

APLICABILIDADE DE CINZAS DE INCINERAÇÃO DE RESÍDUO SÓLIDO URBANO EM CAMADAS DE BASE DE PAVIMENTOS

Applicability of municipal solid waste incineration ash on pavements base layers

Michéle Dal Toé Casagrande*

Gino Omar Calderón Vizcarra**

Laura Maria Goretti da Motta ***

RESUMO – Este estudo apresenta a caracterização de cinzas obtidas da incineração de Resíduo Sólido Urbano (RSU) em usina geradora de energia elétrica, tendo como objetivo avaliar sua aplicabilidade em camadas de base de pavimentos rodoviários, através da mistura destas cinzas a um solo argiloso não-laterítico regional. Foram realizados ensaios de caracterização química, física e mecânica, para o solo puro e para o mesmo com a adição de diferentes teores de cinzas (20 e 40%), bem como o dimensionamento mecanístico-empírico para uma estrutura típica de pavimento. A cinza volante diminuiu a expansibilidade do material, apresentando um aumento no valor de CBR e módulo resiliente. Os resultados obtidos foram satisfatórios, sendo dependentes do teor e do tipo de cinza utilizado, ressaltando o emprego positivo da cinza volante de RSU para aplicação em camadas de base de pavimentos rodoviários.

ABSTRACT – This study presents the characteristics of Municipal Solid Waste (MSW) incineration ash obtained from electric energy generation plants, to evaluate the MSW ash applicability in road pavement base layers through the ash mixture with a non-lateritic regional clay soil. Chemical, physical, mechanical tests and the mechanistic-empirical design for a typical pavement structure were carried out on the pure soil and also in the soil mixture with the addition of different ash content (20 and 40%). Fly ash reduced the expansion of the material, showing an increase in the CBR and resilient modulus value. The results were satisfactory, being dependent on the content and type of ash used, highlighting the positive work of MSW fly ash for use on pavement base layers.

PALAVRAS CHAVE – Cinzas de incineração de Resíduo Sólido Urbano (RSU), cinza volante, cinza de fundo, estabilização de solos, base de pavimentos.

1 – INTRODUÇÃO

Em muitos lugares ao redor do mundo, onde existe alta demanda por materiais de construção comparados com a disponibilidade de materiais naturais, como também falta espaço para disposição de resíduos, a utilização de subprodutos e resíduos para construção de rodovias tem sido vista como uma solução apropriada para reduzir a quantidade de resíduos a dispor e fornecer materiais alternativos para a indústria da construção. Um caso típico de estes materiais alternativos são as cinzas de incineração de resíduos sólidos urbanos produzidos em usinas e que são usados para construção de rodovias (Badreddine e François, 2009).

* Professor Assistente, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. E-mail: michele_casagrande@puc-rio.br

** Engenheiro Civil, MSc, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. E-mail: ginocalderon@hotmail.com.

*** Professor Associado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. E-mail: laura@coc.ufrj.br

As características químicas de cinzas e resíduos são a maior preocupação respeito a sua classificação como resíduo perigoso ou não-perigoso e a escolha do tipo de disposição final que deveria ter (Wiles, 1996).

Dentro deste contexto, o presente trabalho avalia a aplicação de cinzas, obtidas da incineração de Resíduo Sólido Urbano (RSU) em usinas geradoras de energia elétrica, para sua utilização em camadas de base de pavimentos rodoviários, através da mistura destas cinzas com um solo argiloso não-laterítico regional. Os resultados obtidos foram satisfatórios, ressaltando o emprego positivo da cinza volante de RSU para aplicação em camadas de base de pavimentos rodoviários.

1.1 – A incineração de resíduo sólido urbano

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, através do processo de incineração com co-geração de energia.

A Usina Verde recebe diariamente 30 toneladas de RSU da Companhia Municipal de Limpeza Urbana do Rio de Janeiro (Comlurb). A composição do RSU após o processo de reciclagem da Usina Verde encontra-se na Figura 1.

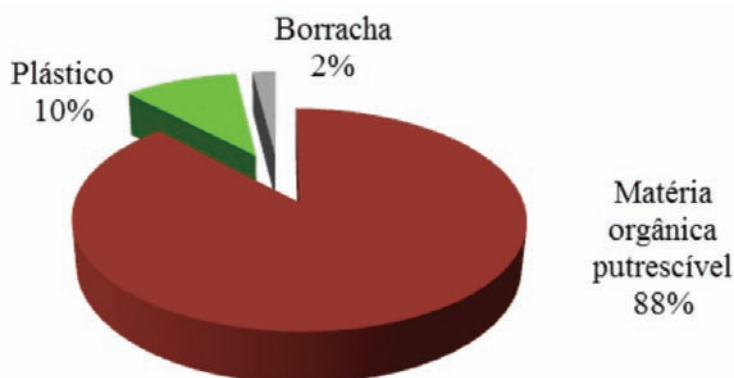


Fig. 1 – Composição do RSU (Fontes, 2008).

Na triagem, os materiais recicláveis são segregados manualmente e com o auxílio de detectores de metais. Em seguida o RSU é triturado e o material fino separado com o auxílio de peneira rotativa e encaminhado para secagem, visando a redução do teor de umidade. O RSU triturado passa por nova moagem, em moinho de facas, e é depositado em um silo. Estes resíduos são encaminhados para o forno de incineração, que opera a uma temperatura de 950°C. Durante o processo de combustão, são produzidas duas cinzas: a cinza de fundo e a cinza volante. A cinza de fundo é depositada no fundo da câmara de pós-combustão, encaminhada ao tanque de decantação e disposta em caçambas. Os gases quentes e a cinza volante (*fly-ash*) são exauridos da câmara de pós-combustão e aspirados para a caldeira de recuperação, onde ocorre o aproveitamento energético (co-geração de energia).

Posteriormente, os gases são neutralizados em um conjunto de lavadores e, em seguida, os gases limpos são aspirados e descarregados na atmosfera. A solução de lavagem é recolhida nos tanques de decantação onde ocorre a neutralização com as cinzas do próprio processo e hidróxido de cálcio, o que ocasiona a mineralização (decantação dos sais), sendo esta solução posteriormente reaproveitada no processo de lavagem (recirculação). Em seguida, a cinza volante é encaminhada para os tanques de decantação onde periodicamente é retirada e armazenada em caçambas (Figura 2).

Ao final do processo de incineração são obtidos de 8 a 10%, em volume, das duas cinzas, que representam cerca de 80% de cinza pesada (de fundo) e 20% de cinza volante (Fontes, 2008).

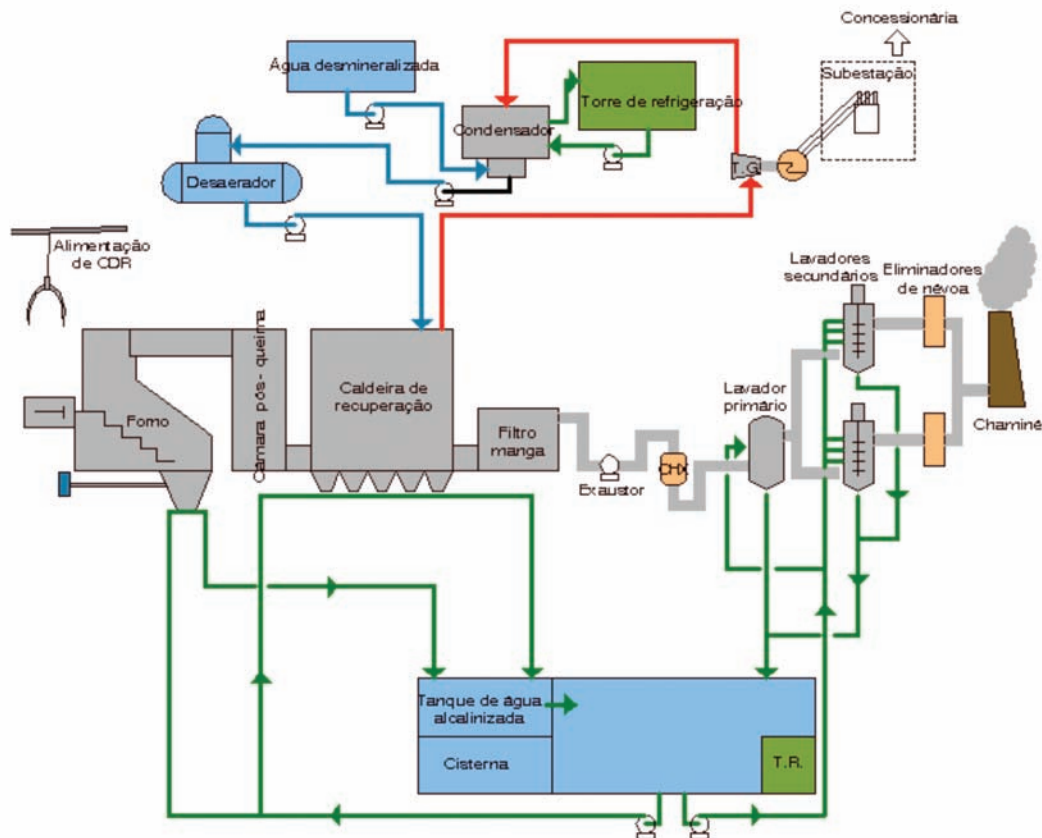


Fig. 2 – Processo de incineração do RSU.

2 – OBJETIVOS

O objetivo de este estudo é avaliar a influência da adição de cinzas de resíduo sólido urbano em:

- Deformabilidade do solo.
- Expansibilidade do solo.
- Espessura da camada de pavimento.

3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 – Materiais utilizados

O solo argiloso não-laterítico (Figura 3) é procedente de uma jazida localizada no município de Campo Grande/RJ. A cinza volante (Figura 4) e a cinza de fundo (Figura 5) são provenientes da queima do Resíduo Sólido Urbano (RSU) na Usina Verde, que fica localizada na Ilha do Fundão, município do Rio de Janeiro/RJ. Os símbolos utilizados neste estudo, que descrevem os materiais e misturas, estão apresentados no Quadro 1.



Fig. 3 – Solo da jazida de Campo Grande/RJ.



Fig. 4 – Cinza Volante de RSU da Usina Verde.



Fig. 5 – Cinza de Fundo de RSU da Usina Verde.

Quadro 1 – Símbolos referentes a cada material/mistura.

Material/Mistura	% de Solo	% de Cinza Volante	% de Cinza de Fundo	Símbolo
Solo	100	0	0	S
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

3.2 – Ensaios realizados

3.2.1 – Caracterização química, mineralógica e ambiental

A composição química total semi-quantitativa das amostras de cinzas foi obtida mediante a técnica “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 Estruturas da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

A análise mineralógica foi realizada mediante difração de Raios X com equipamento D8 Focus Bruker, também no Laboratório de Estruturas da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Ensaio de Lixiviação segundo a Norma NBR 10005:2004 (ABNT, 2004b) e Solubilização segundo a Norma NBR 10006:2004 (ABNT, 2004c) foram realizados com a finalidade de classificar as cinzas e a mistura solo-cinza segundo o procedimento descrito na norma NBR 10004:2004 (ABNT, 2004a).

3.2.2 – Caracterização física

Os ensaios de limite de liquidez (LL) e de plasticidade (LP) foram realizados, segundo a NBR 6459/84 (ABNT, 1984a) e NBR 7180/84 (ABNT, 1984b), respectivamente. A análise granulométrica foi realizada conforme a NBR 7181/84 (ABNT, 1984c), no solo destorroado e nas cinzas. Realizou-se este ensaio por meio de peneiramento e sedimentação. Para a etapa correspondente à sedimentação foram realizados ensaios com defloculante (hexametáfosfato de sódio).

A metodologia MCT (Nogami e Villibor, 1995) tem por objetivo a classificação de solos tropicais, foi desenvolvida segundo a norma DNER-ME 258/94 (DNER, 1994b).

O ensaio de compactação foi realizado na energia Proctor Modificado, segundo a norma NBR 7182/86 (ABNT, 1986), com o intuito de determinar a umidade ótima de compactação (w_{opt}) e a massa específica seca aparente máxima ($\gamma_{d_{max}}$), para o solo natural e as misturas solo-cinza, as quais foram umedecidas e armazenadas na câmara úmida, um dia prévio à compactação. Foi realizado utilizando um molde cilíndrico de 10 cm de diâmetro e altura de 12,73 cm. Aplicaram-se 27 golpes com um soquete metálico de 4,54 kg, caindo de uma altura de 45,72 cm até completar 5 camadas. Ao final do ensaio foram determinadas a umidade e massa específica seca aparente.

3.2.3 – Caracterização mecânica

3.2.3.1 – Ensaio de módulo de resiliência

Define-se Módulo de Resiliência (MR) de um solo como a relação entre a tensão desvio (σ_d) aplicada repetidamente em uma amostra de solo em ensaio triaxial e a correspondente deformação específica recuperável ou resiliente (ϵ_r). Conforme é mostrado na Equação 1 (DNER-ME 131/94 (DNER, 1994a), AASHTO TP46-94 (AASHTO, 1996)).

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (1)$$

onde: M_R : módulo de resiliência;

σ_d : tensão desvio cíclica ($\sigma_1 - \sigma_3$);

ϵ_r : deformação resiliente (vertical).

O ensaio de Módulo de Resiliência (MR) foi realizado conforme método proposto pela COPPE/UFRJ, apresentado em Medina e Motta (2005). Para a mistura S60/CV40, o ensaio se realizou com sete dias de cura do corpo de prova envolvido em sacolas de poliuretano para evitar a perda de umidade.

Os níveis de tensões aplicadas para obter o módulo resiliente são mostrados no Quadro 2.

Quadro 2 – Tensões aplicadas durante o ensaio de módulo resiliente.

σ_3 (MPa)	σ_d (MPa)	σ_1/σ_3
0,021	0,021	2
	0,041	3
	0,062	4
0,034	0,034	2
	0,069	3
	0,103	4
0,051	0,051	2
	0,103	3
	0,155	4
0,069	0,069	2
	0,137	3
	0,206	4
0,103	0,103	2
	0,206	3
	0,309	4
0,137	0,137	2
	0,275	3
	0,412	4

O Modelo Composto utilizado neste estudo relaciona o módulo de resiliência à tensão confinante e tensão desvio, conforme apresentado na Equação 2.

$$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \quad (2)$$

onde: M_R : módulo de resiliência (MPa);

σ_3 : pressão confinante (MPa);

σ_d : tensão desvio cíclica ($\sigma_1 - \sigma_3$) (MPa);

k_1 , k_2 e k_3 : coeficientes de regressão, derivados de resultados de ensaios em laboratório.

Foram moldados três corpos de prova por cada material ou mistura na umidade ótima e ensaiados no equipamento triaxial dinâmico da Universidade Federal do Rio de Janeiro, dos quais se obtiveram valores de Módulo Resiliente (MR) para diferentes valores de tensão, tanto confinante (σ_3) como desviadora (σ_d). A partir destes valores, conseguiu-se obter, por correlação estatística, os coeficientes k_1 , k_2 e k_3 do modelo composto, com a ajuda do Programa Computacional STATISTICA (Statsoft, 2004).

3.2.3.2 – Ensaio de deformação permanente

Os ensaios foram realizados conforme a metodologia descrita em Guimarães (2009), utilizando os mesmos moldes do ensaio de módulo resiliente. Um total de 500 000 ciclos de carga foram empregados para cada espécimen. Três ensaios foram realizados na mistura S60/CV40, na condição de máxima densidade seca, nos níveis de tensões apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 – Ensaio de deformação permanente.

Número de ensaio	σ_3 (MPa)	σ_d (MPa)
1	0,098	0,294
2	0,118	0,353
3	0,098	0,392

3.2.3.3 – Ensaio de CBR

O ensaio de CBR se realizou conforme a norma ABNT NBR 9895/87 - Solo – Índice de Suporte Califórnia (ABNT, 1987), na umidade ótima.

3.2.4 – Dimensionamento de Pavimento

Assumiu-se uma estrutura do pavimento tal como se apresenta na Figura 6, com dados de tráfego (Quadro 4) e clima da cidade do Rio de Janeiro, com a finalidade de ver o efeito da adição de cinza volante no solo num projeto de pavimentação. A espessura e propriedades mecânicas da camada asfáltica e de subleito permanecem constantes, e só a espessura da base é mudada, segundo os parâmetros de resiliência de cada material. Após a execução dos ensaios nas misturas e no solo puro, procedeu-se ao dimensionamento de uma rodovia, pelo método mecanístico-empírico, utilizando-se o programa computacional SisPAV (Franco, 2007).

Quadro 4 – Dados do tráfego.

Configuração	Rodas	Volume/ano	Carga (kg)
Eixo duplo	4	100 000	8200

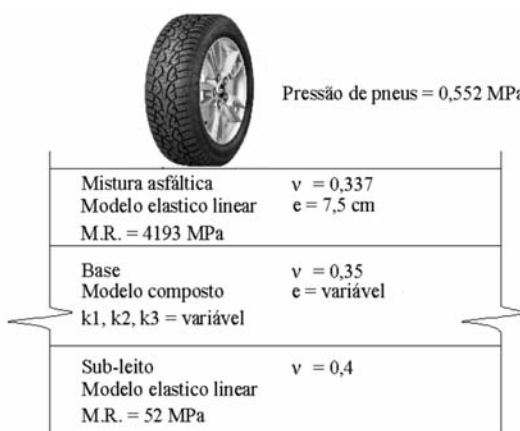


Fig. 6 – Estrutura do pavimento adotada.

4 – RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 – Caracterização química

A composição química do solo em estudo é apresentada no Quadro 5. Os componentes principais do solo, que são normalmente encontrados nos solos residuais, são SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , os quais participam ativamente do processo de estabilização química do solo (Rezende, 1999).

Quadro 5 – Compostos químicos predominantes do solo em estudo.

Composto	Concentração (%)
SiO_2	36,8 - 43,08
Al_2O_3	35,15 - 38,68
Fe_2O_3	13,45 - 20,96
TiO_2	0,93 - 1,76
K_2O	2,1 - 4,04

No Quadro 6, apresenta-se a composição química da cinza volante do RSU em estudo. Esta composição é comparada com a análise feita por Fontes (2008) sobre cinzas volantes de RSU da Usina Verde e também com análises de cinzas volantes de RSU de diversos países recopilados por Lam *et al.* (2010).

Quadro 6 – Composição química da cinza volante de RSU.

		Concentração (%)	
Composto	Vizcarra (2010)	Fontes (2008)	Lam <i>et al.</i> (2010)
SiO_2	12,9 - 21,2	44,26	6,35 - 27,52
Al_2O_3	12,2 - 15,4	18,16	0,92 - 12,7
Fe_2O_3	5,3 - 7,7	9,27	0,63 - 5,04
SO_3	5,2 - 9,8	0,64	5,18 - 14,4
CaO	32,3 - 45,3	15,39	16,6 - 45,42
Cl	4,7 - 6,6	–	–
TiO_2	3,3 - 4,7	3,25	0,85 - 3,12
K_2O	2,6 - 4,1	2,61	2,03 - 8,9
P_2O_5	0 - 1,28	2,94	1,56 - 2,7
ZnO	0,5 - 1,1	0,46	–
Cr_2O_3	0,1 - 0,2	0,16	–
MnO	0 - 0,1	0,13	–
SrO	0,1 - 0,2	0,04	–
ZrO_2	0,08 - 0,1	0,04	–
CuO	0 - 0,08	0,06	–

Quadro 6 (continuação) – Composição química da cinza volante de RSU.

Composto	Vizcarra (2010)	Concentração (%)	
		Fontes (2008)	Lam <i>et al.</i> (2010)
PbO	0 - 0,08	0,11	–
MgO	–	2,23	1,38 – 3,16
Na ₂ O	–	–	2,93 – 8,9
V ₂ O ₅	0 - 0,25	–	–

No Quadro 7, apresenta-se a composição química da cinza de fundo do RSU em estudo, a qual é comparada com o estudo feito por Arm (2003) e outros estudos recopilados por Lam (2010).

Quadro 7 – Composição química da cinza de fundo de RSU.

Composto	Vizcarra (2010)	Concentração (%)	
		Arm (2003)	Lam <i>et al.</i> (2010)
SiO ₂	27,0 - 37,7	46	5,44 – 49,38
Al ₂ O ₃	14,1 - 19,1	10	1,26 – 18
Fe ₂ O ₃	6,6 - 10,0	9	1,21 – 13,3
SO ₃	1,3 - 3,6	–	0,5 – 12,73
CaO	20,1 - 31,8	15	13,86 – 50,39
Cl	2,3 - 3,8	–	–
TiO ₂	3,6 - 5,5	–	0,92 – 2,36
K ₂ O	2,1 - 3,0	–	0,88 – 7,41
P ₂ O ₅	0 - 1,0	–	0,85 – 6,9
ZnO	0,9 - 1,8	–	–
Cr ₂ O ₃	0 - 0,19	–	–
MnO	0,10 - 0,16	–	–
SrO	0,05 - 0,14	–	–
ZrO ₂	0,11 - 0,12	–	–
CuO	0 - 0,344	–	–
Ac	0 - 0,036	–	–
Br	0 - 0,009	–	–
Rb ₂ O	0 - 0,014	–	–
MgO	0 - 1,722	2	1,6 – 3,3
Na ₂ O	–	–	3,3 – 17,19
V ₂ O ₅	0 - 0,43	–	–

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 das cinzas de RSU.

4.2 – Caracterização mineralógica

Nas Figuras 7, 8 e 9 são apresentados os resultados dos ensaios de Difração de raios-X no solo, cinza volante de RSU e cinza de fundo de RSU respectivamente. Na Figura 7, pode ser identificada a presença de Muscovita, Gehlenita, Quartzo, Calcita, Dolomita e Hematita, também encontrados por Fontes (2008).

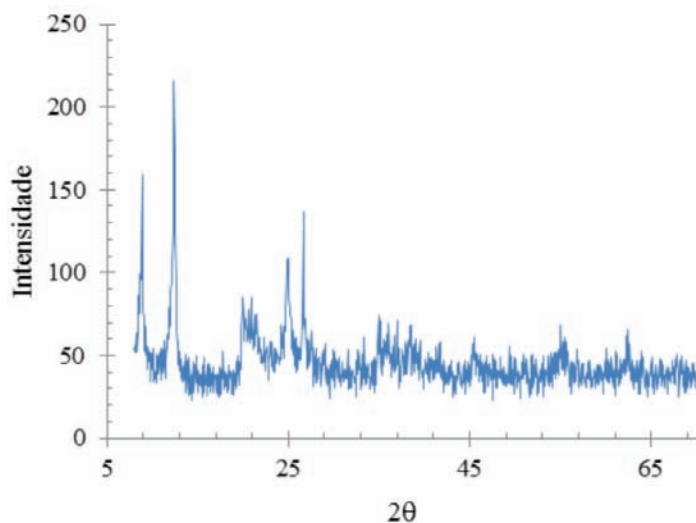


Fig. 7 – Difração de raios-X do solo em estudo.

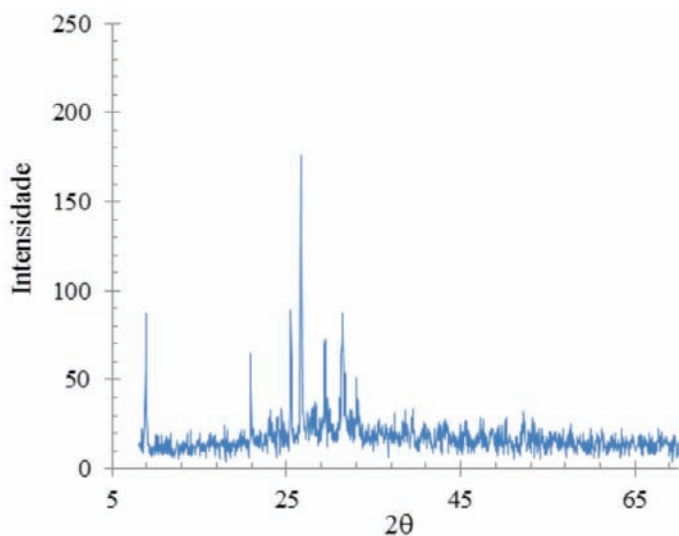


Fig. 8 – Difração de raios-X da cinza volante.

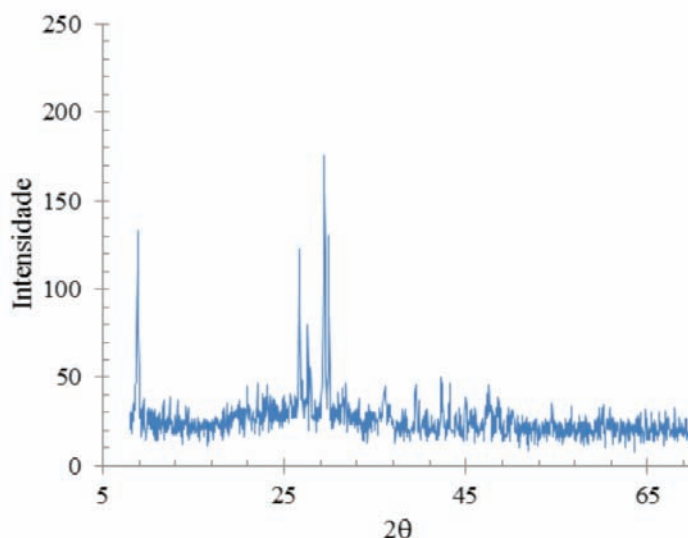


Fig. 9 – Difração de raios-X da cinza de fundo.

4.3 – Caracterização ambiental

4.3.1 – Cinza Volante

As concentrações de parâmetros inorgânicos do ensaio de Lixiviação são apresentadas no Quadro 8.

Quadro 8 – Resultados do Ensaio de Lixiviação - Parâmetros Inorgânicos na Cinza Volante.

Parâmetros	Resultados analíticos (mg/L)	VMP	Método de Referência
Arsênio	0,27	1	SM21 3120 B
Bário	0,52	70	SM21 3120 B
Cádmio	0,05	0,5	SM21 3120 B
Chumbo	< 0,03	1	SM21 3120 B
Cromo Total	0,75	5	SM21 3120 B
Fluoretos	2,01	150	SM21 4500-F C
Mercúrio	< 0,0005	0,1	EPA 7470 A
Prata	0,02	5	SM21 3120 B
Selênio	< 0,05	1	SM21 3120 B

VMP: Valor máximo permitido segundo a norma NBR 10004:2004 (ABNT, 2004a).

As concentrações de parâmetros inorgânicos do ensaio de Solubilização são apresentadas na Quadro 9.

Os parâmetros inorgânicos apresentados no Quadro 8 como também os parâmetros orgânicos encontrados no extrato obtido no ensaio de lixiviação tem concentrações menores que os limites máximos estabelecidos no anexo F da Norma NBR 10004:2004 (ABNT, 2004a), pelo que o resíduo é classificado como não perigoso.

Quadro 9 – Resultados do Ensaio de Solubilização - Parâmetros Inorgânicos na Cinza Volante.

Parâmetros	Resultados analíticos (mg/L)	VMP	Método de Referência
Alumínio	0,31	0,2	SM21 3120 B
Arsênio	< 0,001	0,01	SM21 3120 B mod
Bário	0,41	0,7	SM21 3120 B
Cádmio	< 0,003	0,005	SM21 3120 B
Chumbo	< 0,002	0,01	SM21 3113 B
Cianetos	< 0,005	0,07	SM21 4500-CN C/4500-CN F
Cloretos	783	250	SM21 4500- Cl ⁻ D
Cobre	0,01	2	SM21 3120 B
Cromo Total	1,99	0,05	SM21 3120 B
Ferro	0,22	0,3	SM21 3120 B
Fluoretos	0,56	1,5	SM21 4500-F C
Manganês	< 0,002	0,1	SM21 3120 B
Mercurio	< 0,0005	0,001	EPA 7470 A
Nitrato (como N)	2,10	10	SM21 4500- NO ₃ ⁻ F
Prata	< 0,003	0,05	SM21 3120 B
Selênio	< 0,002	0,01	SM21 3113 B
Sódio	85,2	200	SM21 3120 B
Sulfato (expresso como SO ₄)	650	250	SM21 4500- SO ₄ ⁻² E
Surfactantes	< 0,40	0,5	SM21 5540 C
Zinco	0,04	5	SM21 3120 B

VMP: Valor máximo permitido segundo a norma NBR 10004:2004 (ABNT, 2004a).

Os parâmetros inorgânicos apresentados no Quadro 9 como também os parâmetros orgânicos encontrados no extrato obtido no ensaio de solubilização têm concentrações menores que os limites máximos estabelecidos no anexo G da Norma NBR 10004:2004 (ABNT, 2004a), exceto o Alumínio, Cloretos, Cromo Total e Sulfatos, pelo que o resíduo é classificado como Não-inerte.

4.3.2 – Cinza de Fundo

As concentrações de parâmetros inorgânicos do ensaio de Lixiviação são apresentadas no Quadro 10.

Os parâmetros inorgânicos apresentados no Quadro 10 como também os parâmetros orgânicos encontrados no extrato obtido no ensaio de lixiviação têm concentrações menores que os limites máximos estabelecidos no anexo F da Norma NBR 10004:2004 (ABNT, 2004a), pelo que o resíduo é classificado como não perigoso.

Quadro 10 – Resultados do Ensaio de Lixiviação - Parâmetros Inorgânicos na Cinza de Fundo.

Parâmetros	Resultados analíticos (mg/L)	VMP	Método de Referência
Arsênio	< 0,04	1	SM21 3120 B
Bário	0,68	70	SM21 3120 B
Cádmio	0,06	0,5	SM21 3120 B
Chumbo	< 0,03	1	SM21 3120 B
Cromo Total	0,03	5	SM21 3120 B
Fluoretos	1,30	150	SM21 4500-F C
Mercúrio	< 0,0005	0,1	EPA 7470 A
Prata	< 0,003	5	SM21 3120 B
Selênio	< 0,05	1	SM21 3120 B

VMP: Valor máximo permitido segundo a norma NBR 10004:2004 (ABNT, 2004a).

As concentrações de parâmetros inorgânicos do ensaio de Solubilização são apresentadas no Quadro 11.

Os parâmetros inorgânicos apresentados no Quadro 11 como também os parâmetros orgânicos encontrados no extrato obtido no ensaio de solubilização têm concentrações menores que os limites máximos estabelecidos no anexo G da Norma NBR 10004:2004 (ABNT, 2004a), exceto Cloretos, e Sulfatos, pelo que o resíduo é classificado como Não-inerte.

Quadro 11 – Resultados do Ensaio de Solubilização - Parâmetros Inorgânicos na Cinza de Fundo.

Parâmetros	Resultados analíticos (mg/L)	VMP	Método de Referência
Alumínio	0,08	0,2	SM21 3120 B
Arsênio	< 0,001	0,01	SM21 3120 B mod
Bário	0,19	0,7	SM21 3120 B
Cádmio	< 0,003	0,005	SM21 3120 B
Chumbo	< 0,002	0,01	SM21 3113 B
Cianetos	< 0,005	0,07	SM21 4500-CN C/4500-CN F
Cloretos	271	250	SM21 4500- Cl- D
Cobre	0,02	2	SM21 3120 B
Cromo Total	< 0,002	0,05	SM21 3120 B
Ferro	0,06	0,3	SM21 3120 B
Fluoretos	0,56	1,5	SM21 4500-F C
Manganês	< 0,002	0,1	SM21 3120 B
Mercúrio	< 0,0005	0,001	EPA 7470 A

VMP: Valor máximo permitido segundo a norma NBR 10004:2004 (ABNT, 2004a).

Quadro 11 (continuação) – Resultados do Ensaio de Solubilização - Parâmetros Inorgânicos na Cinza de Fundo.

Parâmetros	Resultados analíticos (mg/L)	VMP	Método de Referência
Nitrato (como N)	3,80	10	SM21 4500- NO ₃ ⁻ F
Prata	< 0,003	0,05	SM21 3120 B
Selênio	< 0,002	0,01	SM21 3113 B
Sódio	236	200	SM21 3120 B
Sulfato (expresso como SO ₄)	290	250	SM21 4500- SO ₄ ⁻² E
Surfactantes	< 0,40	0,5	SM21 5540 C
Zinco	0,11	5	SM21 3120 B

VMP: Valor máximo permitido segundo a norma NBR 10004:2004 (ABNT, 2004a).

4.3.3 – Mistura S60/CV40: Solo (60%) – Cinza Volante (40%)

As concentrações de parâmetros inorgânicos do ensaio de Lixiviação são apresentadas no Quadro 12, e as de parâmetros inorgânicos do ensaio de Solubilização são apresentadas no Quadro 13.

Os parâmetros inorgânicos apresentados no Quadro 12 como também os parâmetros orgânicos encontrados no extrato obtido no ensaio de lixiviação tem concentrações menores que os limites máximos estabelecidos no anexo F da Norma NBR 10004:2004 (ABNT, 2004a), pelo que o resíduo é classificado como não perigoso.

Os parâmetros inorgânicos apresentados no Quadro 13 como também os parâmetros orgânicos encontrados no extrato obtido no ensaio de solubilização têm concentrações menores que os limites máximos estabelecidos no anexo G da Norma NBR 10004:2004 (ABNT, 2004a), exceto o Alumínio, Cloretos, Cromo Total e Sulfatos, pelo que o resíduo é classificado como Não-inerte.

Quadro 12 – Resultados do Ensaio de Lixiviação - Parâmetros Inorgânicos na mistura de Solo (60%) com Cinza Volante (40%).

Parâmetros	Resultados analíticos (mg/L)	VMP	Método de Referência
Arsênio	0,08	1	SM21 3120 B
Bário	0,42	70	SM21 3120 B
Cádmio	0,007	0,5	SM21 3120 B
Chumbo	< 0,03	1	SM21 3120 B
Cromo Total	0,25	5	SM21 3120 B
Fluoretos	1,70	150	SM21 4500-F C
Mercúrio	< 0,0005	0,1	EPA 7470 A
Prata	< 0,003	5	SM21 3120 B
Selênio	< 0,05	1	SM21 3120 B

VMP: Valor máximo permitido segundo a norma NBR 10004:2004 (ABNT, 2004a).

Quadro 13 – Resultados do Ensaio de Solubilização - Parâmetros Inorgânicos na mistura de Solo (60%) com Cinza Volante (40%).

Parâmetros	Resultados analíticos (mg/L)	VMP	Método de Referência
Alumínio	0,70	0,2	SM21 3120 B
Arsênio	< 0,001	0,01	SM21 3120 B mod
Bário	0,20	0,7	SM21 3120 B
Cádmio	< 0,003	0,005	SM21 3120 B
Chumbo	< 0,002	0,01	SM21 3113 B
Cianetos	< 0,005	0,07	SM21 4500-CN C/4500-CN F
Cloretos	389	250	SM21 4500- Cl ⁻ D
Cobre	0,06	2	SM21 3120 B
Cromo Total	0,88	0,05	SM21 3120 B
Ferro	0,09	0,3	SM21 3120 B
Fluoretos	0,76	1,5	SM21 4500-F C
Manganês	< 0,002	0,1	SM21 3120 B
Mercúrio	< 0,0005	0,001	EPA 7470 A
Nitrato (como N)	0,90	10	SM21 4500- NO ₃ ⁻ F
Prata	< 0,003	0,05	SM21 3120 B
Selênio	< 0,002	0,01	SM21 3113 B
Sódio	362	200	SM21 3120 B
Sulfato (expresso como SO ₄)	600	250	SM21 4500- SO ₄ ⁻² E
Surfactantes	< 0,40	0,5	SM21 5540 C
Zinco	0,03	5	SM21 3120 B

4.4 – Caracterização física

4.4.1 – Granulometria

São apresentadas na Figura 10, as curvas granulométricas do solo, cinza volante e cinza de fundo, mostrando o caráter arenoso das cinzas.

4.4.2 – Limites de Atterberg

Os Limites de Atterberg para as cinzas puras não puderam ser determinados, devido ao comportamento granular do material, que durante o ensaio não apresentou características plásticas para a sua realização. A inserção da cinza volante diminui o limite líquido e o índice de plasticidade, e aumenta o limite plástico do solo, como mostrado na Figura 11.

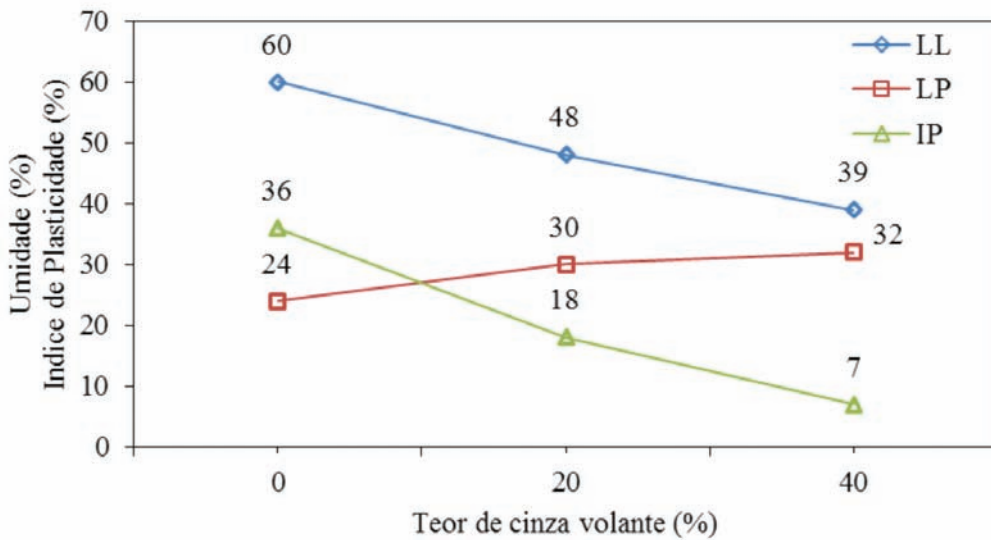
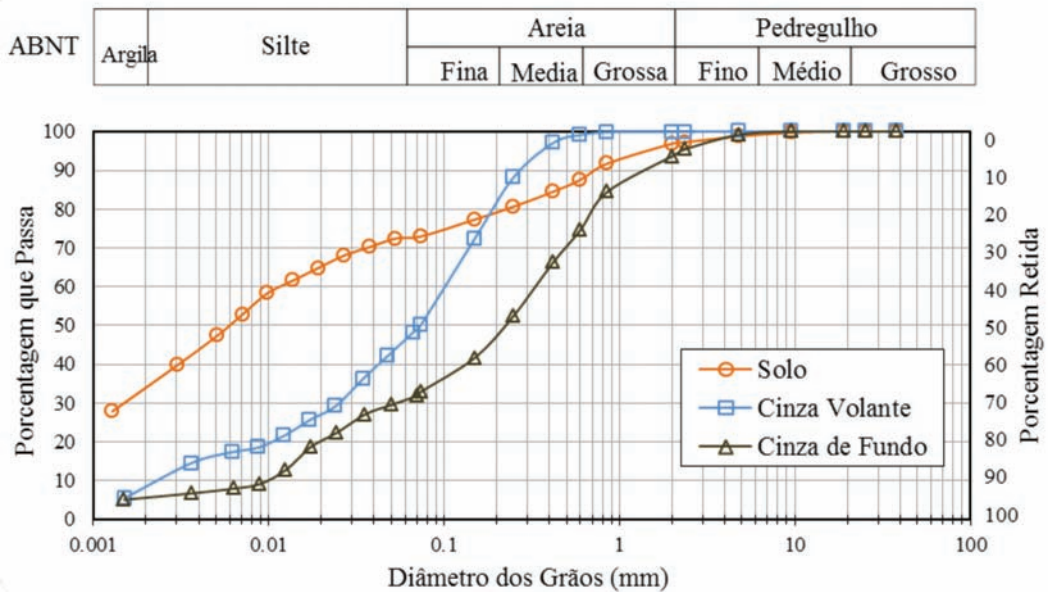


Fig. 11 – Variação dos Limites de Atterberg e índice de plasticidade com o teor de cinza volante.

Na Figura 12, é apresentado o efeito da adição de cinza de fundo no solo. A tendência é a mesma que a da cinza volante, reduzindo o índice de plasticidade.

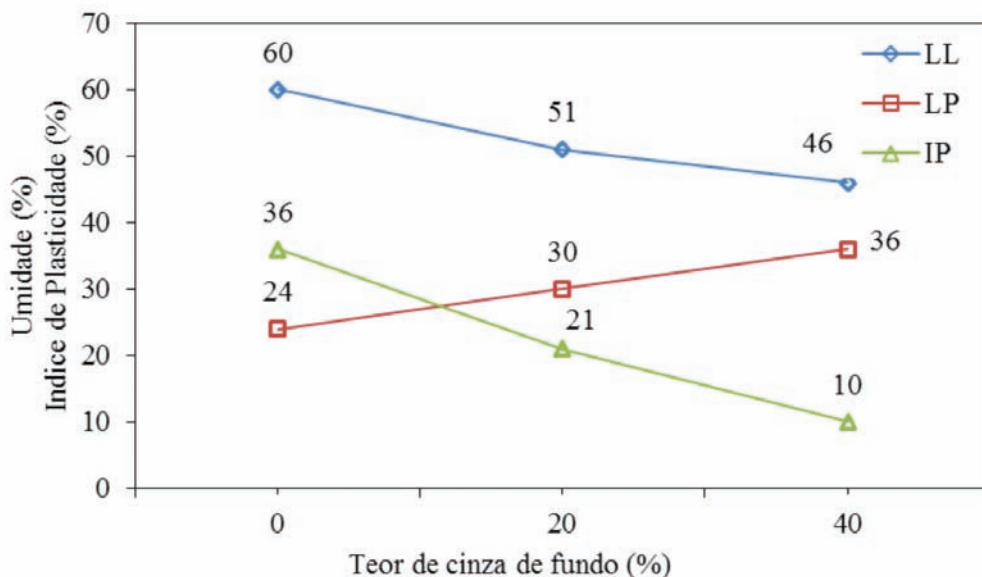


Fig. 12 – Variação dos Limites de Atterberg e índice de plasticidade com o teor de cinza de fundo.

4.4.3 – Classificação MCT

Com relação à classificação MCT foram obtidos os seguintes parâmetros: $c'=1,62$; $d'=50,0$; $e'=1,39$. O solo é classificado como NG', de comportamento "não-laterítico-argiloso" (Figura 13). 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 expansibi-

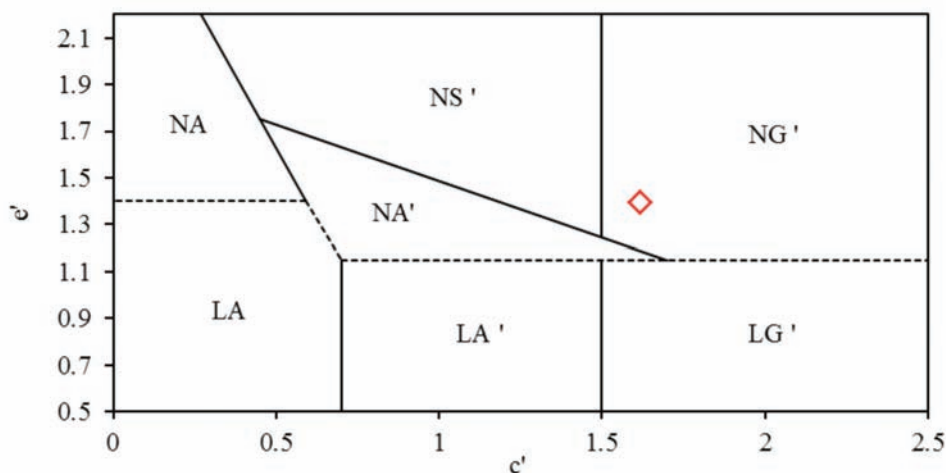


Fig. 13 – Classificação MCT.

lidade, plasticidade, compressibilidade e contração, quando submetidos à secagem; seu emprego não é recomendado para base de pavimentos, sendo uns dos solos piores para fins de pavimentação, dentre os solos tropicais (Nogami e Villibor, 1995).

4.4.4 – Compactação

Das curvas de compactação do solo e das misturas com cinza volante, obtidas a partir dos ensaios de Proctor Modificado, pode-se indicar que, ao aumentar o teor de cinza volante na mistura, a máxima densidade aparente seca tende a diminuir. Reparou-se também que o teor de umidade ótima decresce para um teor de 20% de cinza volante e cresce para um teor de 40% (Figura 14). Como pode ser observado na Figura 15, ao aumentar o teor de cinza de fundo na mistura, a máxima densidade aparente seca tende a diminuir. O teor de umidade ótima decresce para os teores de 20% e 40% de cinza de fundo.

Em contraste com o solo natural, é de interesse notar que para uma considerável variação do teor de umidade, somente uma pequena mudança na massa específica aparente seca acontece nas misturas de solo com cinzas. Isto sugere que as misturas podem ser compactadas numa ampla faixa de teores de umidade para atingir a densidade de campo desejada.

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

Material ou mistura	w _{otm} (%)	γ _d _{max} (g/cm³)
S	18,5	1,718
S80/CV20	14,3	1,650
S60/CV40	22,5	1,555
S80/CF20	16,5	1,672
S60/CF40	16,0	1,622

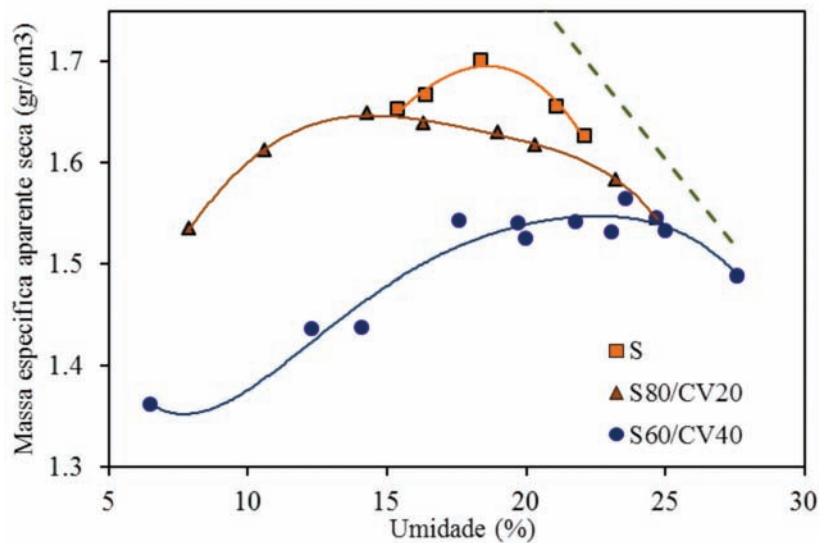


Fig. 14 – Curva de compactação do solo e misturas com cinza volante.

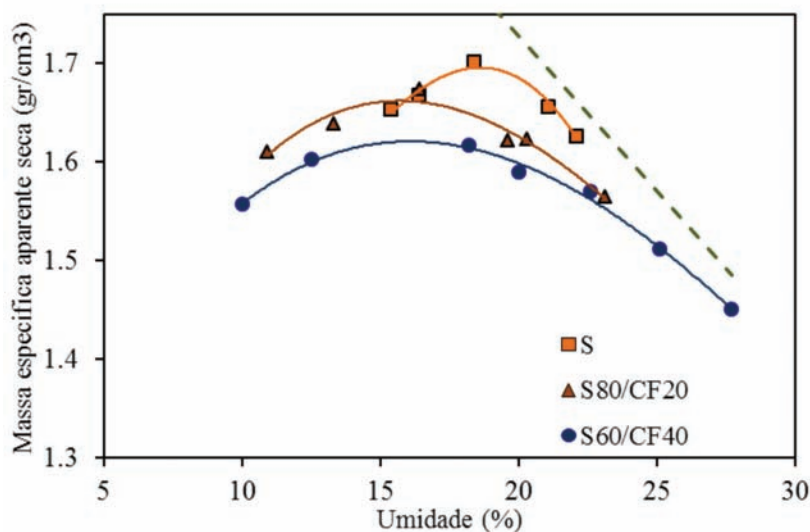


Fig. 15 – Curva de compactação do solo e misturas com cinza de fundo.

4.5 – Caracterização mecânica

4.5.1 – Módulo resiliente

As Figuras 16, 17 e 18 esquematizam superfícies no espaço tridimensional $\sigma_3 \times \sigma_d \times MR$ para uma faixa de tensões normalmente experimentadas em pavimentos, as quais foram geradas por ajuste baseados no modelo Composto. O propósito de se obter tais superfícies é para previsão de Módulos Resilientes para diversas combinações de tensão confinante e desviadora.

Os resultados obtidos dos ensaios de Módulo de Resiliência demonstram que o solo em estudo é dependente da tensão desviadora e, mesmo adicionando as cinzas, este comportamento não muda. Dos modelos obtidos, aprecia-se que, quanto maior a tensão desviadora, menor o valor do Módulo Resiliente.

A mistura com 20% de cinza volante melhorou o comportamento mecânico do solo puro, a mistura com 40% de cinza volante piorou o comportamento mecânico, mas melhorou com o tempo de cura (Figura 19). Outro fator de influência é o número de ciclos de carregamento (Figura 20). O módulo resiliente melhorou com o carregamento cíclico.

Quadro 15 – Valores dos coeficientes do Modelo Composto para cada mistura, compactados na umidade ótima.

Material ou mistura	k_1	k_2	k_3
S	185,2712	0,1772	-0,4197
S80/CV20	305,5556	0,2939	-0,4708
S60/CV40 (*)	181,3510	0,2364	-0,4482
S60/CV40 (**)	311,1900	0,2100	-0,3400
S80/CF20	120,3640	0,1259	-0,5194
S60/CF40	112,3940	0,0799	-0,3898

(*) Com 7 dias de cura após compactação.

(**) Com 21 dias de cura após compactação.

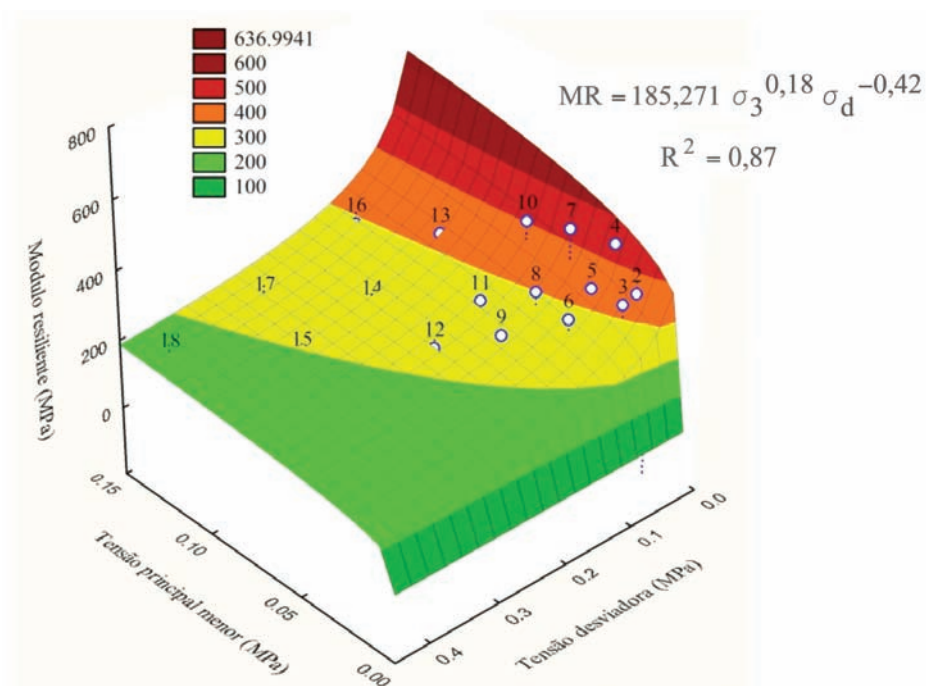


Fig. 16 – Gráfico 3D do modelo composto do Módulo Resiliente do solo puro.

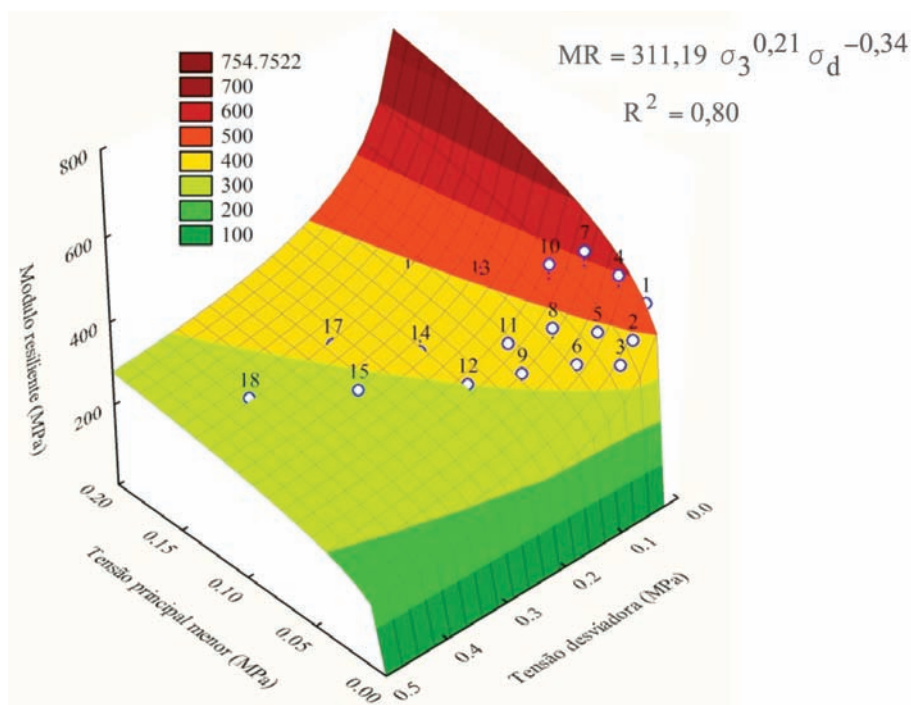


Fig. 17 – Gráfico 3D do modelo composto do Módulo Resiliente da mistura S60/CV40 com 21 dias de cura.

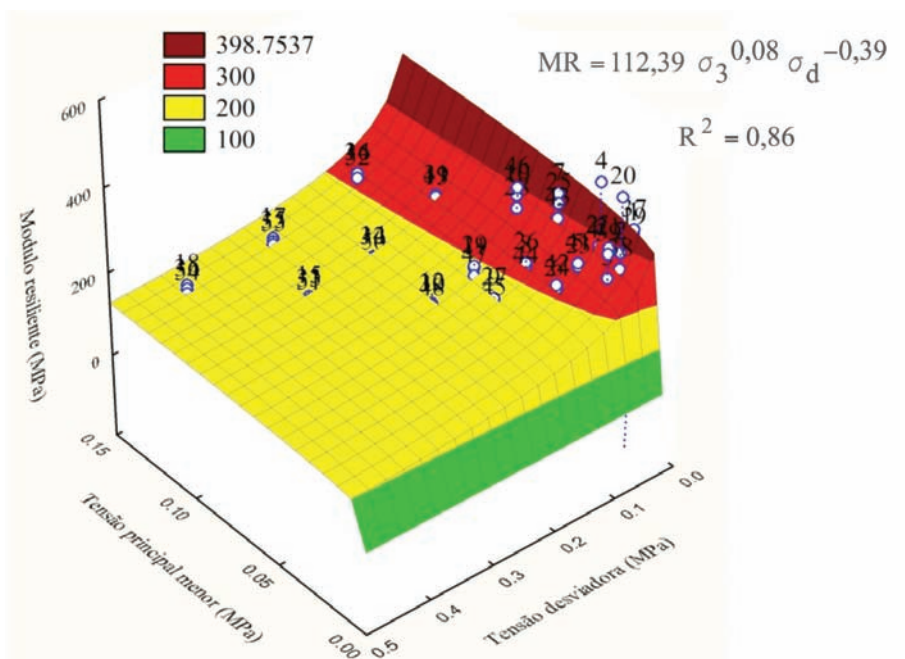


Fig. 18 – Gráfico 3D do modelo composto do Módulo Resiliente da mistura S60/CF40.

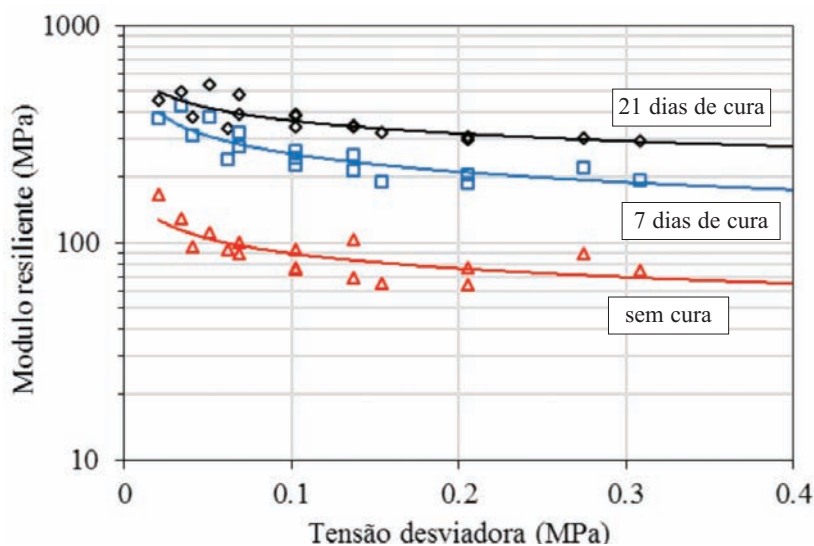


Fig. 19 – Módulo resiliente vs. tensão do solo com 40% de cinza volante – variação do tempo de cura.

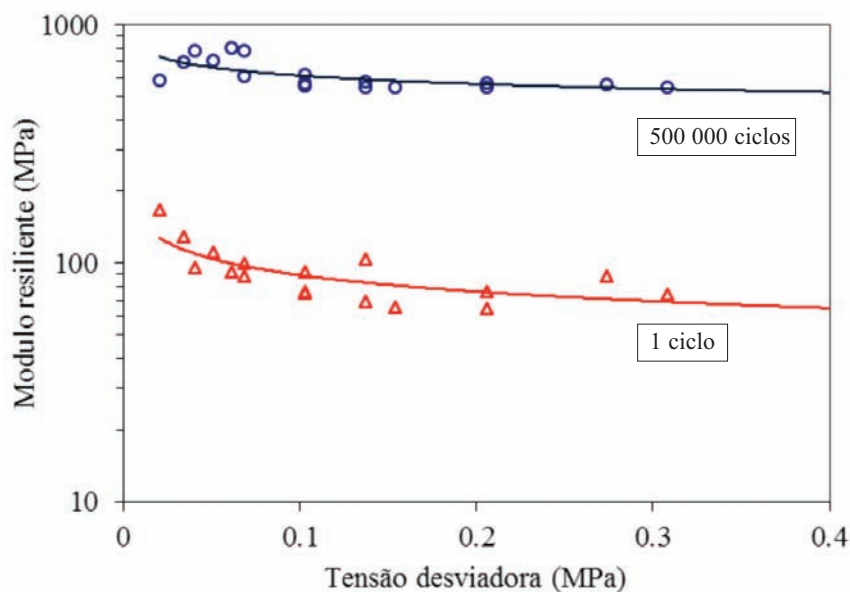


Fig. 20 – Módulo resiliente vs. tensão do solo com 40% de cinza volante – variação do número de ciclos.

A mistura com 20% de cinza volante foi avaliada para vários teores de umidade. Os resultados indicaram que o módulo resiliente aumentou com o decaimento do teor de umidade (Figura 21).

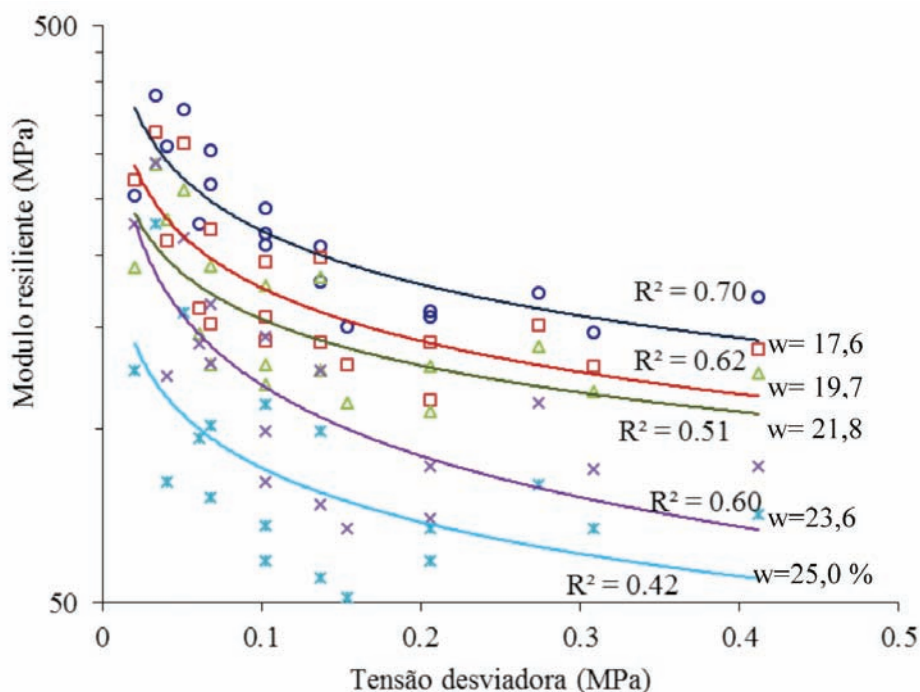


Fig. 21 – Módulo resiliente vs. Tensão do solo com 20% de cinza volante – variação da umidade.

4.5.2 – Deformação permanente

Como mostrado na Figura 22, a deformação permanente tende a estabilizar atingindo um platô. É observado que o teste 3 tem uma alta deformação permanente, isto devido ao incremento de tensões aplicadas no ensaio.

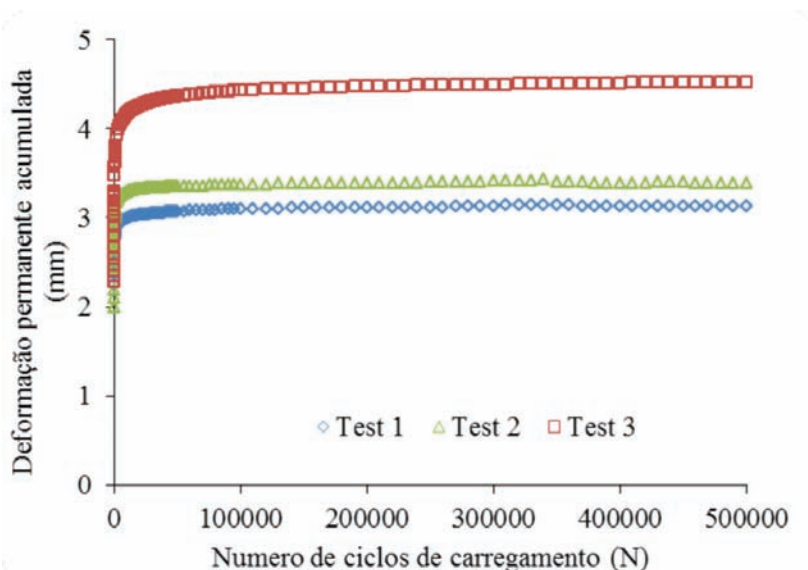


Fig. 22 – Deformação permanente acumulada ao longo dos ciclos de aplicação de cargas.

O módulo resiliente é incrementado com o número de ciclos de carregamento (Figura 23). Isto pode ser explicado pela diminuição da deformação elástica (Figura 24).

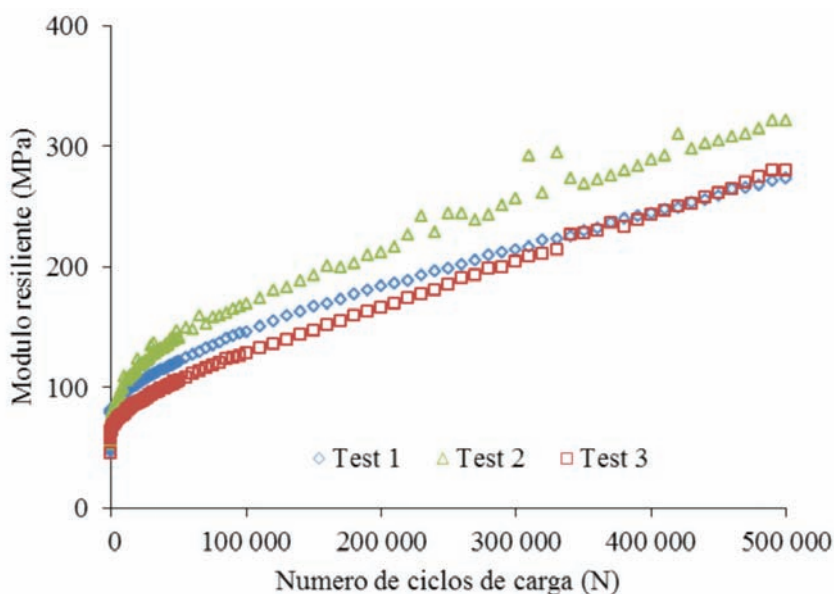


Fig. 23 – Variação do módulo resiliente ao longo do ensaio de deformação permanente.

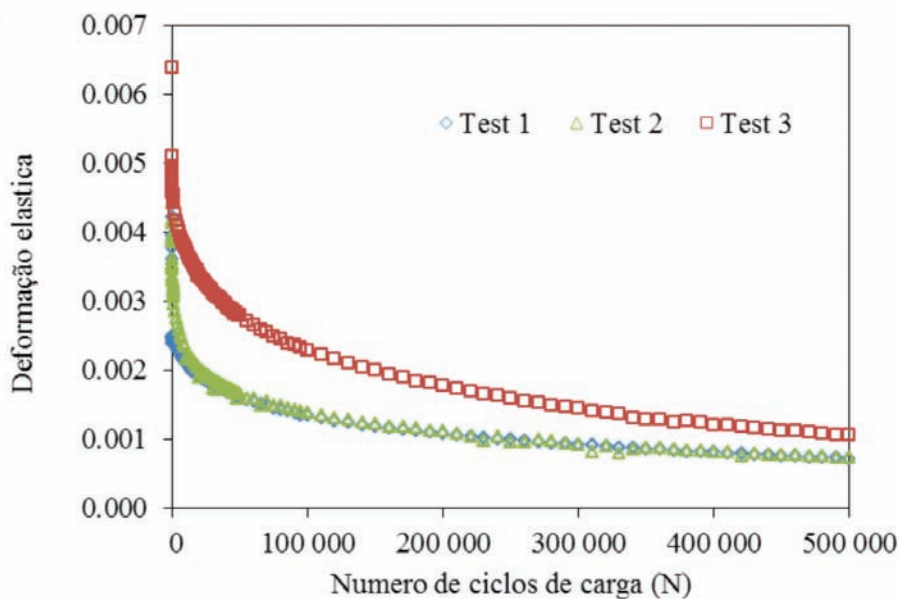


Fig. 24 – Variação de deformação elástica ao longo do ensaio de deformação permanente.

Foi pesquisada a ocorrência da acomodação plástica (Shakedown) utilizando um modelo de comportamento desenvolvido por Dawson e Wellner, citado por Werkmeister (2003). Os resultados do ensaio de deformação permanente para a mistura solo – cinza volante, são apresentados na Figura 25, visando a pesquisa do Shakedown.

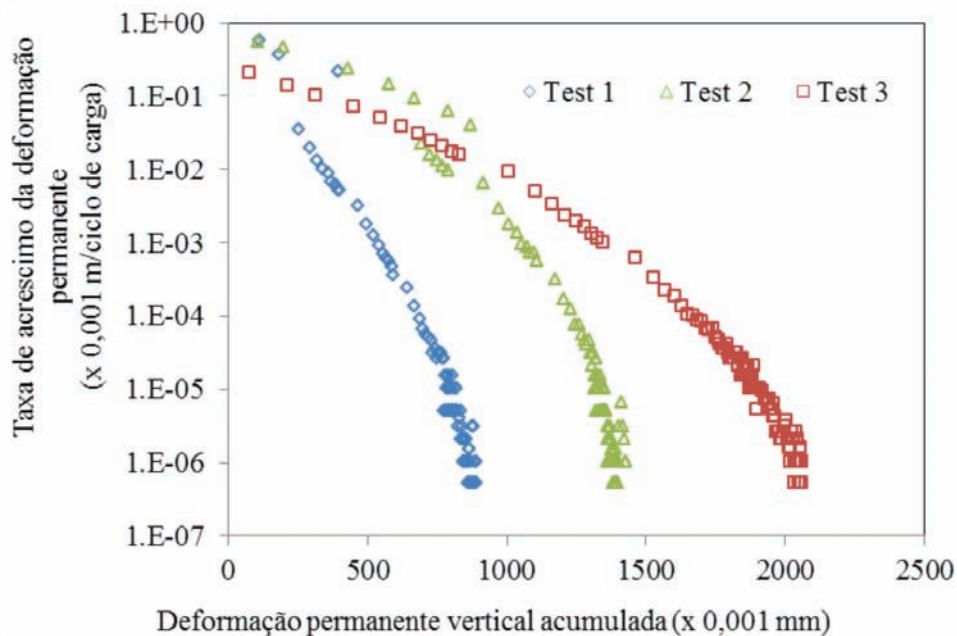


Fig. 25 – Pesquisa da ocorrência do Shakedown.

Analisando a Figura 25, se percebe que todos os ensaios conduzidos com a mistura solo-cinza volante, apresentaram um típico comportamento de nível A, ou seja, mostraram o acomodamento plástico (shakedown), conforme o modelo proposto por Werkmeister (2003). A caracterização do comportamento de nível A se dá tanto pela forma da curva, aproximadamente paralela ao eixo vertical, quanto pelo fato da taxa de acréscimo da deformação permanente ter atingido a ordem de grandeza de 10^{-7} ($\times 10^{-3}$ m/ciclo de carga). Ou seja, nos ciclos finais de aplicação de carga, o corpo-de-prova teve sua deformação permanente aumentada em apenas 10^{-7} mm a cada novo ciclo.

Werkmeister *et al.* (2004) menciona que no nível A, o material tem uma resposta de comportamento plástico até um numero finito de aplicações de carga, mas depois de se completar o período de pós-compactação, a resposta vem a ser completamente resiliente e não mais acontecem deformações permanentes. Um pavimento nesta condição teria um comportamento de equilíbrio estável na sua resposta às cargas.

Pyo (2012) realizou testes de carregamento cíclico em solos moles, encontrou resultados semelhantes aos mostrados na Figura 23, onde o Módulo Resiliente cresce com o número de ciclos de carga, este comportamento aparece no comportamento do nível A. Guimarães (2009) também encontrou resultados similares testando lateritas, britas e solo residual em determinados estados de tensões.

O modelo de Uzan (Uzan, 1982) foi utilizado para a previsão da deformação permanente tendo como resultado a equação seguinte:

$$\varepsilon_p/\varepsilon_r = 0,4268.N^{-0,2945} \quad (2)$$

A curva de correlação com os resultados dos testes são apresentados na Figura 26.

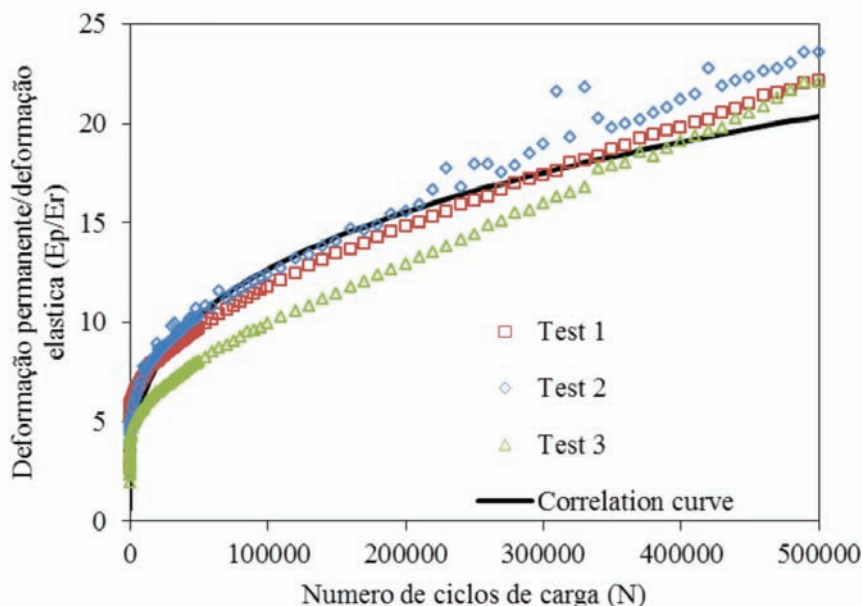


Fig. 26 – Curva de correlação do modelo de Uzan.

4.5.3 – CBR

Os valores de expansão apresentam-se na Figura 27. Observa-se que a cinza volante diminui a expansibilidade do material, quanto maior for o seu teor, em contrapartida, teores altos de cinza

volante quando adicionados ao solo podem piorar o seu comportamento mecânico, resultando em uma maior espessura de camada, como se observa na Figura 29. A cinza de fundo também diminuiu a expansibilidade do solo, embora não tenha sido tão eficiente como a cinza volante, ressaltando-se que o comportamento de misturas com cinzas deve ser cuidadosamente avaliado para diversos teores, analisando-se resultados físicos, químicos, ambientais e mecânicos em conjunto.

A adição de cinza volante aumentou o valor do CBR do solo puro em 16 vezes, enquanto que a inserção da cinza de fundo aumentou em 4 vezes o valor do CBR do solo puro (Figura 28).

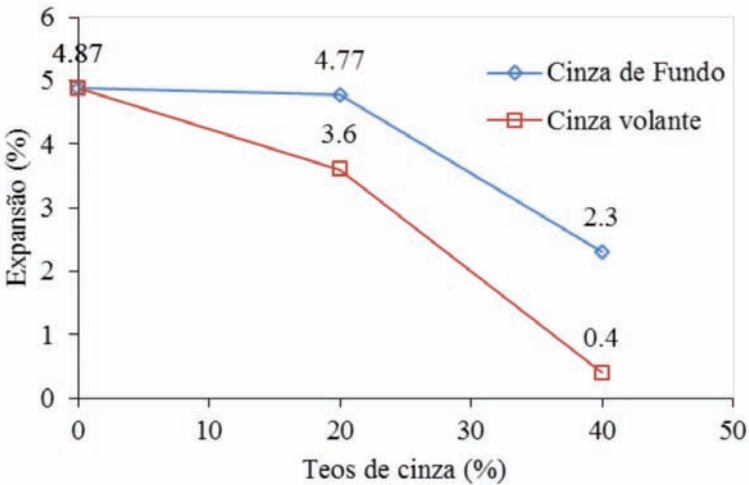


Fig. 27 – Variação da expansão do solo com o teor de cinza aos 4 dias de imersão.

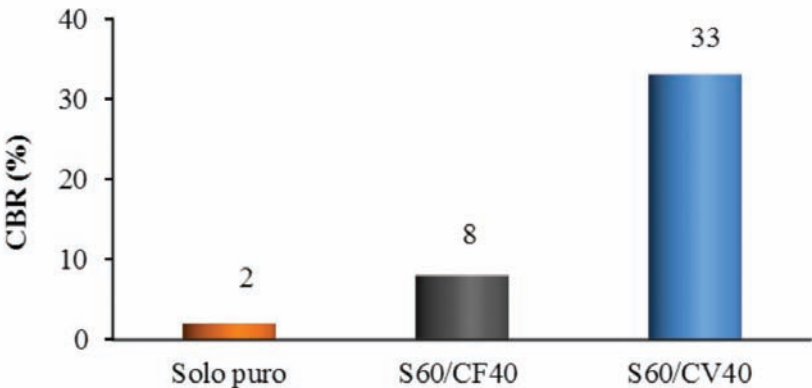


Fig. 28 – Valores de CBR na umidade ótima.

4.3 – Dimensionamento do pavimento típico

Dos ensaios de Módulo Resiliente, notou-se que as misturas com Cinza Volante apresentam maiores valores do Módulo Resiliente que as misturas com Cinza de Fundo, pelo que o dimensionamento do pavimento se fez só com este tipo de Cinza. A Figura 29 apresenta as espessuras de camadas em função do período de projeto para cada tipo de mistura, as quais foram obtidas mediante o programa computacional SisPav (Franco, 2007). A mistura com 20% de cinza volante

melhorou o comportamento mecânico do solo puro, o que se revela pela diminuição da espessura da camada de base em comparação ao solo puro, para um mesmo nível de carregamento e mesmos parâmetros (critérios) de dimensionamento.

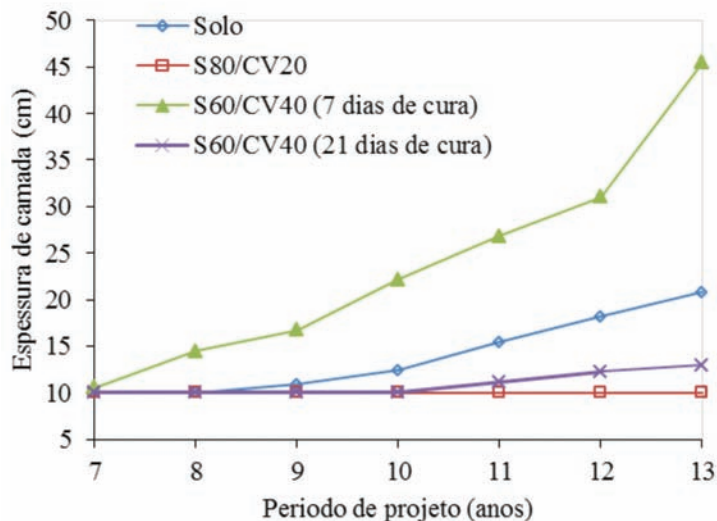


Fig. 29 – Variação das espessuras de camada em função do período de projeto.

5 – CONCLUSÕES

Caracterizaram-se os materiais estudados com o intuito de conhecer suas propriedades físicas, químicas e mecânicas. As propriedades do solo foram modificadas pela ação das cinzas. Estas mudanças foram influenciadas por parâmetros tais como teor de cinza, umidade, tempo de cura e número de ciclos de carga.

O solo puro estudado apresentou comportamento mecânico, em termos de módulo resiliente e expansibilidade, inapropriado para bases de pavimentos. Os ensaios conduzidos com as misturas solo-cinza volante e solo-cinza de fundo procuraram pesquisar a influência destas cinzas no comportamento mecânico, sendo que a cinza volante, em teor de 40% e com tempo de cura mínimo de 21 dias, conseguiu melhorar o desempenho do solo em termos de módulo resiliente e expansibilidade.

Foram realizadas análises ambientais caracterizando as cinzas como resíduo não perigoso – não inerte, o qual potencializa a utilização destes resíduos em base de pavimentos. Estes resultados iniciais deverão ser complementados com outros ensaios que nos permitam dar viabilidade ambiental.

Através dos resultados obtidos conclui-se que as misturas com inserção de cinzas de RSU apresentaram um comportamento mecânico compatível com as exigências de um pavimento de baixo volume de tráfego, sendo que isto dependerá da utilização de teores de cinza e umidades adequados.

6 – AGRADECIMENTOS

Os autores querem expressar seus agradecimentos ao CNPq pelo apoio financeiro (Projeto MCT/CNPq 14/2009, Processo 480748/2009-8), à Usina Verde pelo fornecimento das cinzas para o estudo realizado e ao Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da COPPE/UFRJ, que permitiu a realização dos ensaios desta pesquisa.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (1996) AASHTO TP46-94 – *Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C..
- ABNT (1984a) NBR 6459/84 – *Determinação do Limite de Liquidez*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT (1984b) NBR 7180/84 – *Determinação do Limite de Plasticidade*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT (1984c) NBR 7181/84 – *Análise Granulométrica*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT (1986) NBR 7182/86 – *Ensaio de Compactação*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT (1987) NBR 9895/87 – *Solo – Índice de Suporte Califórnia*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT (2004a) NBR 10004/04: *Resíduos Sólidos – Classificação*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT (2004b) NBR 10005/04: *Lixiviação de Resíduos – Procedimento*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT (2004c) NBR 10006/04: *Solubilização de Resíduos – Procedimento*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- 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.
- Badreddine, R.; François, D. (2009) – *Assessment of the PCDD/F fate from MSWI residue used in road construction in France*, Chemosphere, Volume 74, Issue 3, January 2009, pp 363-369.
- DNER (1994a) DNER-ME 131/94 – *Solos – Determinação do Módulo de Resiliência. Método de Ensaio*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.
- DNER (1994b) DNER-ME 258/94 – *Solos compactados em equipamento miniatura – Mini - MCV. Método de Ensaio*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.
- Fontes, C. M. A. (2008) – *Utilização das cinzas de lodo de esgoto e de resíduo sólido urbano em concretos de alto desempenho*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Franco, F. A. C. P. (2007) – *Método de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos asfálticos - SisPAV*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Guimarães, A. C. R. (2009) – “Um Método Mecânico Empírico para a Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos”, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Lam, Charles H. K.; Ip, Alvin W. M.; Barford, John Patrick; McKay, Gordon (2010) – *Use of Incineration MSW Ash: A Review*. Sustainability 2, No. 7: 1943-1968.
- Medina, J., Motta, L. M. G. (2005) – *Mecânica dos Pavimentos*. 2ª Edição. Editora UFRJ. Rio de Janeiro. Brasil. 570 p.

- Nogami, J. S., Villibor, D. F. (1995) – *Pavimentos de Baixo Custo com Solos Lateríticos*, Editora Villibor, São Paulo. 240 p.
- Pyo, Sang Chul (2012) – *Study of Non-Linear Stress Distribution and Permanent Deformation of Unbound Pavement Layers with Soft Subgrade under Various Stabilization Measures*. PhD Thesis. North Carolina State University.
- Rezende, L. (1999) – *Técnicas Alternativas para a Construção de Bases de Pavimentos Rodoviários*. Dissertação de M.Sc., UnB, Brasília, DF, Brasil.
- Statsoft, Inc. (2004) – Programa computacional *Statistica 7.0*. E.U.A.
- Uzan J. (1982) – *Permanent Deformation in Pavement Design and Evaluation*. Technion. Israel Institute of Technology.
- 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.
- Werkmeister, S. (2003) – *Permanent Deformation Behavior of Unbound Granular Materials in Pavement Construction*. Thesis. Technical University of Dresden, 2003.
- Werkmeister, S., Dawson, A. R., Wellner, F. (2004) – *Pavement Design Model for Unbound Granular Materials*. Journal of Transportation Engineering, Vol. 130, No. 5, September. ASCE.
- Wiles, C. (1996) – *Municipal solid waste combustion ash: State-of-the-knowledge*. Journal of Hazardous Materials. Vol. 47, p. 325-344.