram mantidos a temperatura constante, cobertos de maneira a evitar contaminação do solo, permitindo, porém, trocas gasosas, evaporação de água inclusive. O monitoramento se fez por análise do potencial microbiano de degradação, (medidas de hidrólise de diacetato de fluoresceína) (Adan e Duncan, 2001); da síntese de carbono microbiano (incorporação de leucina tritiada) (Miranda et al., 2007); das variações de carbono disponível (determinação de carbono oxidável por permanganato de potássio) (Tirol-Padre e Ladha, 2004), assim como de pH e de teor de umidade do solo.

## Resultados

A adição de 5% de cinzas não alterou significativamente o pH do solo. O teor de umidade apresentou pouca alteração (Figura 9), mas se manteve por mais tempo nos solos V.

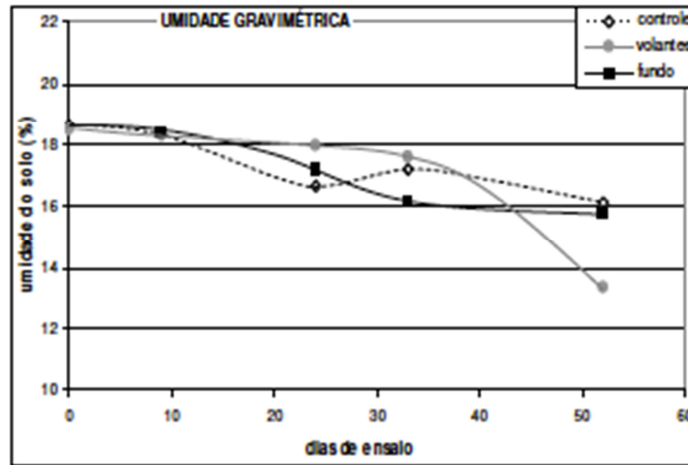


Figura 9. Umidade gravimétrica nos solos durante o ensaio (%).

A presença de cinzas pesadas não causou alteração na atividade degradadora do solo F (Figura 10), esse solo tendo acompanhado o comportamento do solo C ao longo do ensaio. Uma queda na atividade nas primeiras semanas de ensaio pode ter sido causada pelas novas condições impostas ao solo para o ensaio, tendo sido observada uma recuperação gradativa dos níveis de atividade. No entanto, a duração do ensaio não permitiu verificar se a microbiota recuperaria seu nível inicial de atividade. O solo V acusou impacto na atividade degradadora da microbiota com o tratamento, como já descrito, essa atividade permanecendo estável durante o ensaio; um aumento observado na última amostragem poderia ser indicador da recuperação da atividade; contudo, será necessário um ensaio mais longo para confirmar essa tendência.

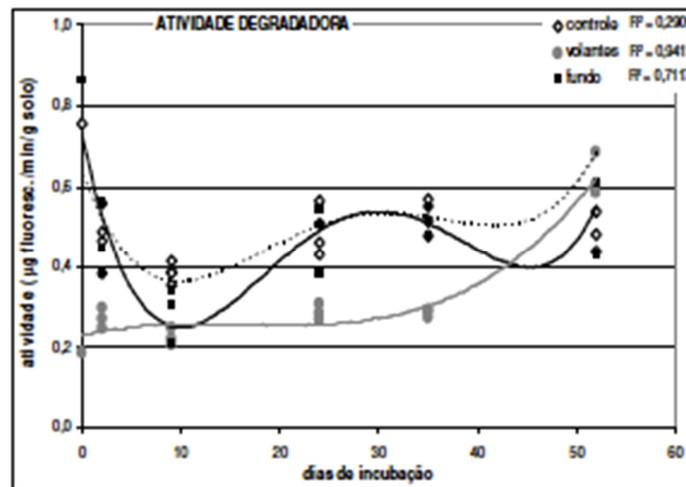


Figura 10. Atividade degradadora microbiana ao longo do ensaio ( $\mu\text{g fluoresceína} \times \text{g}^{-1} \text{ solo} \times \text{min}^{-1}$ )

A atividade de síntese proteica (Figura 11) do solo C se manteve estável ao longo do ensaio, sem aparentes alterações ligadas às oscilações na atividade degradadora. Os solos com cinzas acusaram, ao contrário, grande aumento na produção de biomassa, rápido no solo V com retorno ao valor inicial na última amostragem, o que pode estar ligado à importante queda de umidade observada nesse solo no final do ensaio (de 18,5% a 13%). Já o solo F apresentou queda inicial na protéica seguida de estímulo acentuado, os níveis permanecendo elevados até o final do ensaio.

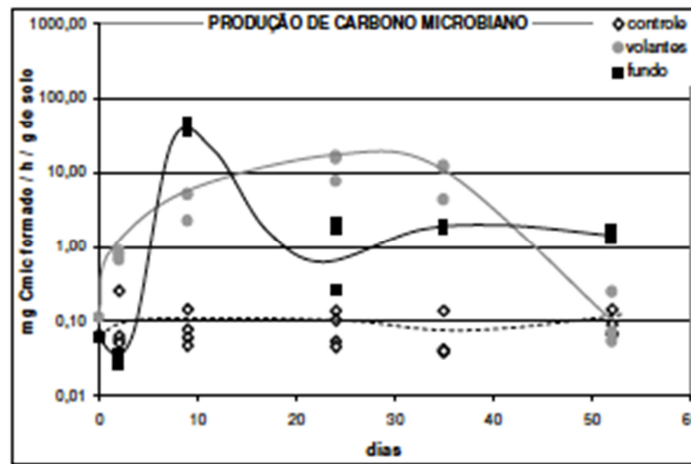


Figura 11. Produção de carbono microbiano durante o ensaio ( $\text{pg } [^3\text{H}] \text{leu incorporada} \times \text{g}^{-1} \text{ solo} \times \text{min}^{-1}$ )

A disponibilidade do carbono parece ligada à atividade degradadora, mas é também devida à desestruturação e manipulação do solo, esta última sendo maior nos solos tratados (Figura 12). O carbono disponível baixo no solo C possivelmente corresponde ao impacto observado na atividade degradadora acoplado ao aumento da biomassa, que utiliza o carbono disponível; a volta aos níveis iniciais no final do ensaio corresponde ao aumento na atividade observado no mesmo período em todos os solos.

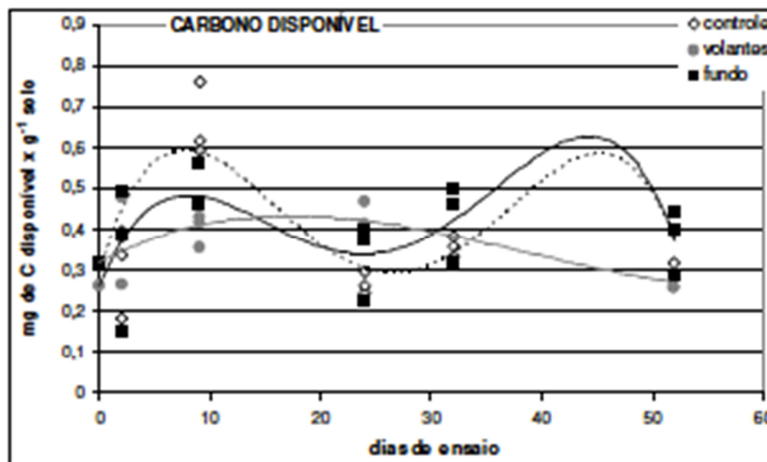


Figura 12. Carbono disponível durante o ensaio ( $\text{mg de Cdisp} / \text{g de solo}$ )

A adição de cinzas não alterou significativamente a riqueza de espécies da microbiota, enquanto a resposta metabólica da comunidade apresentou oscilações importantes no solo controle unicamente, sendo estabilizada nos solos tratados.

## Conclusões

A adição de 5% de cinzas não alterou significativamente composição e atividade da microbiota, parecendo, portanto, adequada para fins de engenharia no solo estudado. Seu uso na agricultura também aparece como promissor, tendo em vista o aumento de biomassa observado, necessitando, no entanto, de maiores investigações para as cinzas volantes e teores de cinza a serem adicionados ao solo.

## Referências

ADAM, G. & DUNCAN, H. *Development of a sensitive and rapid method for the measurement of total microbial activity using fluorescein diacetate (FDA) in a range of soils*. Soil Biol. Biochem. 33:943-951. 2001.

CERATTI, J.A.P. *Efeitos da adição de cal e cinza volante nas propriedades de um solo residual compactado*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1979.

FARIAS, E.R. *A utilização de Misturas Solos/Cinza Pesada na Pavimentação – Análise de Aspectos de Comportamento Mecânico e Ambiental*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

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.

KANIRAJ, S.R.; HAVANGI, V. *Fly ash and fly-ash soil mixtures for embankment construction*. Environmental Geotechnics – Osaka, 1996.

LEANDRO, R.P. *Estudo laboratorial acerca da possibilidade de aproveitamento da cinza pesada de termelétrica em base e sub-base de pavimentos flexíveis*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

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

Miranda, MR, Guimarães JRD, Coelho-Souza AS. *[3H]leucine incorporation method as a tool to measure secondary production by periphytic bacteria associated to the roots of floating aquatic macrophytes*. Journal of Microbiological Methods 71/1: 23-31. 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.

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.

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.

SINGH, R.P., GUPTA, A.K., IBRAHIM, M.H. & MITTALI, A.K. *Coal fly ash utilization in agriculture: its potential benefits and risks*. Rev. Environ. Sci. Biotechnol. 9, 345-358. 2010.

Tirol-Padre, A. & Ladha, J. K. *Assessing the Reliability of Permanganate-Oxidizable Carbon as an Index of Soil Labile Carbon*. Soil Sci. Soc. Am. J. 68:969–978. VIEGAS 77. 2004

VIZCARRA, G.O.C. *Aplicabilidade de cinzas de resíduos sólidos urbanos em camadas de bases de pavimentos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2010.