

APLICABILIDADE DE RESÍDUOS E REJEITOS AMBIENTAIS PARA APROVEITAMENTO EM PAVIMENTAÇÃO

(Caracterização Física e Química de Misturas Solo-Cinza de Carvão Mineral)

Aluna: Priscila Vargas de Oliveira
Orientadora: Michéle Dal Toé Casagrande
Co-Orientadora: Louise dos Santos Erasmi Lopes

Introdução

O crescimento das usinas termelétricas e o aumento do consumo anual de carvão mineral como combustível em todo o mundo tem ligação direta com os grandes volumes de cinzas de carvão gerados. Tal fato, em conjunto com os custos de estocagem e as preocupações ambientais referentes ao descarte destes resíduos, têm incentivado formas alternativas de gestão dos resíduos e aplicações diversas, tais como em concretos e argamassa, na fabricação do cimento Portland pozolânico, em bases estabilizadas e solos modificados para rodovias, pistas e edificações e ainda como filler em misturas betuminosas.

O aproveitamento das cinzas em pavimentação pode ser benéfico, tanto para a indústria que gera este resíduo como para a indústria de construção civil, como alternativa ao uso de estabilizantes convencionais para solos, tais como cal, cimento ou outros, e vem sendo feito há muitos anos pelo mundo. Este aproveitamento também está associado à outras diversas motivações, tais como a redução dos custos com a extração e o transporte de agregados convencionais e do impacto ambiental causado pela construção das bacias de sedimentação, a preservação de jazidas de materiais naturais, além de estar intimamente ligado a difusão do emprego do carvão como combustível.

Diante dos elevados custos e riscos inerentes ao correto condicionamento das cinzas e da necessidade de proteção ambiental, torna-se viável o uso de técnicas e materiais alternativos para pavimentação que consome volumes consideráveis de material. Em obras de pavimentação rodoviária sobre solos ruins, é viável remover o material existente no local e substituí-lo por outro com características adequadas, ou melhorar as propriedades do solo existente, de modo a criar um novo material com características de resistência e deformabilidade adequadas para sua utilização na Engenharia Geotécnica.

Para a concepção de novos materiais é importante o conhecimento das propriedades mecânicas, físicas e químicas dos materiais de constituição, bem como suas possíveis combinações. Quanto ao entendimento do comportamento mecânico da mistura, é de grande relevância que se conheça o mecanismo de estabilização, o qual depende de vários fatores relacionados com o solo e as cinzas, tais como granulometria, teor de umidade, densidade e composição química.

Dentro deste contexto, a motivação do presente trabalho foi a busca por melhor interpretação e compreensão do comportamento do solo misturado com as cinzas de carvão mineral, podendo potencializar a sua utilização em obras de pavimentação rodoviária, estabelecendo um fim mais nobre a este material, antes descartado na natureza.

Objetivo

O objetivo principal foi avaliar o potencial de utilização das cinzas de carvão mineral, volante e pesada, provenientes do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, em misturas com um solo regional, com e sem a adição de cal, para aplicação em base e sub-base de pavimentos rodoviários. Destaca-se, dentre os objetivos específicos, concluir se há viabilidade técnica e ambiental de tal aplicação para uma ou mais misturas estudadas. Este objetivo foi alcançado através da avaliação do comportamento físico, químico e mecânico de algumas misturas, levando em consideração a viabilidade ambiental, e estabelecendo padrões de

comportamento capazes de medir a influência da adição de cinzas e cal, relacionando-a com os parâmetros de deformabilidade do solo.

Programa Experimental

O programa de ensaios estabelecido teve como objetivo principal investigar e identificar o efeito da adição de cinzas de carvão mineral nas propriedades mecânicas de um solo regional. O estudo do comportamento mecânico dos materiais foi realizado através de ensaios de laboratório, sendo objeto de pesquisa de outro projeto de Iniciação Científica.

Nos ensaios, foram utilizados quatro tipos de materiais distintos: solo (Figura 2), cinza de fundo (Figura 3), cinza volante (Figura 4) e cal, bem como as misturas decorrentes destes materiais com diferentes teores de cinza, com e sem adição de cal. O solo é proveniente de uma jazida localizada no bairro de Campo Grande - RJ. A coleta foi feita no mês de Maio de 2010, em profundidade aproximada de 2 m em relação ao topo (horizonte A). A cinza volante e a cinza de fundo são derivadas da queima de carvão mineral do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, localizado no município catarinense de Capivari de Baixo, região do território brasileiro que concentra a exploração de carvão mineral. A incineração e coleta das cinzas foram realizadas no primeiro semestre de 2010.

A cal utilizada nas misturas é cal hidratada calcítica, do tipo CH-III, conhecida comercialmente por “Cal Hidratada Itaú”, da Votorantim Cimentos, e no presente estudo será dada ênfase a sua funcionalidade como agente cimentante e estabilizador de solos. A cal foi adquirida no mês de Junho de 2010 em saco de 20 kg.

O Complexo Termelétrico Jorge Lacerda possui o maior potencial termelétrico a carvão da América Latina, pertencendo ao Grupo Tractebel Energia, a maior geradora privada de energia do Brasil, e é composto por três usinas (A, B, C) do tipo convencional que utilizam o carvão mineral do tipo CE 4500, com baixo poder calorífico (4.500 kcal/kg), e conseqüentemente, alto teor de cinzas (43%), como combustível para geração de energia. Em funcionamento desde 1943, gera 40% em peso de resíduos correspondentes à fração cinza, sendo 60% cinzas volantes e, 40% cinza de fundo, como esquema indicado na Figura 1. Atualmente, 100% das cinzas volantes provenientes do Complexo Termelétrico de Jorge Lacerda é consumido pela indústria do cimento.

As especificações do carvão mineral utilizado podem ser verificadas no Quadro 1, conforme Pozzobon (1999).

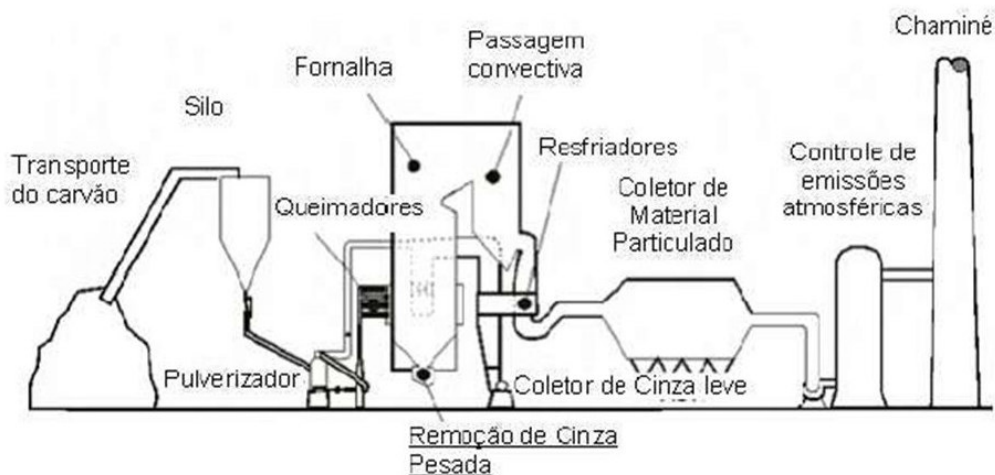


Figura 1 - Processo de Queima do Carvão Mineral em Usinas Termelétricas (Fonte: Farias, 2005)

Quadro 1 – Especificações dos Carvões Energéticos Brasileiros (Fonte: Portaria 100/1987 – CNP).

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

Na Tabela 1, encontra-se discriminada a produção média mensal de cinza proveniente da queima do carvão mineral correspondente a cada usina do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, valores estes sujeitos a alterações. De acordo com Pozzobon (1999), para cada 100 toneladas de carvão mineral consumidas no Complexo Termelétrico, são geradas 42 toneladas de cinza, das quais 70% de cinzas volantes, alocadas em silos e posteriormente vendidas para a indústria de cimento, e 30% de cinzas pesadas, destinadas às bacias de decantação.

A preparação do solo e das cinzas para os ensaios envolveu procedimentos como a secagem, em estufa a 60°C, para obtenção de maior homogeneidade em toda a amostra, destorroamento, peneiramento e determinação da umidade higroscópica. Em seguida os materiais foram armazenados em sacos plásticos devidamente fechados a fim de evitar grandes alterações de umidade e identificados para a realização dos ensaios. As misturas solo-cinza foram dosadas em peso de material. As siglas que descrevem os materiais utilizados estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 1 - Produção média mensal da cinza proveniente da queima do carvão mineral no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda

USINA TERMELÉTRICA	PRODUÇÃO MÉDIA DE CINZAS (t/mês)
Jorge Lacerda A	15.000
Jorge Lacerda B	22.000
Jorge Lacerda C	19.000



Figura 2 - Solo da jazida de Campo Grande/RJ (2010), após secagem e destorroamento.



Figura 3 - Cinza de Fundo de carvão mineral do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda (2010).



Figura 4 - Cinza de Fundo de carvão mineral do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda (2010).

Tabela 2 - Símbolos referentes a cada material.

Material/Mistura	Solo (%)	Cinza de Fundo (%)	Cinza Volante (%)	Cal (%)	Símbolo
Solo	100	-	-	-	S
Cinza de Fundo	-	100	-	-	CF
Cinza Volante	-	-	100	-	CV
Mistura 1	70	27	-	3	S70/CF27/C3
Mistura 2	60	37	-	3	S60/CF37/C3
Mistura 3	90	-	7	3	S90/CV7/C3
Mistura 4	80	-	17	3	S80/CV17/C3
Mistura 5	70	30	-	-	S70/CF30
Mistura 6	60	40	-	-	S60/CF40
Mistura 7	90	-	10	-	S90/CV10
Mistura 8	80	-	20	-	S80/CV20

O objetivo da realização deste programa experimental foi a caracterização do solo e do solo-cinza-cal, evidenciando os parâmetros que possam ser correlacionados com o real desempenho em camadas de pavimentos e, dessa forma, contribuir para o melhor conhecimento sobre o comportamento das misturas estudadas.

A seguir são apresentados os ensaios laboratoriais realizados para caracterização do solo e do solo-cinza-cal:

- Propriedades físicas e de classificação dos materiais:
 - Limites de Atterberg;
 - Massa Específica Real dos Grãos;
 - Análise granulométrica.
- Propriedades químicas:
 - Fluorescência de raio-X por energia dispersiva;
 - Determinação de matéria orgânica;
 - Solubilização;
 - Lixiviação.
- Propriedades mecânicas:
 - Compactação;
 - Módulo de Resiliência;
 - Deformação Permanente.

Propriedades físicas e de classificação dos materiais:

Para caracterização dos materiais, foram realizados ensaios de Limites de Atterberg, massa específica real dos grãos e análise granulométrica.

Os ensaios de composição química e teor de matéria orgânica foram realizados com o objetivo de caracterizar as amostras de solo, cinzas, além das misturas. Os ensaios de solubilização e lixiviação, segundo a Norma NBR 10006/2004 (ABNT, 2004) fornecem os resultados utilizados na classificação das cinzas, de acordo com as definições da Norma NBR 10004/2004 - Anexo G (ABNT, 2004) para resíduos sólidos.

Para determinar as propriedades-índice das cinzas volante e de fundo, das amostras de solo deformado e das misturas foram executados os ensaios de caracterização física. A preparação das cinzas e do material proveniente de amostras deformadas de solo foi feita conforme o procedimento da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio e no Laboratório de Geotecnia/Pavimentos da COPPE/UFRJ. No primeiro, foram feitos os ensaios de caracterização das cinzas volante e de fundo, seguindo os métodos estabelecidos pelas seguintes normas utilizadas:

- NBR 6457/1986 – Amostras de Solos – Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização;
- NBR 7181/1984 – Solo – Análise Granulométrica;
- NBR 6508/1984 – Solo – Determinação da Massa Específica dos Grãos;
- NBR 6459/1984 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez;
- NBR 7180/1984 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade.

A caracterização do solo e das misturas foi feita no Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COPPE/UFRJ, seguindo os mesmos procedimentos e normas, diferindo somente na determinação da Massa Específica dos Grãos, para o qual foi adotado o procedimento da norma DNER-ME 093/94, similares aos indicados na NBR 6508/1984 (ABNT,1984).

Visando caracterizar a interação do solo com a água, os ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade foram realizados segundo a NBR 6459/1984 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez e a NBR 7180/1984 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade.

Através dos dados obtidos destes ensaios, foi determinado o Índice de plasticidade (IP), obtido através da diferença entre o limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP), conforme a equação $IP(\%) = LL(\%) - LP(\%)$.

A determinação da massa específica dos grãos das cinzas volante e de fundo foi feita no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio, de acordo com os procedimentos das NBR 6508/1984 (ABNT, 1984). Os ensaios com o solo e as misturas foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COPPE/UFRJ, adotando-se os procedimentos da DNER-ME 093/1994 (DNER,1994). Após os procedimentos para a preparação das amostras, foi separado 10g de material para a realização do ensaio. Inicialmente, foram obtidos os pesos do picnômetro vazio (P_1) e do picnômetro com a amostra em seu interior (P_2), foi realizada a deaeração da mistura através do aquecimento do recipiente, e posterior resfriamento do mesmo à temperatura ambiente. O picnômetro foi preenchido com água destilada e fechado, obtendo-se o terceiro peso, picnômetro com a amostra e água (P_3). Em seguida, todo o material foi retirado do interior do equipamento, que foi lavado e a seguir encheu-se o picnômetro completamente com água destilada, para, enfim, obter-se o último peso (P_4). A partir destas medidas, foi possível determinar a massa específica dos grãos, utilizando-se as seguintes equações:

$$D_t = \frac{P_2 - P_1}{(P_4 - P_1) - (P_3 - P_2)} \quad G_s = D_t \times k_{24}$$

Onde:

D_t = densidade real dos grãos a temperatura t

k_{24} = razão entre a densidade relativa da água a temperatura t e a 20°C , tabelada na norma

G_s = massa específica real dos grãos

A análise granulométrica foi realizada conforme a NBR 7181/1984 (ABNT, 1984). Visto que o solo em estudo é constituído de fração grossa e fina, este ensaio foi realizado por granulometria conjunta, isto é, peneiramento e sedimentação, tendo sido utilizado, nesta última, o defloculante (hexametáfosfato de sódio), no Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COPPE/UFRJ.

O ensaio de sedimentação foi executado com 50g de solo previamente seco em estufa colocado em 125 ml de defloculante (hexametáfosfato de sódio). Esse material ficou em repouso por 24 horas e então foi submetido à dispersão mecânica. Em seguida foi colocado em uma proveta de 1000ml onde o restante do volume foi completado com água destilada para então serem realizadas as devidas leituras. Após as leituras o material foi colocado na peneira 0,075mm (#200) e submetido ao processo de lavagem com movimentos circulares e suaves. Por último, foi levado à estufa para secagem e pesagem.

Visto que uma das principais propostas deste trabalho é a reutilização de resíduos, é importante a execução de ensaios químicos e ambientais para determinação de compostos, perigosos ou não, para verificar a viabilidade da utilização das cinzas quando misturado ao solo, sem prejudicar o meio ambiente ou a saúde humana.

Propriedades Químicas:

A composição química das amostras de cinzas foi obtida mediante a técnica de “*Espectrometria de fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva (EDX)*”. As amostras foram submetidas à análise por EDX em um Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva, modelo EDX-720, marca Shimadzu no Laboratório de Química da PUC-Rio.

O Espectrômetro de fluorescência de raios-X é um instrumento que determina qualitativamente e semi-quantitativamente os elementos presentes em uma determinada amostra. Isto é possível através da aplicação de raios-X na superfície da amostra e a posterior análise dos fluorescentes raios-X emitidos. É uma técnica não-destrutiva para todos os tipos de amostras, incluindo sólidos, líquidos ou pós, sendo por esta razão interessante para a caracterização dos materiais.

Na determinação do teor de matéria orgânica das misturas solo-cinzas-cal, os ensaios foram feitos no Laboratório de Geotecnia da PUC-Rio, seguindo a Norma ABNT NBR 13600/1996 – Solo – Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C , de acordo com o seguinte procedimento:

- i) Pesa-se o cadinho. (Massa da tara);
- ii) Coloca-se uma quantidade aleatória de amostra em cada cadinho e determina-se a massa do conjunto (Massa da tara + solo + água + M.O.);
- iii) Coloca-se o cadinho na estufa (temperatura entre 105°C e 110°C) pra tirar umidade da amostra, por 24h;
- iv) Após as 24 horas, pesa-se o conjunto novamente (Massa da Tara + solo + M.O.);
- v) Em seguida, coloca-se o cadinho na mufla, à 440°C , por 12h para ocorrer a queima total da matéria orgânica;
- vi) Após as 12 horas pesa-se novamente o cadinho (Massa da tara + solo);
- vii) Para calcular o teor de matéria orgânica, utiliza-se a equação

$$MO = \left(1 - \frac{B}{A}\right) \times 100$$

Onde:

MO = teor de matéria orgânica

A = Massa da amostra seca em estufa, à temperatura de 105°C a 110°C (g)

B = Massa da amostra queimada em mufla, à temperatura de 440°C (g)

Os ensaios de solubilização e lixiviação foram realizados pelo laboratório TASQA Serviços Analíticos Ltda.. O primeiro foi realizado segundo as Normas NBR 10006/2004 (ABNT, 2004), com a finalidade de classificar o resíduo, com base na listagem da Norma NBR 10004/2004 – anexo G (ABNT, 2004), que fornece os valores máximos permitidos para extratos solubilizados. Portanto, quando a análise dos elementos químicos do extrato solubilizado apresenta algum valor superior ao da referida listagem, o resíduo é classificado como não inerte. Caso contrário, este é classificado como resíduo inerte de acordo com as definições apresentadas na norma NBR 10004/2004 para resíduos sólidos.

O ensaio de lixiviação foi realizado segundo a Norma NBR 10005/2004 (ABNT, 2004).

Propriedades Mecânicas:

As Propriedades mecânicas são objeto de pesquisa de outro projeto de Iniciação Científica, e, portanto, não serão abordadas neste relatório.

Resultados e Discussões

São apresentados os resultados e as análises dos ensaios descritos anteriormente, para as amostras de solo, cinza volante, cinza de fundo e misturas estudadas. Como o objetivo era avaliar as cinzas de carvão mineral quanto ao potencial de uso como um aditivo para aplicação em base de pavimentos, as amostras de cinza de fundo e cinza volante foram caracterizadas a partir de ensaios geotécnicos, químicos e ambientais. Esses ensaios tiveram por objetivo uma melhor compreensão do comportamento do material em estudo.

Em todos os materiais estudados não foi possível a determinação dos Limites de Atterberg, devido ao alto teor de material granular em suas composições granulométricas e a ausência de características plásticas para realização dos ensaios. Portanto, as cinzas, de fundo e volante, solo e todas as misturas foram classificadas como materiais não-plásticos.

Os resultados de massa específica dos grãos obtidos para o solo, cinzas de fundo e volante, e as misturas solo-cinzas-cal, encontram-se listados nas Tabelas 3 e 4, e Figuras 4 e 5. Os resultados indicam que tanto na adição de cinzas de fundo, quanto na de cinza volante há uma queda progressiva no valor de Gs, quanto maiores os teores de cinza, sendo mais representativa no caso das cinzas de fundo, talvez pelo maior teor de cinzas acrescentado às misturas nestes casos.

Tabela 3 – Resultados do ensaio de massa específica dos grãos para o solo, cinza de fundo e misturas.

Amostra	Teor de cinza (%)	Massa Específica dos Grãos (%)
S	-	2,772
CF	100	1,988
S70/CF27/C3	27	2,526
S60/CF37/C3	37	2,411
S70/CF30	30	2,445
S60/CF40	40	2,370

Tabela 4 – Resultados do ensaio de massa específica dos grãos para o solo, cinza volante e misturas.

Amostra	Teor de cinza (%)	Massa Específica dos Grãos (%)
S	-	2,772
CV	100	2,105
S90/CV7/C3	7	2,688
S80/CV17/C3	17	2,603
S90/CV10	10	2,632
S80/CV20	20	2,578

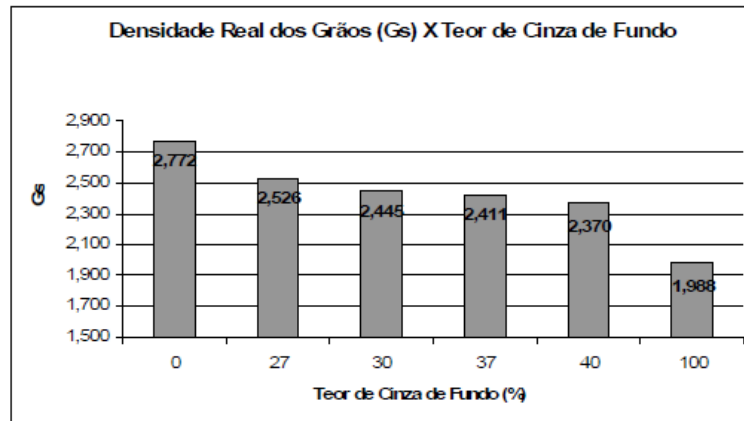


Figura 4 – Variação da Massa Específica dos Grãos com o teor de cinza de fundo.

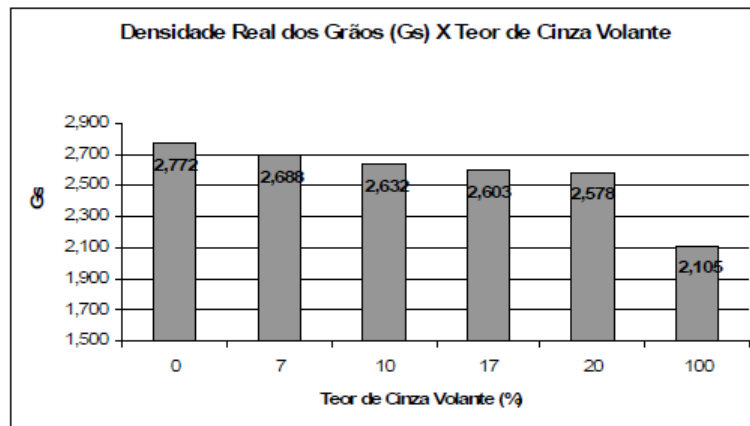


Figura 5 – Variação da Massa Específica dos Grãos com o teor de cinza volante.

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos, em percentual, no ensaio de análise granulométrica realizado no Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COPPE/UFRJ, para o solo puro, cinza de fundo e volante, além das misturas. As curvas granulométricas dos mesmos são apresentadas na Figura 6.

Tanto nas misturas solo-cinza de fundo, quanto nas misturas solo-cinza volante, a granulometria verificada possui maior presença de finos do que no solo puro, o que pode ser justificado pela granulometria das próprias cinzas, além da adição de cal, também caracterizada pela granulometria fina, nas misturas S70/CF27/C3, S60/CF37/C3, S90/CV7/C3 e S80/CV17/C3.

Tabela 5 – Resultados das análises granulométricas.

Amostra	Argila (%)	Silte (%)	Areia			Pedregulho (%)
			Fina (%)	Media (%)	Grossa (%)	
Solo	5	14	22	29	13	17
Cinza de Fundo	0	0	2,5	26,25	46,25	25
Cinza Volante	35	60	3,75	1,25	0	0
S70/CF27/C3	8	24	22	27	7	12
S60/CF37/C3	7	26	22	26	7	12
S90/CV7/C3	9	27	20	21	9	14
S80/CV17/C3	5	22	21	26	15	11
S70/CF30	4	17	24	32	13	10
S60/CF40	7	21	18	32	16	6
S90/CV10	5	18	17	31	15	14
S80/CV20	3	22	19	30	14	12

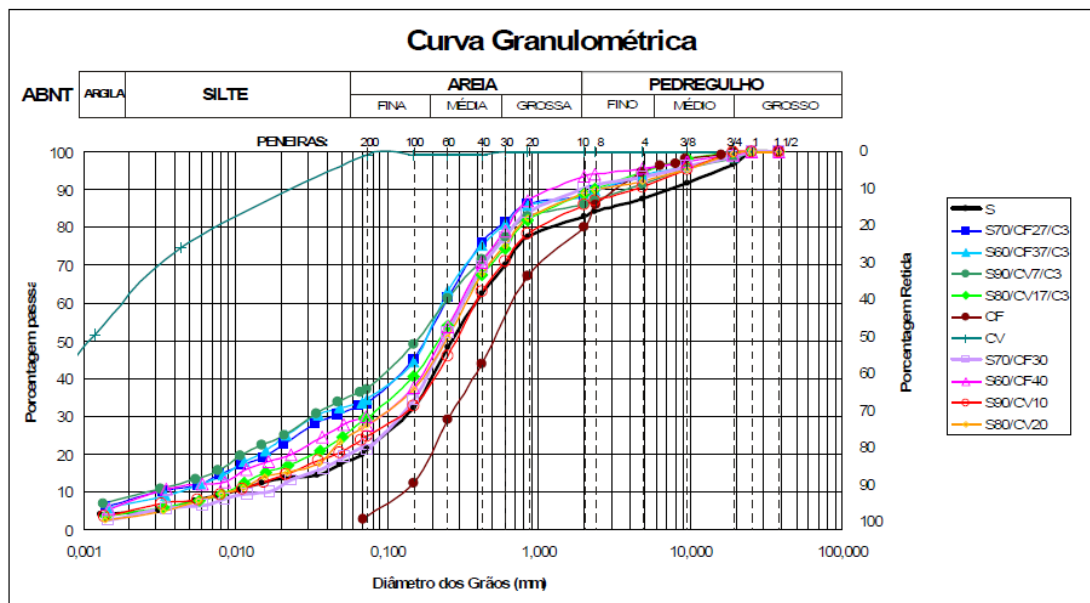


Figura 6 – Curvas Granulométricas do solo, cinza de fundo, cinza volante, e das misturas estudadas.

Tendo em vista que se trata de um solo saprolítico, do horizonte C, portanto, mais heterogêneo, a distribuição granulométrica se justifica e é esperado heterogeneidade ao longo da jazida.

Com relação à classificação SUCS, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 6. O solo classificado como SM, corresponde a uma areia siltosa, Apesar de não ser muito apropriado aplicar esta classificação para cinzas ou misturas uma vez que foge da abrangência para o qual a classificação foi proposta, a aplicação foi feita para simples comparação. A cinza de fundo e as misturas também se classificam como SM (Areias Siltosas). Dado que as misturas estudadas mantiveram a mesma classificação do solo puro, já que também não apresentaram plasticidade, a granulometria do solo não foi significativamente alterada.

A classificação ML, silte de baixa plasticidade, obtida para a cinza volante, são compatíveis com os resultados encontrados por Rohde et al. (2006) para as cinzas volantes de usinas termelétricas do sul do Brasil.

Com relação à classificação HBR, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 7. O solo, a cinza de fundo e todas as misturas solo- cinza, com e sem adição de cal, foram classificados como A-2-4, tendo comportamento médio em termos de pavimentos. A Cinza de

Fundo, por conta de sua granulometria um pouco mais grosseira do que as outras misturas, e aos teores utilizados (maiores que os de cinza volante) favorece a ocorrência de estabilização granulométrica do solo. Já a cinza volante, classificada como A-4, teria um comportamento fraco para sua utilização em pavimentação. Tais resultados enquadram o material como não recomendável para base de pavimentos

Tabela 6 – Grupos para classificação SUCS

Amostra	Grupo	Material
Solo	SM	Areia Siltosa
Cinza de Fundo	SM	Areia Siltosa
Cinza Volante	ML	Silte
S70/CF27/C3	SM	Areia Siltosa
S60/CF37/C3	SM	Areia Siltosa
S90/CV7/C3	SM	Areia Siltosa
S80/CV17/C3	SM	Areia Siltosa
S70/CF30	SM	Areia Siltosa
S60/CF40	SM	Areia Siltosa
S90/CV10	SM	Areia Siltosa
S80/CV20	SM	Areia Siltosa

Tabela 7 – Grupos para classificação HBR

Amostra	Grupo	Material
Solo	A-2-4	Areia Siltosa
Cinza de Fundo	A-2-4	Areia Siltosa
Cinza Volante	A-4	Solo Siltoso
S70/CF27/C3	A-2-4	Areia Siltosa
S60/CF37/C3	A-2-4	Areia Siltosa
S90/CV7/C3	A-2-4	Areia Siltosa
S80/CV17/C3	A-2-4	Areia Siltosa
S70/CF30	A-2-4	Areia Siltosa
S60/CF40	A-2-4	Areia Siltosa
S90/CV10	A-2-4	Areia Siltosa
S80/CV20	A-2-4	Areia Siltosa

O ensaio de composição química foi realizado no Laboratório do Departamento de Engenharia Química da PUC-Rio, somente para as amostras de cinzas pesada e volante e as misturas com adição de cal. É sabido que os componentes principais do solo são SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , os quais participam ativamente do processo de estabilização.

Na Tabela 8 apresentam-se os resultados em termos dos elementos químicos, e na Tabela 9 são mostrados os componentes químicos presentes nas misturas com cal. Esta composição foi comparada àquela citada por Ubaldo (2005) para os mesmos tipos de cinza, cujos resultados encontrados na tabela 10 são concordantes com os encontrados neste estudo, onde os principais componentes das cinzas, tanto de fundo quanto volante, são o silício, alumínio e ferro. A representatividade destes elementos foi mantida nas misturas estudadas, de onde se pode concluir que tais elementos químicos também devem estar presentes em grande quantidade no solo utilizado, participando ativamente do processo de estabilização. As composições químicas das cinzas volante e de fundo, e das misturas S70/CF27/C3, S60/CF37/C3, S90/CV7/C3, S80/CV17/C3, são apresentadas nas Figuras 7, 8 e 9.

A composição química das cinzas de fundo e volante de carvão mineral em estudo, também é comparada com a análise feita por Ubaldo (2005) com os mesmos tipos de cinza, de outras usinas termelétricas localizadas no território brasileiro, cujo resultado é mostrado na

Tabela 11. Para ambas as cinzas de Fundo e Volante, existe uma pequena variabilidade tanto nos teores de óxidos principais (SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3), quanto nos teores de CaO e SO_3 , os quais têm influência nas reações de estabilização. Isto demonstra as possíveis variações na composição química do carvão mineral utilizado, originado de diferentes jazidas, diferenças existentes entre os sistemas de queima do carvão, dentre outras.

Este ensaio não foi reproduzido nas misturas sem a adição de cal, S70/CF30, S60/CF40, S90/CV10 e S80/CV20, por estas terem sido propostas quando estes ensaios já tinham sido realizados. Porém, visto o baixo teor de cal utilizado nas misturas, acredita-se que a composição química das misturas com e sem cal serão bem similares, com exceção de alguns parâmetros, tais como o Cálcio.

Tabela 8 – Elementos químicos presentes nas cinzas e misturas deste estudo.

Parâmetros	Material/Mistura					
	CF	CV	S70/CF27/C3	S60/CF37/C3	S90/CV7/C3	S80/CV17/C3
Silício	27,489	36,289	10,484	19,790	26,810	28,680
Alumínio	17,217	22,382	8,860	16,288	20,456	21,597
Ferro	32,060	16,680	2,956	4,955	7,683	6,932
Cálcio	4,823	5,684	2,190	6,103	10,772	7,311
Potássio	9,866	12,087	1,648	2,487	3,807	3,970
Titânio	3,907	3,515	0,493	0,875	1,422	1,271
Vanádio	0,549	0,297	0,059	0,048	0,076	0,131
Manganês	0,396	0,228	0,045	0,071	0,111	0,114
Zircônio	0,986	0,543	0,032	0,061	0,056	0,055
Enxofre	2,127	1,817	-	-	0,090	0,108
Estrôncio	0,193	0,127	0,017	0,032	0,050	0,045
Zinco	0,201	0,252	0,010	0,021	0,027	0,053
Ítrio	0,186	0,100	0,007	0,015	0,017	0,019
Magnésio	-	-	0,687	2,205	3,567	3,045
Carbono	-	-	72,495	47,025	25,056	26,670
Prata	-	-	0,018	-	-	-
Paládio	-	-	-	0,023	-	-

Tabela 9 – Componentes químicos das misturas deste estudo.

Parâmetros	S70/CF27/C3	S60/CF37/C3	S90/CV7/C3	S80/CV17/C3
Silica	35,397	38,469	41,159	44,068
Alumina	26,391	28,741	29,261	31,548
Hematita	6,899	7,420	8,477	7,572
Óxido de Cálcio	4,993	8,869	11,795	7,923
Óxido de Potássio	3,233	3,101	3,610	3,728
Óxido de Magnésio	1,792	2,469	3,329	2,875
Dióxido de Titânio	1,341	1,522	1,837	1,630
Pentóxido de Vanádio	0,171	0,089	0,106	0,180
Óxido de Manganês	0,095	0,096	0,111	0,113
Dióxido de Zircônio	0,069	0,086	0,058	0,055
Óxido de Estrôncio	0,032	0,040	0,045	0,040
Óxido de Prata	0,030	-	-	-
Óxido de Zinco	0,020	0,028	0,026	0,050
Trióxido de Ítrio	0,015	0,020	0,016	0,018
Gás carbônico	19,520	9,023	0,010	0,010
Óxido de Paládio		0,028	-	-
Anidrido Sulfúrico			0,16	0,191

Tabela 10 – Componentes Químicos das cinzas de Fundo e Volante determinados por Mendonça (2004). (Fonte: Ubaldo, 2005).

Composição Química		
Símbolos	Mendonça (2004)	
	Cinza de Fundo	Cinza Volante
SiO ₂	57,900	57,100
Al ₂ O ₃	27,300	28,700
Fe ₂ O ₃	5,500	4,400
CaO	1,400	2,000
K ₂ O	2,500	2,600
MgO	0,640	0,720
TiO ₂	1,100	1,300
ZrO ₂	0,120	0,130
S	<200ppm	0,400
PbO	-	<200ppm
Cl ⁻	1,700	0,900
SO ₃	<200ppm	1,000

Tabela 11 – Concentração dos principais constituintes das cinzas de fundo e volante de diferentes procedências. (Fonte: Chies (2003, apud Ubaldo, 2005)).

Composição Química de Cinzas Volante e de Fundo (%)								
Componentes	Copesul		Tubarão		Charqueadas		Candiota	
	CF ¹	CV ²	CF ¹	CV ²	CF ¹	CV ²	CF ¹	CV ²
SiO ₂	64,40	66,40	59,20	56,50	63,30	62,20	66,70	65,70
Al ₂ O ₃	22,00	18,20	24,60	28,00	24,50	26,00	19,20	24,30
Fe ₂ O ₃	7,10	6,50	8,20	6,40	4,50	2,90	9,00	4,60
TiO ₂	0,89	0,80	1,20	1,31	0,98	1,10	0,72	0,69
CaO	1,70	2,15	1,34	0,92	1,31	1,26	0,60	0,37
MgO	0,40	0,88	0,41	0,45	0,40	0,35	0,30	0,46
K ₂ O	1,15	1,41	2,40	2,50	1,60	1,41	1,20	1,12
Na ₂ O	0,14	0,34	0,23	0,23	0,14	0,18	0,13	0,10
C	0,33	0,14	2,32	0,21	3,13	1,09	0,34	0,05
S	0,12	0,09	0,09	<0,05	0,05	<0,05	<0,05	<0,05

CF¹ - Cinza de Fundo - CV² - Cinza Volante

O ensaio de teor de matéria orgânica foi realizado no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio, somente para as misturas com adição de cal, assim como o ensaio para determinação da composição química e pelas mesmas razões. Os resultados encontrados nas misturas com cal mostraram que a presença de matéria orgânica não foi representativa em nenhuma destas amostras, o que pode ser esperado também nas misturas sem cal, visto que a eventual presença de matéria orgânica no solo não é esperada tendo em vista a profundidade de coleta e tipo de formação local (horizonte C) e nas cinzas o processo de fabricação com queima em elevadas temperaturas, elimina parcial ou totalmente a presença de matéria orgânica.

Os resultados do teor de matéria orgânica das misturas solo-cinza-cal, obtidos mediante uma análise de teor por queima a 440° C (ABNT/NBR 13600/1996), estão apresentados na Tabela 12, onde se mostra que não houve um aumento do teor de matéria orgânica com o aumento do teor de cinzas. Nas análises de Ubaldo (2005) do teor de matéria orgânica somente nas cinzas volantes e de fundo, derivadas do mesmo local das cinzas deste estudo, foram encontrados, 1,03% e 2,09% de teor de matéria orgânica, respectivamente, na mesma ordem de grandeza dos resultados obtidos no presente estudo.

O baixo teor de matéria orgânica encontrado nas misturas é um fator benéfico, tendo em vista que quando o teor de carbono na composição do solo ou da mistura é alto, pode retardar ou até mesmo inibir a atividade pozolânica, Nardi (1975).

Tabela 12 – Teor de matéria orgânica das misturas S70/CF27/C3, S60/CF37/C3, S90/CV7/C3 e S80/CV17/C3.

Amostra	Carbono Orgânico (%)	Matéria Orgânica (%)
S70/CF27/C3	72,495	0,96
S60/CF37/C3	47,025	0,91
S90/CV7/C3	25,056	1,05
S80/CV17/C3	26,670	1,00

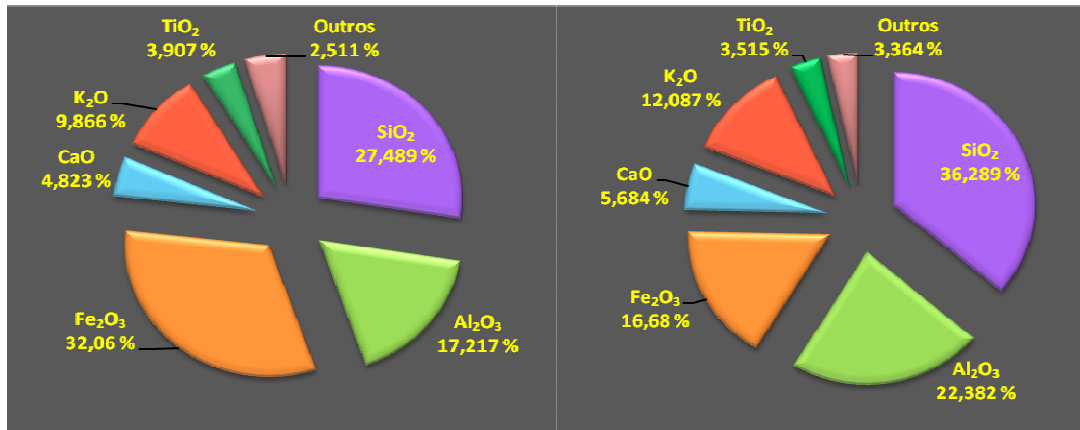


Figura 7 – Composição química das cinzas volante e de fundo, respectivamente.

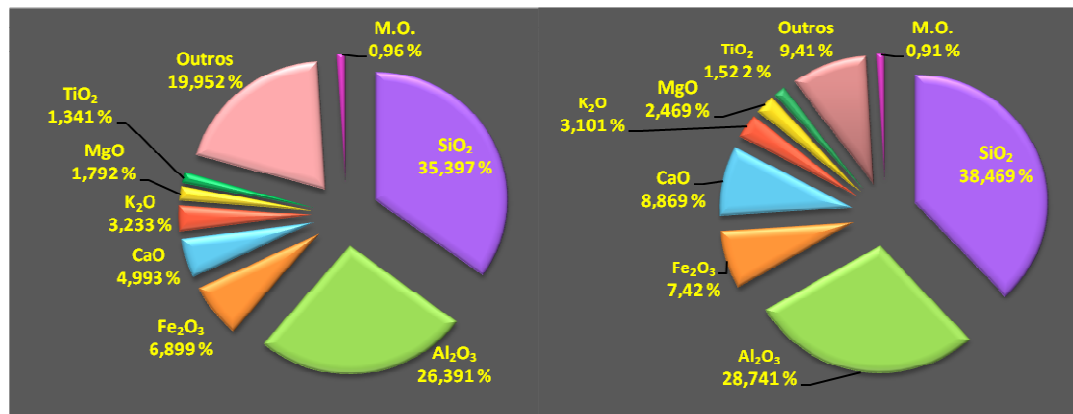


Figura 8 – Composição química das misturas S70/CF27/C3 e S60/CF37/C3, respectivamente.

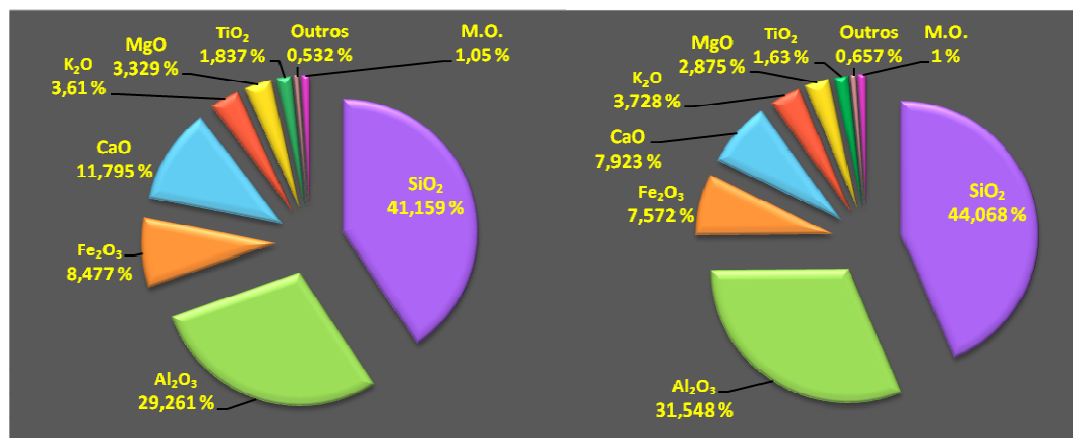


Figura 9 – Composição química das misturas S90/CV7/C3 e S80/CV17/C3, respectivamente.

Os resultados da análise dos elementos químicos feitos apenas em amostras de cinzas, de fundo e volante, obtidos através do ensaio de solubilização, e o limite permitido (em mg/l) para os mesmos, encontram-se na Tabela 13. Os resultados do ensaio de lixiviação foram todos satisfatórios com concentrações inferiores aos limites permitidos por norma. A cinza de fundo foi classificada como resíduo Inerte (Classe II B) por não constar nos anexos A ou B da Norma NBR 10004/2004, não possuir características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, mas possuir constituintes que são solubilizados em concentrações superiores ao estabelecido no anexo G. Já a cinza volante, foi classificada como resíduo Não Inerte (Classe II A) por ter apresentado concentrações superiores às máximas permitidas para resíduos considerados inertes, dos elementos químicos Alumínio, Fluoretos e Fenóis Totais, no ensaio de solubilização.

A classificação das cinzas volantes em resíduo Não Inerte não desclassifica sua utilização como agente cimentante em misturas com o solo, considerando que no ensaio de lixiviação, que representa a infiltração da água da chuva no solo, todos os parâmetros analisados encontram-se dentro dos limites permitidos.

Tabela 13 – Análise dos elementos químicos do extrato solubilizado e seus valores máximos permitidos.

	Limite permitido (mg/l)	Cinza Volante	Cinza de Fundo
Alumínio	0,2	0,31	0,08
Fluoretos	250	783	271
Fenóis Totais	0,05	1,99	-

No Laboratório de Instrumentação Nuclear da UFRJ foram feitos ensaios para examinar a presença de elementos radioativos nas cinzas, e os resultados foram negativos, descartando-se a hipótese das cinzas estudadas serem radioativas.

Conclusões

A partir dos resultados apresentados e analisados, foi possível chegar às seguintes conclusões:

- Os resultados obtidos permitem concluir que, pela classificação SUCS, o solo estudado nesta pesquisa é do tipo SM (areia siltosa). Pela classificação HRB, é um solo do tipo A-2-4 (areia siltosa). Estas duas classificações assinalam que o comportamento mecânico deste material não é recomendável para utilizá-lo em base de pavimentos;
- A composição química das misturas solo-cinza-cal e das cinzas de carvão mineral, volante e pesada, apresenta altos teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , além de baixos teores de matéria orgânica. O conjunto dos dois fatores pode favorecer a ocorrência das reações pozolânicas, que integram o processo de estabilização química do solo;
- A predominância de óxidos, sobretudo SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , nas misturas solo-cinza-cal revela o caráter de solo residual;
- Nos ensaios ambientais de solubilização e lixiviação, a Cinza Volante foi classificada como resíduo da Classe II B – Resíduo Inerte, devido a teores de Al, Fluoretos e Fenóis Totais (ensaio de solubilização) levemente superiores aos valores sugeridos por norma, e a Cinza de Fundo como Classe II A – Resíduo Não Inerte;
- Os resultados de radioatividade nas cinzas utilizadas neste estudo foram negativos;
- A adição de cinzas ao solo teve uma influência favorável, reduzindo a expansibilidade do solo estudado, sendo que a cinza volante tem maior ação estabilizante, ressaltando-se os melhores resultados obtidos para um teor de 7% desta cinza.

Referências

- 1 - Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.
- 2 - Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.
- 3 - Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.
- 4 - Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 6508**: Grãos de Solo que passam na peneira 4,8mm – Determinação da Massa Específica. Rio de Janeiro, 1984.
- 5 - Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.
- 6 - Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos – Especificação. 1992.
- 7 - Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 13600/1996** – Solo – Determinação de teor de matéria orgânica por queima a 440°C. Rio de Janeiro, 1996.
- 8 - Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 7175**: Cal Hidratada para Argamassas – Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.
- 9 - Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- 10 - Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 10005**: Lixiviação de Resíduos – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.
- 11 - Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 10006**: Solubilização de Resíduos – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.
- 12 - American Association of State Highway and Transportation Officials. **AASHTO M 145**: Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes. 1973.
- 13 - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 093/94**: Determinação da Densidade Real dos Grãos. Rio de Janeiro, 1994.
- 14 - 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.
- 15 - LOPES, L.S.E. **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 do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.
- 16 - 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.
- 17 - 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.

18 - 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.

19 - 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.

20 - 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.