

APLICABILIDADE DE RESÍDUOS E REJEITOS AMBIENTAIS PARA APROVEITAMENTO EM PAVIMENTAÇÃO

Aluna: Lucianna Szeliga
Orientadora: Michéle Dal Toé Casagrande

Introdução

O solo natural é um material complexo e variável, sendo comum que este não preencha total ou parcialmente as exigências de projeto geotécnico. Uma alternativa disponível ao engenheiro geotécnico para viabilizar técnica e economicamente a realização de obras de pavimentação rodoviária sobre solos ruins é remover o material existente no local e substituí-lo por outro com características adequadas ou modificar e melhorar as propriedades do solo existente, de modo a criar um novo material com características de resistência e deformabilidade adequadas para ser utilizado em obras de pavimentação rodoviária.

O aumento da produção anual de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), as preocupações ambientais com os métodos de deposição tradicionais e a falta de espaço para a instalação de aterros sanitários, têm levado a que sejam incentivadas formas alternativas de gestão dos resíduos, tais como a incineração. Esta, além de ser frequentemente associada à recuperação de energia como uma componente na gestão dos RSU, é uma alternativa capaz de conseguir significativa redução do seu volume, da ordem de 70-90%. Novas tecnologias vêm sendo desenvolvidas com a finalidade de mitigar os impactos ambientais destas usinas incineradoras.

Diante da escassez de recursos financeiros para aplicação nos mais diversos setores econômicos e da necessidade de proteção ambiental, torna-se viável o uso de técnicas e materiais alternativos para pavimentação que consome volumes consideráveis de material. O aproveitamento de cinzas é vantajoso para a indústria que gera este rejeito, e pode ser vantajoso para sua utilização pela indústria de construção civil como alternativa ao uso de estabilizantes convencionais para solos, tais como cal, cimento ou outros.

Para que sejam concebidos novos materiais é relevante que se conheçam as propriedades mecânicas, físicas e químicas dos materiais de constituição, bem como suas possíveis combinações. O conhecimento do mecanismo de estabilização é de grande importância no entendimento da resposta da mistura no que tange ao seu comportamento mecânico. Este mecanismo depende de vários fatores relacionados com o solo e as cinzas, como granulometria, teor de umidade, densidade e composição química.

Dentro deste contexto, o presente trabalho buscou contribuir para melhor interpretação e compreensão do comportamento do solo misturado com as cinzas de RSU, podendo potencializar a sua utilização em obras de pavimentação rodoviária, dando um fim mais nobre a este material.

Objetivos

O objetivo principal foi avaliar o potencial de utilização das cinzas de RSU, provenientes da Usina Verde S.A., como aditivo em uma amostra de solo regional, para aplicação em bases de pavimentos rodoviários. Este objetivo foi alcançado através da avaliação do comportamento físico, químico e mecânico de algumas misturas, estabelecendo padrões de comportamento que possam medir a influência da adição de cinzas, relacionando-a com os parâmetros de deformabilidade do solo.

A partir do objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- Realizar a caracterização física, química e geotécnica do solo, das cinzas de RSU e misturas solo-cinza, através de ensaios laboratoriais normatizados;
- Avaliar o comportamento mecânico do solo e das misturas através de ensaios experimentais;
- Analisar e comparar os parâmetros químicos, mecânicos e de deformabilidade do solo e das misturas estudadas para aplicação em base de pavimentos;
- Avaliar se há viabilidade técnica e ambiental de uma mistura que possa ser aproveitada como base de pavimentos.

Programa Experimental

O programa de ensaios estabelecido teve como objetivo principal investigar e identificar o efeito da adição de cinzas de RSU nas propriedades mecânicas de um solo regional. O estudo do comportamento mecânico dos materiais foi realizado através de ensaios de laboratório, englobando ensaios triaxiais de carga repetida.

Trabalhou-se com três tipos de materiais distintos: solo (Figura 1), cinza volante (Figura 2) e cinza de fundo (Figura 3), bem como as misturas decorrentes destes materiais com diferentes teores de cinza. O solo é procedente de uma jazida localizada no bairro de Campo Grande – RJ. A coleta foi feita no mês de Junho/2009. A cinza volante e a cinza de fundo são provenientes da incineração do Resíduo Sólido Urbano (RSU) na Usina Verde, que fica localizada na Ilha do Fundão – Município de Rio de Janeiro – RJ. A incineração e coleta foram realizadas no mês de Junho/2009.

A Usina Verde é uma empresa de capital privado situada na Cidade Universitária da UFRJ - Ilha do Fundão, e tem como objetivo apresentar soluções ambientais para a destinação final dos resíduos sólidos urbanos, resíduos dos serviços de saúde e alguns tipos de resíduos industriais, através do processo de incineração com co-geração de energia. Atualmente, a Usina Verde vem tratando o Resíduo Sólido Urbano (RSU), e procura, através do processo de incineração, propiciar o aproveitamento racional do lixo, convertendo-o, se possível, em insumos. O RSU utilizado na Usina Verde vem da Companhia Municipal de Limpeza Urbana do Rio de Janeiro (Comlurb), já pré-tratados, provenientes do aterro sanitário da Comlurb, no bairro Cajú/RJ. Todavia, ao chegar à usina, passa por uma nova triagem. Em funcionamento desde 2004, a Usina recebe diariamente 30 toneladas de resíduos sólidos. A composição do RSU após o processo de reciclagem da Comlurb e da Usina Verde encontra-se na Figura 4.

As misturas solo-cinza foram dosadas em peso de material. Após a mistura à seco foi adicionada a quantidade de água necessária para conseguir o teor de umidade desejado para a compactação e logo depois armazenadas em plásticos, para preservar a umidade e guardadas em câmara úmida para promover a homogeneização da umidade em todo o material. As siglas que descrevem os materiais utilizados estão apresentadas na Tabela 1.



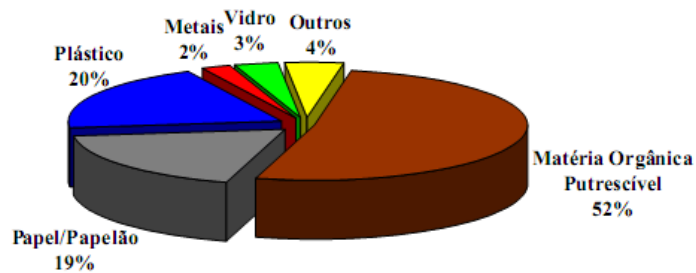
Figura 1 - Solo da jazida de Campo Grande/RJ (2009).



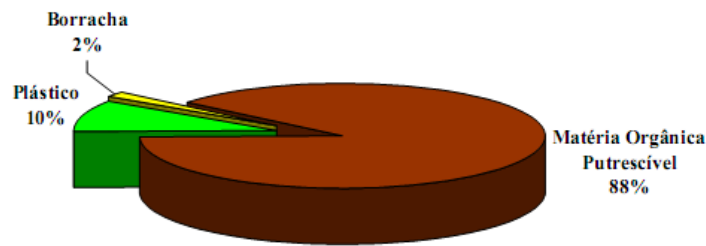
Figura 2 - Cinza Volante de RSU da Usina Verde (2009).



Figura 3 - Cinza de Fundo de RSU da Usina Verde (2009).



(a) COMLURB



(b) Usina Verde

Figura 4 - Composição do RSU após processo de reciclagem da Comlurb e da Usina Verde (Fontes, 2008)

Tabela 1 - Símbolos referentes a cada material.

Material/Mistura	% de Solo	% de Cinza Volante	% de Cinza de Fundo	Símbolo
Solo	100	0	0	S
Cinza Volante	0	100	0	CV
Cinza de Fundo	0	0	100	CF
Mistura 1	60	40	0	S60/CV40
Mistura 2	60	0	40	S60/CF40
Mistura 3	80	20	0	S80/CV20
Mistura 4	80	0	20	S80/CF20

O objetivo da realização deste programa experimental foi a caracterização do solo e do solo-cinza, 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:

- a) Propriedades físicas e de classificação dos materiais:
 - Densidade Real dos Grãos;
 - Limites de Atterberg;
 - Análise granulométrica.
- b) Propriedades químicas:
 - Análise química total;
 - Determinação de matéria orgânica;
 - Solubilização.
- c) Propriedades mecânicas:
 - Compactação;

- Propriedades físicas e de classificação dos materiais:

Para caracterização dos materiais, foram realizados ensaios de densidade real dos grãos, Limites de Atterberg e análise granulométrica. No ensaio de compactação foram obtidos os parâmetros de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima.

Os ensaios de composição química e teor de matéria orgânica foram realizados com o objetivo de caracterizar as amostras de solo e cinza. Os ensaios de solubilização fornecem os resultados utilizados na classificação das cinzas, de acordo com as definições da norma NBR 10004/2004 (ABNT, 2004) para resíduos sólidos.

Para determinar as propriedades-índice das amostras de solo foram executados os ensaios de caracterização física. O material proveniente de amostras deformadas foi preparado 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. As normas utilizadas são citadas a seguir:

- NBR 6457/1986 – Amostras de Solos – Preparação para Ensaios de Compactação e Caracterização;
- NBR 6457/1986 – Teor de Umidade Natural;
- NBR 7181/1984 – Solo – Análise Granulométrica;
- DNER-ME 093/94 – Solos – Determinação da densidade real dos grãos;
- NBR 6459/1984 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez;
- NBR 7180/1984 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade.

Para a determinação da massa específica dos grãos foi realizado o ensaio segundo a *DNER-ME 093/94 - Solos - Determinação da densidade real dos grãos*, utilizando amostras deformadas do solo. Foi misturado com água destilada 25g do material destorroado e passado na peneira 0,42mm (No. 40) e deixado em repouso por 24 horas. Em seguida foi realizada a deaeração da mistura através do aquecimento do recipiente até que não fossem mais detectadas bolhas de ar.

Visando caracterizar a interação do solo com a água, os ensaios de limite de liquidez e de 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 por meio desses ensaios e também de análise granulométrica foram determinados:

- Índice de plasticidade (IP, %), obtido através da diferença entre o limite de liquidez (LL, %) e o limite de plasticidade (LP, %): $IP = LL - LP$;
- Índice de atividade das argilas (Ia), proposto por Skempton:

$$Ia = \frac{IP}{\% < 2\mu m}$$

Onde $\% < 2\mu\text{m}$ corresponde à fração argila.

De acordo com sua atividade os solos são classificados como:

$I_a < 0,75 \rightarrow$ inativa

$0,75 < I_a < 1,25 \rightarrow$ atividade normal

$I_a > 1,25 \rightarrow$ ativo

A análise granulométrica foi realizada conforme a NBR 7181/1984 (ABNT, 1984). Como o solo em estudo é constituído de fração grossa e fina realizou-se esse ensaio por meio da granulometria conjunta, isto é, peneiramento e sedimentação. Para a etapa correspondente à sedimentação foram realizados ensaios com defloculante (hexametáfosfato de sódio).

O ensaio de sedimentação foi executado com 50g de solo passante na peneira 0,42mm (#40) colocado em 125ml 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.

Devido ao fato de se trabalhar com cinzas de resíduo sólido urbano, é importante a execução de ensaios químicos para determinação de compostos, perigosos ou não, para que então se tenha certeza da viabilidade da utilização deste resíduo quando misturado ao solo.

- Propriedades Químicas:

A composição química total 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.

Para o solo, cinza volante e cinza de fundo, o teor de carbono orgânico é determinado por oxidação com dicromato de potássio em meio sulfúrico, usando o sulfato de prata como catalizador, sendo o excesso de dicromato após a oxidação, dosado por titulação com solução padrão de sulfato ferroso amoniacal, utilizando difenilamina como indicador. Os ensaios foram feitos no Laboratório de Geotecnia/Química de solos da COPPE/UFRJ.

O teor de carbono assim obtido é multiplicado por 1,724 obtendo-se o teor de matéria orgânica. Este fator é utilizado em virtude de se admitir que, na composição média do húmus, o carbono participa com 58%. (EMBRAPA, 1997).

Para as misturas solo-cinza volante e solo-cinza de fundo, os ensaios foram feitos no Laboratório de Geotecnia da PUC-Rio, foi utilizada a Norma ABNT NBR 13600/1996 – *Solo – Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440° C*, seguindo o seguinte procedimento:

- i) Pesa-se o cadinho. (Massa da tara);
- ii) Coloca-se uma quantidade aleatória de amostra em cada cadinho (Massa da Tara + Solo + água + M.Org.);
- iii) Coloca-se o cadinho na estufa pra tirar umidade da amostra (estufa com temperatura entre 105°C e 110°C), durante 24h;
- iv) Depois das 24 horas, pesa-se de novo. (Massa da Tara + Solo + M. Org.);

- v) Em seguida, coloca-se o cadinho na Mufla, à 450°C, deixando ali por 12 h para ocorrer a queima total da matéria orgânica;
- vi) Passada às 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)

O ensaio de solubilização foi realizado pelo laboratório TASQA Serviços Analíticos Ltda., segundo a Norma NBR 10006/2004 (ABNT, 2004), com a finalidade de classificar o resíduo. Para esta classificação foi utilizada a listagem da Norma NBR 10004/2004 – anexo G (ABNT, 2004). Esta listagem 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 solubilização é realizado em duplicata.

- Propriedades Mecânicas:

O ensaio de compactação foi realizado na energia Proctor Modificado segundo a norma NBR 7182/86 – *Solo - Ensaio de Compactação*, com o intuito de determinar a umidade ótima de compactação ($w_{ótima}$) e o peso específico seco aparente máximo ($\gamma_{d_{máx}}$).

Após secar o material ao ar até se obter um teor suficientemente baixo de umidade para destorroá-lo, passou-se pela peneira #4, segundo a norma NBR 6457/86 (preparação com secagem prévia até a umidade higroscópica).

Adicionou-se uma determinada quantidade de água ao material, até que este ficou com cerca de 5% de umidade abaixo da umidade ótima, que pode ser estimada *à priori* pelo conhecimento do limite de plasticidade, cujo valor pode ser próximo à umidade ótima. Homogeneizou-se bem a mistura e deixou-se na câmara úmida por um tempo de 24 horas.

Retirou-se da câmara úmida e uma porção dela colocou-se dentro do molde cilíndrico de diâmetro 10 cm para ensaio Proctor. Aplicou-se 27 golpes com um soquete de massa de 4,54kg que se deixa cair a uma altura de 45,72cm na camada de solo. A porção do solo compactado deve ocupar cerca de um quinto da altura total do molde. O material é escarificado para conseguir uma melhor aderência entre as camadas. A segunda camada é colocada e o procedimento é repetido. Quando se completam cinco camadas, atinge-se uma altura maior do que a do molde. Isto é possível porque o molde, cuja altura é de 12,73cm, possui um anel complementar, que é removido ao final do ensaio, e permite então, retirar o excesso e acertar o volume em relação à altura do molde.

O cilindro é pesado junto com o solo. Assim, com o peso total do corpo de prova e o volume é possível calcular a sua massa específica. Tirando três amostras do seu interior (na parte média), determina-se sua umidade. Com estes dois valores, calcula-se a massa específica seca. Outro corpo de prova é preparado com uma quantidade maior de água (para aumentar a sua umidade em uns 2% aproximadamente). Uma nova compactação é feita e um novo par de valores umidade (w) e massa específica seca (γ_d) é obtido. O procedimento se repete até que a densidade seca máxima obtida nos ensaios prévios reduza duas ou três vezes. Com todos os pontos obtidos, plota-se um gráfico de massa específica seca versus umidade, e com eles, desenha-se a curva de compactação.

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 RSU 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.

Os resultados de densidade real dos grãos obtidos encontram-se listados nas Tabelas 2 e 3 e Figuras 5 e 6. Os resultados indicam que ao adicionar cinza volante o Gs aumenta até atingir um pico, depois do qual começa a diminuir para teores maiores de cinza.

Tabela 2 – Resultados do ensaio de densidade real dos grãos para o solo, cinza volante e misturas

Amostra	Teor de Cinza (%)	Densidade real dos grãos (Gs)
Solo (S)	0	2,709
S80/CV20	20	2,791
S60/CV40	40	2,698
Cinza Volante (CV)	100	2,412

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

Amostra	Teor de Cinza (%)	Densidade real dos grãos (Gs)
Solo (S)	0	2,709
S80/CF20	20	2,845
S60/CF40	40	2,678
Cinza de Fundo (CF)	100	2,434

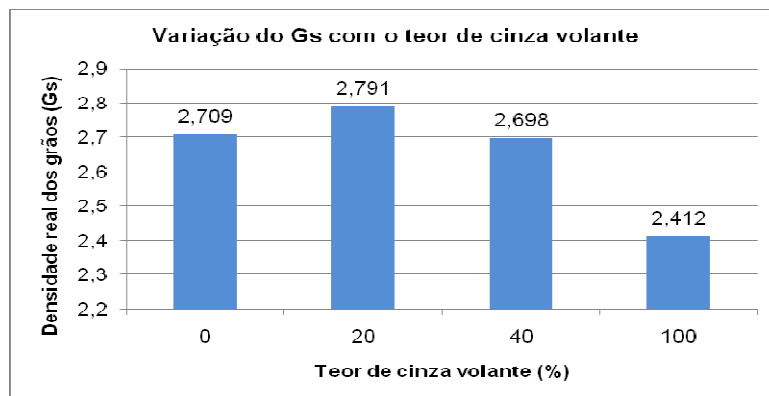


Figura 5 – Variação da densidade real dos grãos com o teor de cinza volante.

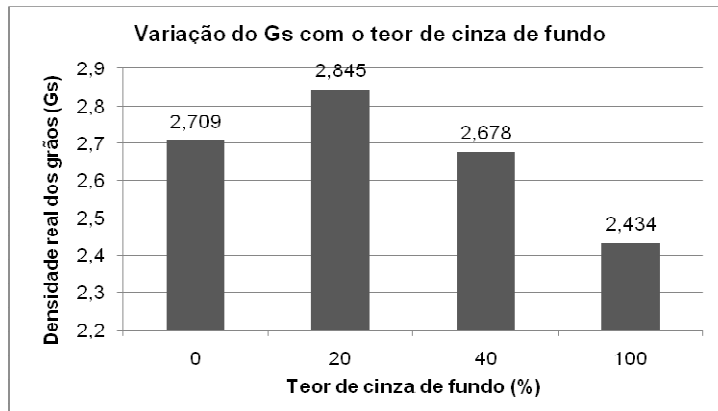


Figura 6 – Variação da densidade real dos grãos com o teor de cinza de fundo.

Os resultados de Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade e Índice de Plasticidade do solo com adição de cinza volante são apresentados na Tabela 4 e Figuras 7 e 8. Os resultados de Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade e Índice de Plasticidade do solo com adição de cinza de fundo são apresentados na Tabela 5 e Figuras 9 e 10.

Ressalta-se que não foi possível determinar os Limites de Atterberg para as cinzas puras, devido ao comportamento granular do material, que durante o ensaio não apresentou características plásticas para a sua realização.

Nota-se que, tanto a cinza volante como a cinza de fundo, diminuem o limite de liquidez e o índice de plasticidade e aumentam o limite de plasticidade. Estes resultados são comparáveis ao estudo feito por Bin-Shafique (2009), no qual a adição de cinza volante de carvão reduziu o índice de plasticidade de um solo expansivo (de 57% a 32%, para um teor de 5% de cinza) e de um solo mole (de 26% a 18%, para um teor de 5% de cinza), ambos os solos originários do estado de Texas, EUA. Teores maiores reduzem pouco mais estes parâmetros.

Tabela 4 – Resultados dos ensaios de Limites de Atterberg para o solo e misturas com cinza volante.

Amostra	Teor de Cinza (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Solo (S)	0	60	24	36
S80/CV20	20	39	30	9
S60/CV40	40	39	39	0

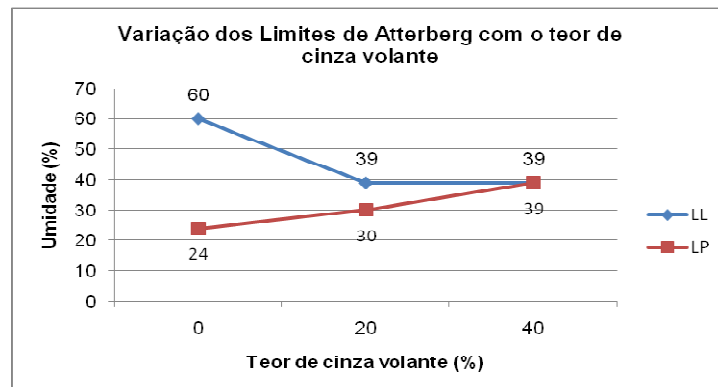


Figura 7 – Variação dos Limites de Atterberg com o teor de cinza volante.

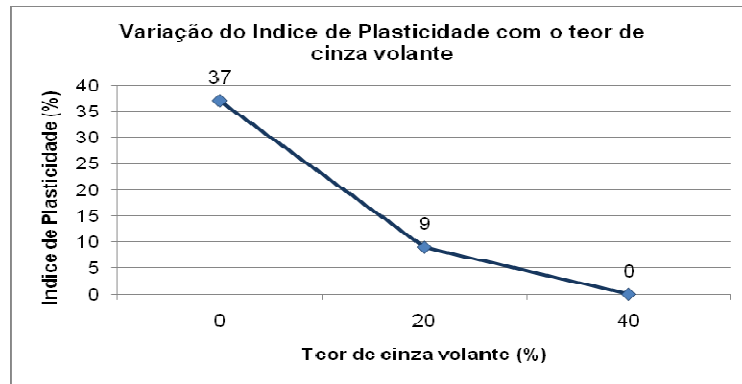


Figura 8 – Variação do Índice de Plasticidade com o teor de cinza volante.

Tabela 5 – Resultados dos ensaios de Limites de Atterberg para o solo e misturas com cinza de fundo neste estudo.

Amostra	Teor de Cinza (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Solo (S)	0	60	24	37
S80/CF20	20	34	30	4
S60/CF40	40	34	30	4

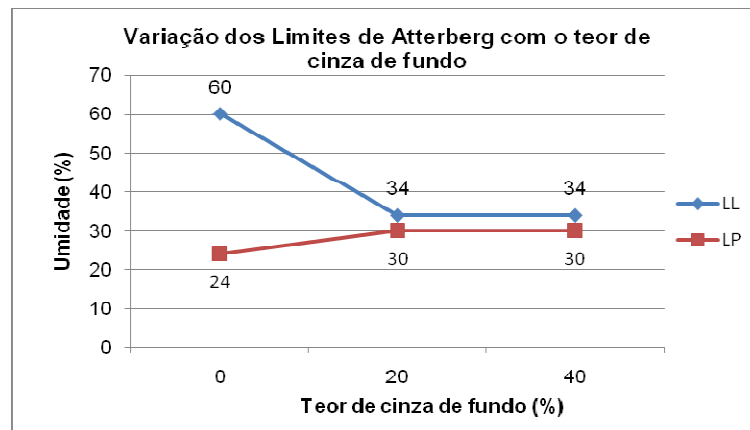


Figura 9 – Variação dos Limites de Atterberg com o teor de cinza de fundo.

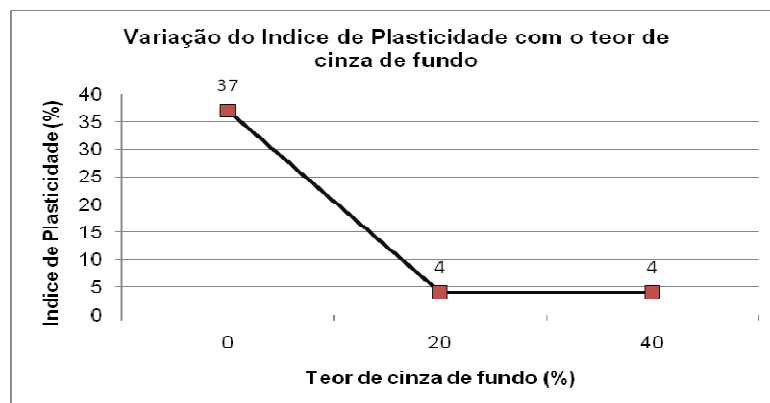


Figura 10 – Variação do Índice de Plasticidade com o teor de cinza de fundo.

A Figura 11 apresenta as curvas granulométricas do solo, cinza volante e da cinza volante de fundo. A Figura 12 apresenta as curvas granulométricas do solo, cinza volante e misturas do solo com 20% e 40% de cinza volante. A Figura 13 apresenta as curvas granulométricas do solo, cinza de fundo e misturas com 20% e 40% de cinza de fundo.

As curvas granulométricas do solo e das misturas com a cinza volante ficaram com uma granulometria mais graúda que a do solo e da cinza separadamente (Figura 11), isto pode estar relacionado à cimentação e/ou formação de gel que se produz ao redor das partículas finas da argila pela presença de cinza.

A Tabela 6 apresenta os resultados, em porcentagens, do ensaio de análise granulométrica para o solo, cinza de fundo e cinza volante, obtidos no presente estudo.

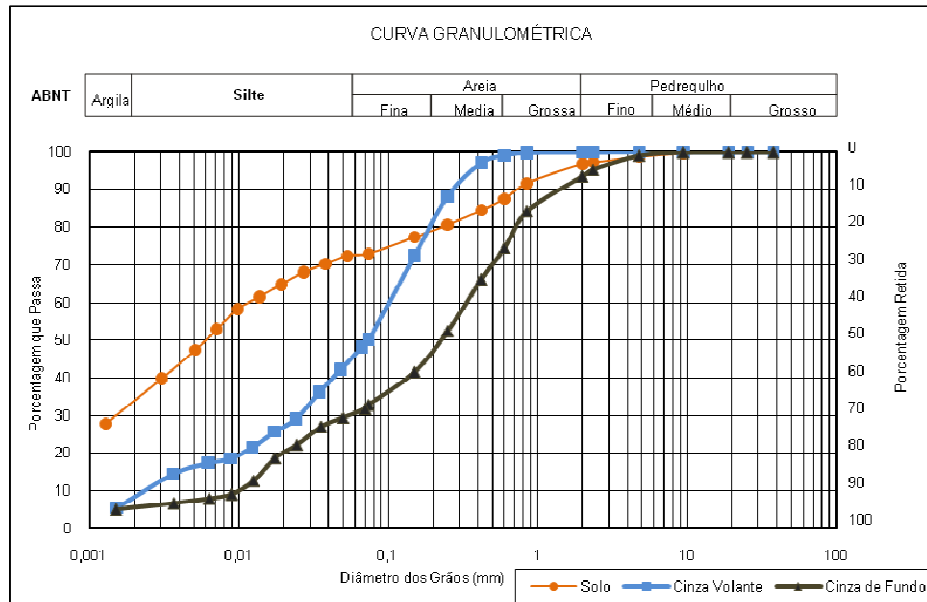


Figura 11 – Curvas Granulométricas do solo, cinza de fundo e cinza volante.

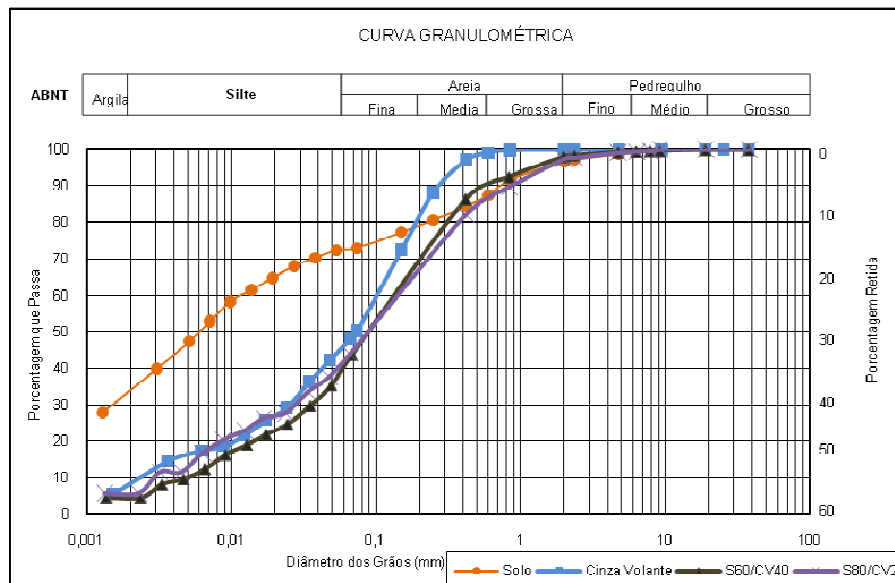


Figura 12 – Curvas Granulométricas do solo, cinza volante e misturas do solo com 20% e 40% de cinza volante.

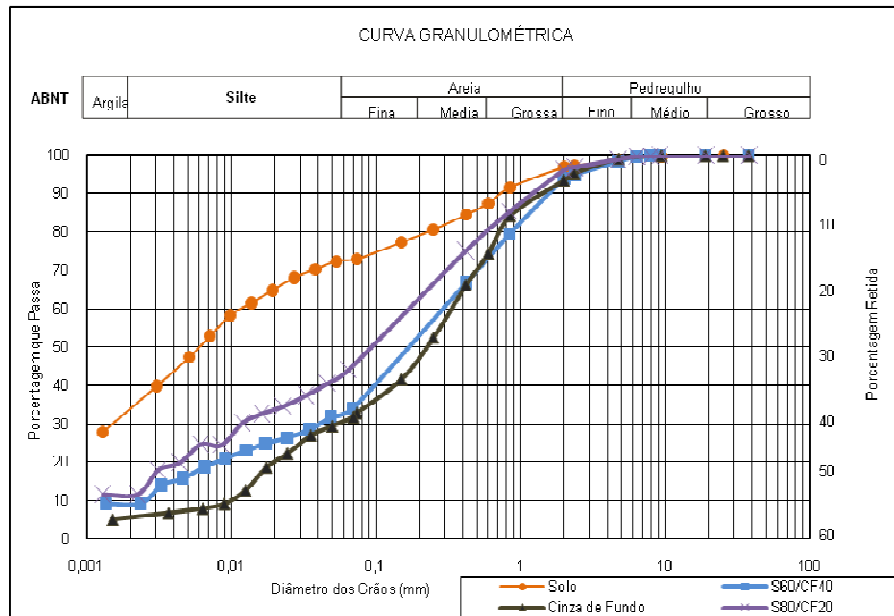


Figura 13 – Granulometria do solo, cinza de fundo e misturas do solo com 20% e 40% de cinza de fundo.

Tabela 6 – Resultados das análises granulométricas.

Amostra	Argila (%)	Silte (%)	Areia			Pedregulho (%)
			Fina (%)	Media (%)	Grossa (%)	
Solo	34	39	7	8	9	3
S80/CV20	6	36	40	3	12	3
S60/CV40	5	35	46	3	9	2
Cinza Volante	8	38	35	18	1	0
S80/CF20	12	31	32	4	17	4
S60/CF40	9	24	34	5	22	6
Cinza de Fundo	6	25	17	27	19	6

Com relação à classificação SUCS, obtiveram-se os índices apresentados na Tabela 7. Segundo Souza (1980), o solo classificado como CH, corresponde a uma Argila inorgânica de alta plasticidade, não sendo recomendável para base de pavimentos. Já as cinzas e as misturas classificam-se como SM (Areias Siltosas), tendo comportamento mecânico melhor quando comparado ao solo puro.

Com relação à classificação AASHTO, obtiveram-se os índices apresentados na Tabela 8. Segundo Souza (1980), o solo classificado como A-7-6, teria o pior comportamento da classificação, já a cinza volante e misturas S80/CV20, S60/CV40, S80/CF20 e S60/CF40, classificados como A-4, teriam um comportamento fraco para sua utilização em pavimentação, embora melhor do que o solo puro. A Cinza de Fundo, por causa de sua granulometria um pouco mais grosseira do que as outras misturas, teria o melhor comportamento dentre todas as amostras estudadas se por outras avaliações pudesse eventualmente ser utilizada pura no pavimento.

Com relação à classificação MCT foram obtidos os seguintes parâmetros: $c'=1,62$, $d'=50,0$ e $e'=1,39$. O solo é classificado como NG' , de comportamento *Não Laterítico – Argiloso*. Estes solos quando compactados nas condições de umidade ótima e massa específica aparente máxima da energia normal, apresentam características das argilas tradicionais muito plásticas e expansivas. O emprego destes solos se prende às restrições conseqüentes à sua elevada expansibilidade, plasticidade, compressibilidade e contração. Quando submetidos à secagem seu emprego não é recomendado para base de pavimentos,

sendo uns dos piores solos para fins de pavimentação, dentre os solos tropicais classificados (Nogami e Villibor, 1995).

Tabela 7 – Índices para classificação SUCS

Amostra	Índice
Solo	CH
S80/CV20	SM
S60/CV40	SM
Cinza Volante	SM
S80/CF20	SM
S60/CF40	SM
Cinza de Fundo	SM

Tabela 8 – Índices para classificação AASHTO

Amostra	Índice
Solo	A-7-6
S80/CV20	A-4
S60/CV40	A-4
Cinza Volante	A-4
S80/CF20	A-4
S60/CF40	A-4
Cinza de Fundo	A-2-4

Os resultados da composição química da amostra de solo, apresentados foram determinados no Laboratório de Química da PUC-Rio. Os componentes principais do solo são SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , os quais participam ativamente do processo de estabilização (Rezende, 1999).

Na Tabela 9 apresenta-se a composição química da Cinza Volante do RSU em estudo, esta composição é comparada com a análise feita por Fontes (2008) no mesmo tipo de cinza e da mesma usina. É notória a diferença 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 a variabilidade da composição química da Cinza Volante. Da mesma forma, a composição química da mistura a seco (S60/CV40) mostra uma redução do teor de Cloro. Cabe ressaltar que a composição química da Cinza Volante em estudo é similar àquela típica da Cinza Volante de Carvão Lignito, mencionada por Winterkorn (1990), a qual tem propriedades cimentantes. Devido a este fato pode-se comparar o comportamento geomecânico de solos estabilizados com este dois tipos de cinzas anteriormente mencionados.

Na Tabela 10, apresenta-se a composição química da Cinza de Fundo do RSU em estudo ensaiado em duas amostras, esta composição é comparada com a análise feita por ARM (2003) para cinzas de RSU, procedentes de três incineradoras na Suécia. Da mesma forma que para a Cinza Volante de RSU, existe diferença 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 a variabilidade da composição química da Cinza de Fundo. Da mesma forma, a composição química da mistura a seco (S60/CF40) mostra uma redução do teor de Cloro. Cabe ressaltar que a composição química da Cinza de Fundo em estudo é um pouco diferente da Cinza Fundo de Carvão procedente da termoelétrica Jorge Lacerda, mencionada por Pozzobom (1997), sendo que a Cinza de Fundo de RSU apresenta menor teor de SiO_2 e maior teor de CaO .

Os resultados do teor de matéria orgânica do solo, cinza de fundo e da cinza volante estão apresentados na Tabela 11, estas foram feitas mediante a técnica de oxidação com dicromato de potássio em meio sulfúrico, no Laboratório de Geotecnia/Química de Solos da COPPE/UFRJ. As composições químicas do solo, da cinza volante e da cinza de fundo são apresentadas na Figura 14.

Observa-se que o teor de matéria orgânica presente no Solo e na Cinza Volante é bem baixo, ao contrário da Cinza de Fundo, que tem um teor alto, sendo que um teor alto de carbono pode inibir a atividade pozolânica severamente Winterkorn (1990). Segundo referências da Usina Verde, a Cinza de Fundo teria um alto teor de matéria orgânica devido ao sub-dimensionamento do forno que impossibilita a queima de maior porcentagem de matéria orgânica.

Para as misturas solo-cinza se fez uma análise de teor por queima a 440° C (ABNT/NBR 13600/1996), os resultados estão apresentados na Tabela 12, onde se mostra o aumento de teor de matéria orgânica devido ao aumento do teor de cinzas, mas as porcentagens são menores do que nos resíduos puros, como esperado.

Segundo Dias (2004), os valores mais elevados, obtidos pela técnica da queima, devem-se ao fato de que o aquecimento em estufa e em mufla provoca a perda de componentes inorgânicos voláteis contidos na amostra, como água de constituição, por exemplo, além das substâncias orgânicas, logo, se observa um teor de matéria orgânica acima do esperado, de acordo com este procedimento, isto se pode notar na mistura S60/CV40, onde o teor de 1,45% é maior do que o teor de 0,78% para a Cinza Volante pura, obtida pela técnica de oxidação com dicromato de potássio.

Tabela 9 - Composição química da Cinza Volante de RSU, mistura (S60/CV40) e Cinza Volante de Carvão (Fontes, 2008 e Winterkorn, 1990)

Composto	Concentração (%)			
	CV-RSU neste estudo	CV-RSU Fontes (2008)	S60/CV40 neste estudo	CV-carvão Winterkorn (1990)
SiO ₂	21,2 - 12,9	44,26	26,35	20 - 40
Al ₂ O ₃	15,4 - 12,2	18,16	25,59	10 - 30
Fe ₂ O ₃	5,3 - 7,7	9,27	17,42	3 - 10
SO ₃	9,8 - 5,2	0,64	2,30	1 - 8
CaO	32,3 - 45,3	15,39	17,14	10 - 32
Cl	6,6 - 4,7		2,01	
TiO ₂	3,3 - 4,7	3,25	2,67	0,5 - 2
K ₂ O	2,6 - 4,1	2,61	3,70	0,5 - 4
P ₂ O ₅	1,28 - 0	2,94		
ZnO	0,5 - 1,1	0,46	0,42	
Cr ₂ O ₃	0,1 - 0,2	0,16		
MnO	0,1 - 0	0,13	0,20	
SrO	0,1 - 0,2	0,04	0,08	
ZrO ₂	0,08 - 0,1	0,04	0,37	
CuO	0,08 - 0	0,06		
PbO	0,08 - 0	0,11		
MgO		2,23		0,5 - 8
V ₂ O ₅	0 - 0,25		0,15	
M.O.	0,78		1,45	

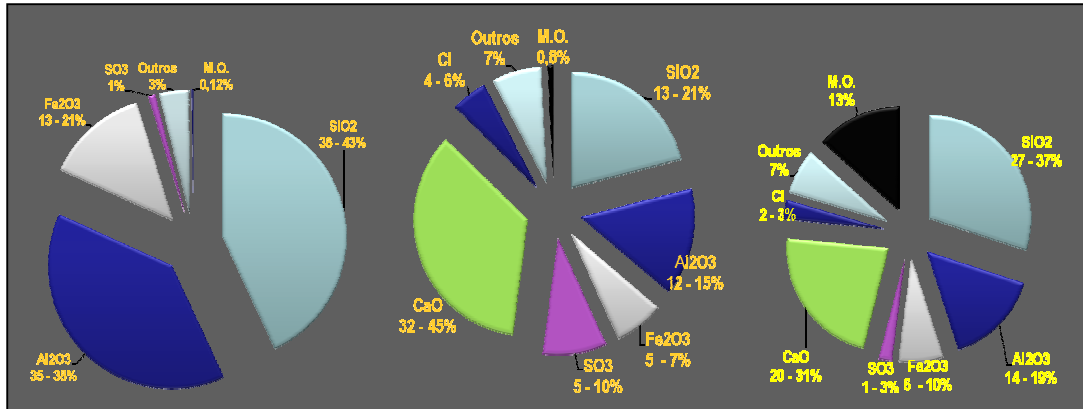


Figura 14 – Composição química do solo, cinza volante e cinza de fundo, respectivamente.

Tabela 10 - Composição química da Cinza de Fundo de RSU mistura (S60/CV40) e Cinza de Fundo de Carvão.

Composto	Concentração (%)			
	CF-RSU neste estudo	CF-RSU Arm (2003)	S60/CF40 neste estudo	CF-carvão Pozzobom (1997)
SiO2	27,086 - 37,761	46	34,317	55,980
Al2O3	14,187 - 19,172	10	31,340	26,730
Fe2O3	10,027 - 6,696	9	18,114	5,800
SO3	1,326 - 3,644	-	0,283	-
CaO	20,181 - 31,804	15	4,640	0,840
Cl	2,388 - 3,855	-	-	-
TiO2	3,683 - 5,549	-	2,056	1,330
K2O	2,178 - 3,047	-	3,713	2,590
P2O5	0 - 1,047	-	-	0,240
ZnO	0,913 - 1,883	-	0,271	-
Cr2O3	0 - 0,195	-	-	-
MnO	0,103 - 0,168	-	0,164	0,020
SrO	0,057 - 0,147	-	0,037	-
ZrO2	0,112 - 0,126	-	0,320	-
CuO	0 - 0,344	-	-	-
Ac	0 - 0,036	-	-	-
Br	0 - 0,009	-	-	-
Rb2O	0 - 0,014	-	-	-
MgO	0 - 1,722	2		0,590
V2O5	0 - 0,43	-	0,134	-
NbO	-	-	0,071	-
NaO2	-	-	-	0,250
M.O.	13,5	-	4,480	-

Tabela 11 – Teor de matéria orgânica do solo, da cinza de fundo e da cinza volante.

Amostra	Carbono Orgânico		Matéria orgânica	
	(g/kg)	%	(g/kg)	%
Solo	0,70	0,070	1,2	0,120
Cinza volante	4,52	0,452	7,8	0,780
Cinza de fundo	78,4	7,840	135	13,500

Tabela 12 – Teor de matéria orgânica das misturas S80/CV20, S60/CV40, S80/CF20 e S60/CF40.

Amostra	Carbono Orgânico (%)	Matéria Orgânica (%)
S80/CV20	0,225	0,388
S60/CV40	0,841	1,450
S80/CF20	1,824	3,144
S60/CF40	2,600	4,482

Os resultados da análise dos elementos químicos do extrato solubilizado, obtidos através do ensaio de solubilização, e o limite permitido (em mg/l) para os mesmos, encontram-se na Tabela 13. Alguns resultados deram acima dos valores máximos permitidos, o que leva à classificação do resíduo como não inerte.

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

	Limite permitido (mg/l)	Cinza Volante	Cinza de Fundo	S60/CV40
Alumínio	0,2	0,31	0,08	0,7
Cloretos	250	783	271	389
Cromo Total	0,05	1,99	-	0,88
Sulfato	250	650	290	600

As curvas de compactação do solo e das misturas com cinza volante e cinza de fundo apresentam-se nas Figuras 15 e 18. A Tabela 14 apresenta um resumo dos valores de umidade ótima (w_{otm}) e de peso específico aparente seco máximo ($\gamma_d \text{ máx}$).

Como pode ser observado na Figura 16, ao aumentar o teor de cinza volante na mistura, a máxima densidade aparente seca tende a diminuir, o qual é concordante com pesquisas feitas por Nicholson (1993) sobre utilização de cinzas volantes de carvão para estabilizar solos tropicais. Porém em relação à umidade ótima, na Figura 17, mostra-se como o teor de umidade ótima decresce para um teor de 20% de cinza volante e cresce para um teor de 40% da mesma cinza, o que explica parte da queda de densidade.

A Figura 18 apresenta as curvas de compactação do solo e misturas com 20% e 40% de cinza de fundo e a Figura 19 mostra a variação da massa específica aparente seca com o teor de cinza de fundo. A Figura 20 apresenta a variação do teor de umidade ótimo com o teor de cinza de fundo.

Como pode ser observado na Figura 19, ao aumentar o teor de cinza de fundo na mistura, a máxima densidade aparente seca tende a diminuir. Neste caso, a Figura 20 mostra como o teor de umidade ótima decresce para os teores de 20% e 40% de cinza de fundo.

Os resultados da curva de compactação da cinza de fundo são concordantes com os resultados obtidos por Farias (2005), para cinza pesada de carvão, onde se observou que a massa específica aparente seca diminui com o teor de cinza. A forma rugosa da superfície dos grãos da cinza pesada resulta em uma menor densidade real dos grãos, quando comparado às partículas do solo. Tal característica faz com a massa específica aparente seca diminua à medida que se aumenta o teor de cinza pesada nas misturas.

Tabela 14 – Valores de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima.

Material ou mistura	Símbolo	w_{otm} (%)	γ_{dmax} (g/cm ³)
Solo	S	18,5	1,718
Mistura 1	S80/CV20	14,3	1,650
Mistura 2	S60/CV40	22,5	1,555
Mistura 3	S80/CF20	16,5	1,672
Mistura 4	S60/CF40	16,0	1,622

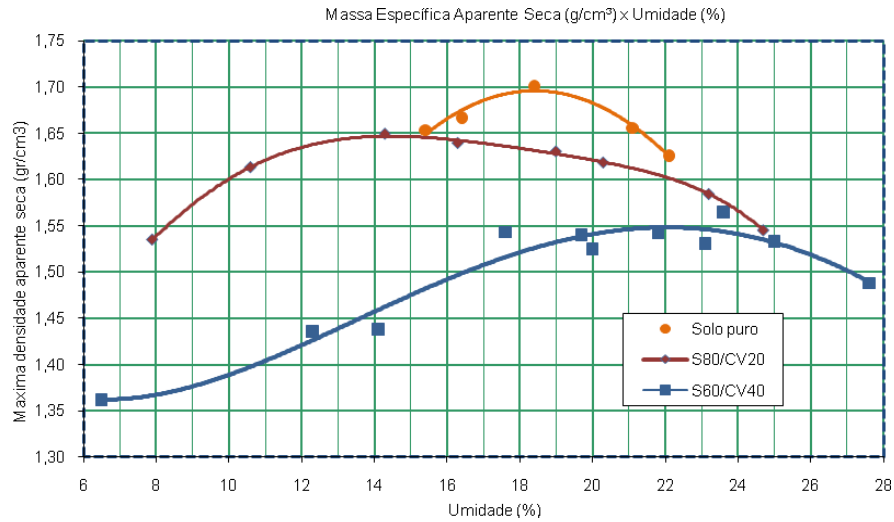


Figura 15 – Curvas de compactação do solo e misturas com 20% e 40% de cinza volante.

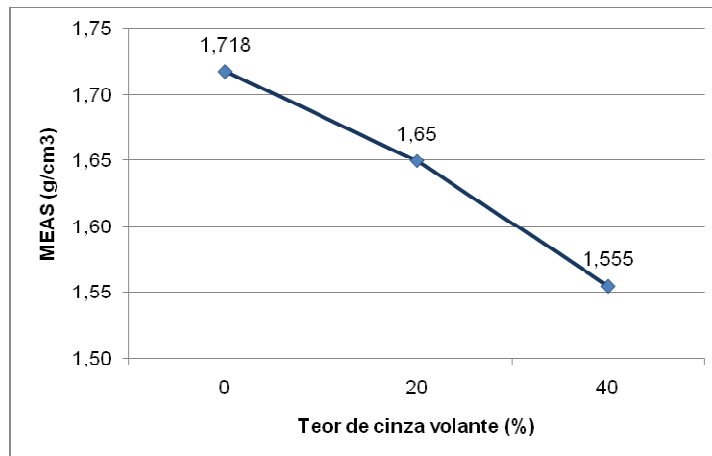


Figura 16 – Variação da Massa específica aparente seca com o teor de cinza volante.

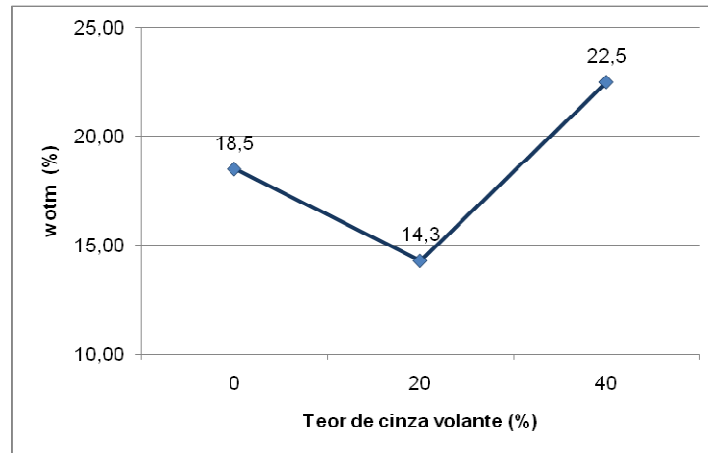


Figura 17 – Variação do teor de umidade ótimo com o teor de cinza volante.

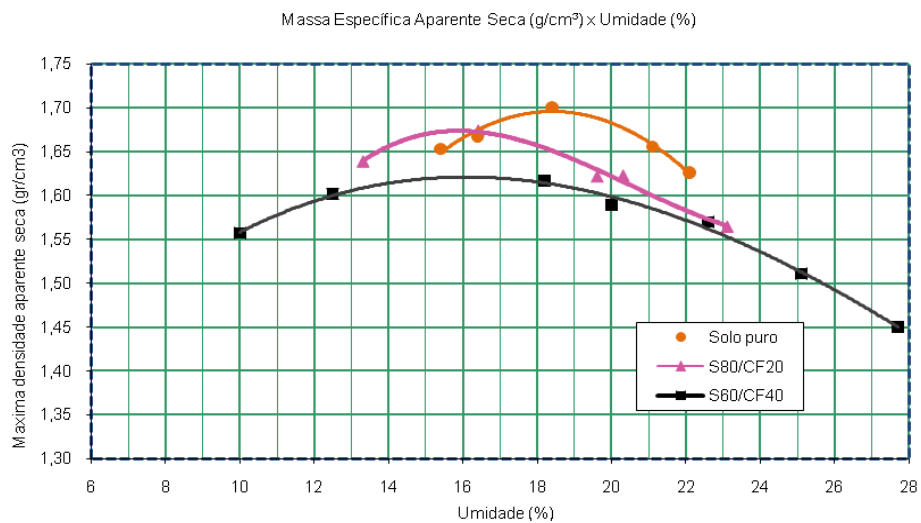


Figura 18 – Curvas de compactação do solo e misturas com 20% e 40% de cinza de fundo.

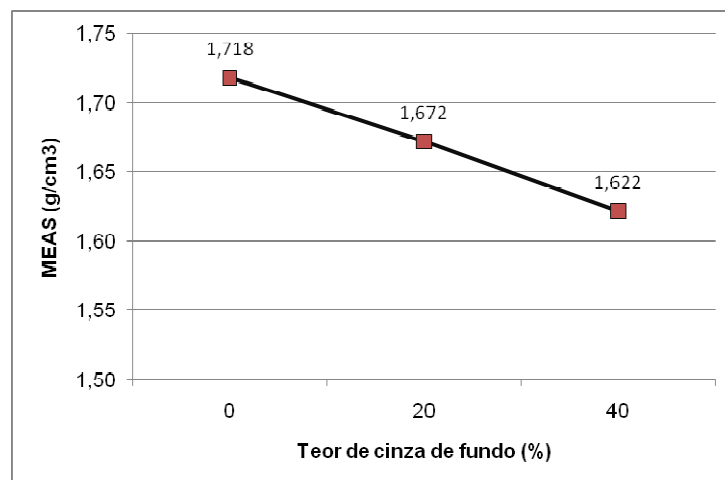


Figura 19 – Variação da Massa específica aparente seca com o teor de cinza de fundo.

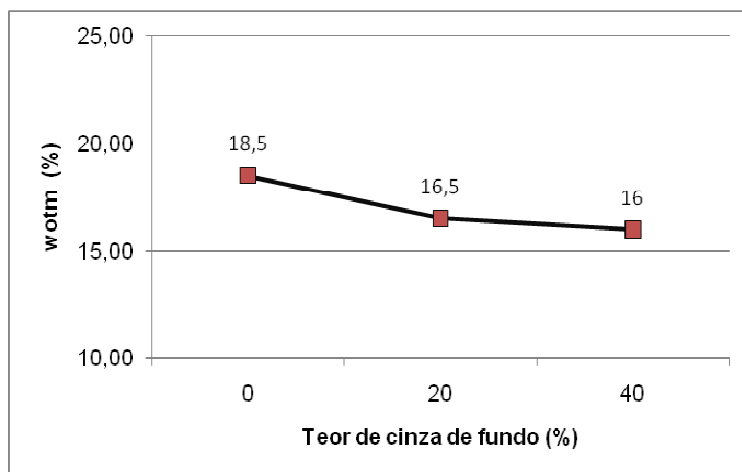


Figura 20 – Variação do teor de umidade ótimo com o teor de cinza de fundo.

Conclusões

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

- A influência das cinzas ao solo proporciona o desenvolvimento de um novo material geotécnico com características próprias, observado pela melhoria das propriedades mecânicas deste novo material;
- Os resultados obtidos permitem concluir que o solo estudado nesta pesquisa é do tipo CH (argila inorgânica de alta plasticidade). Pela classificação SUCS, é um solo do tipo A-7-6 (sistema AASHO de classificação) e NG' (não-laterítico argiloso) pela classificação MCT. Estas três classificações assinalam que o comportamento mecânico deste material não é recomendável para ser utilizado como solo de base de pavimentos;
- A composição química do solo revela seu caráter de solo residual, pela predominância de óxidos, sobretudo SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , isto pode favorecer o mecanismo de estabilização química com a adição de cinzas de RSU;
- A composição química da Cinza Volante de RSU mostra teores médios de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , elevado teor de CaO e valores baixos de teor de matéria orgânica, sendo que estes compostos influenciam favoravelmente o mecanismo de estabilização química. Já a Cinza de Fundo de RSU, apresenta composição química similar à da Cinza Volante, porém tendo menor teor de CaO e elevado teor de matéria orgânica, o que pode influenciar negativamente a estabilização química do solo;
- A adição de Cinzas de RSU tem o efeito de reduzir a Massa específica seca aparente, obtida por compactação Proctor, devido à menor densidade real dos grãos das cinzas, quando comparado às partículas do solo;
- Os parâmetros de compactação são influenciados pelo teor e tipo de cinza adicionado, sendo que para cada teor deve-se obter uma curva de compactação;
- 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 a dependência no teor de cinza utilizado. A adição de um teor de 40% de cinza volante conseguiu reduzir a expansibilidade do solo até menos de 0,5%, viabilizando assim seu emprego em base de pavimentos;

- Vizcarra (2010) realizou ensaios mecânicos específicos para avaliação de solos de base de pavimentos e, dos ensaios de módulo de resiliência, concluiu que o teor de cinza tem influência no comportamento resiliente, sendo que este pode melhorar ou piorar, dependendo do teor de cinzas. Outros fatores que influenciam o comportamento resiliente são o teor de umidade, o tempo do atraso da compactação após a mistura dos materiais e o tempo de cura, o qual tem influência favorável. O comportamento resiliente do solo é dependente principalmente da tensão desviadora, sendo que esta dependência não muda com a adição das cinzas. O solo estudado apresentou capacidade de suporte (CBR) de 2% na umidade ótima e uma expansibilidade de 4,87%. Estes resultados indicam que este material deve ser evitado no emprego em base de pavimentos. A adição de cinzas aumentou o CBR, o que indica uma melhoria na sua capacidade de suporte. 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 a dependência no teor de cinza utilizado. A adição de um teor de 40% de cinza volante conseguiu reduzir a expansibilidade do solo até menos de 0,5%, viabilizando assim seu emprego em base de pavimentos. O emprego do solo misturado com um teor de cinza volante de 40% mostrou-se viável para fins de pavimentação. O dimensionamento exploratório feito assinala uma espessura de base de 15 cm, isto significa que para uma rodovia de 10 m de largura e 1 km de comprimento, o volume necessário de cinza volante é de 600 m³, para emprego na base do pavimento.

Referências

- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 10004: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 10006: Solubilização de Resíduos – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 7181: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. Solo – Ensaio de Compactação – NBR-7182, 1986b.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1984.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 13600/1996 – Solo – Determinação de do teor de matéria orgânica por queima a 440° C. Rio de Janeiro, 1996.
- American Coal Ash Association (ACAA) (2003) Fly Ash Facts for Highway Engineers. Edição 4.
- Arm, M. (2003) Mechanical Properties of Residues as Unbound Road Materials. Experimental tests on MSWI bottom ash, crushed concrete and blast furnace slag. Doctoral thesis. Department of Land and Water Resource Engineering. Royal Institute of Technology. Stockholm, Sweden.

- Bin-Shafique, S., Kahman, K., Yaykiran, M., Azfar, I. (2009) The Long-term performance of two fly ash stabilized fin-grained soil subbases. *Resources, Conservation and Recycling*.
- Dias, J. C., Lima, W. N. (2004) Comparação de métodos para a determinação de matéria orgânica em amostras ambientais. *Revista Científica da UFPA Vol 4*.
- DNER-ME 093/94 (2004) Solos – determinação da densidade real. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio. Rio de Janeiro.
- EMBRAPA (1997) Manual de Métodos de Análise de Solos - 2ª Edição. ISBN 85-85864-03-6. 212 p.
- Farias, E. R. (2005) A utilização de misturas solo/cinza pesada na pavimentação - análise de aspectos de comportamento mecânico e ambiental. Dissertação de MSc., UFSC, Santa Catarina, Brasil.
- Fontes, Cintia Maria Ariani (2008) Utilização das cinzas de lodo de esgoto e de resíduo sólido urbano em concretos de alto desempenho. Tese de Doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- Nicholson, P.G. (1993) Fly Stabilization of Tropical Hawaiian Soils. Fly Ash for soil improvement. ASCE.
- Nogami, J. S., Villibor, D. F. (1995) Pavimentos de Baixo Custo com Solos Lateríticos, Editora Villibor, São Paulo. 240 p.
- Pozzobom, C. E. (1997) Aplicações tecnológicas para a cinza do carvão mineral produzida no complexo termelétrico Jorge Lacerda. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis: UFSC. 122p.
- Rezende, L. R. (1999) Técnicas Alternativas para a Construção de Bases de Pavimentos Rodoviários. Dissertação de M.Sc., UnB, Brasília.
- Souza, M. L. (1980) Pavimentação rodoviária. Livros Técnicos e Científicos, 2a edicao, Rio de Janeiro.
- Vizcarra, G.O.C. (2010) Aplicabilidade de Cinzas de Resíduo Sólido Urbano Para Base de Pavimentos. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio.
- Winterkorn, H. F., Pamukcu, S. (1990) Soil Stabilization and Grouting. Foundation engineering handbook editado por Fang, Hsai-Yang. 2da edição.