

4

Apresentação e Discussão dos Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados e as análises dos ensaios descritos no capítulo anterior, para as amostras de solo, cinza volante, cinza de fundo e misturas estudadas. Como o objetivo desta dissertação é avaliar as cinzas de RSU quanto ao potencial de uso como um material aditivo para aplicação em base de pavimentos de baixo volume de tráfego, 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.

4.1

Ensaio de Caracterização Física

4.1.1

Massa Específica Real dos Grãos

Os resultados obtidos para massa específica real dos grãos encontram-se listados nas Tabelas 4.1 e 4.2 e Figuras 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1 – 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	2,691
S60/CV40	40	2,678
Cinza Volante (CV)	100	2,412

Tabela 4.2 – 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	2,679
S60/CF40	40	2,607
Cinza de Fundo (CF)	100	2,434

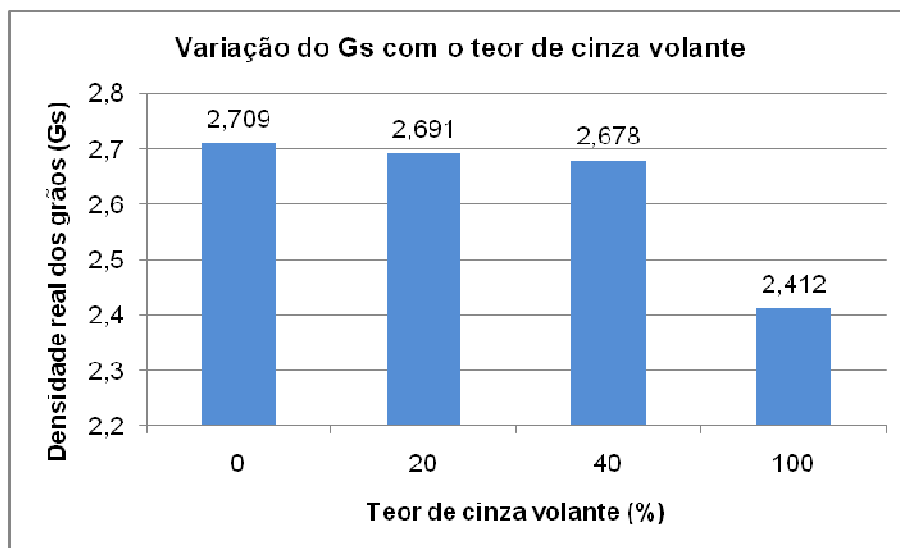


Figura 4.1 – Variação da massa específica real dos grãos com o teor de cinza volante neste estudo.

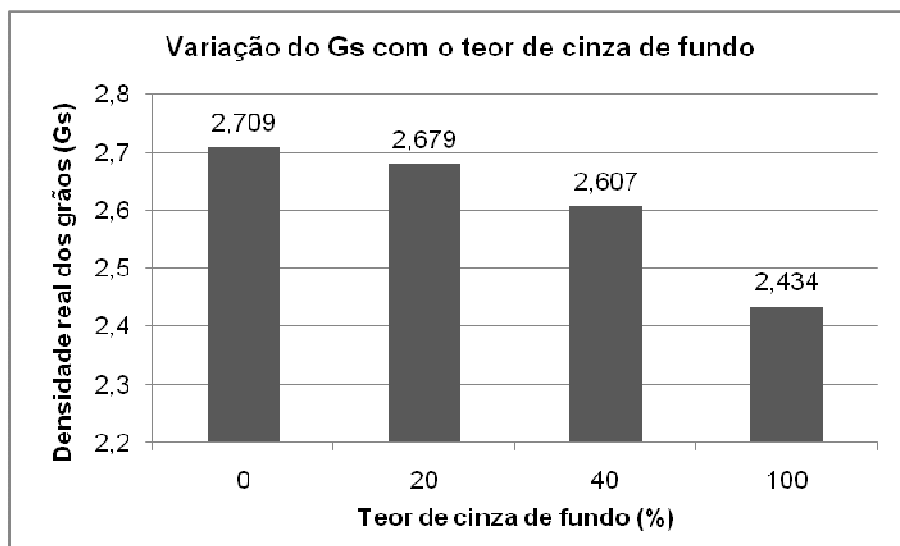


Figura 4.2 – Variação da massa específica real dos grãos com o teor de cinza de fundo neste estudo.

Os resultados indicam que ao adicionar cinza volante o Gs diminui, o mesmo acontece ao adicionar cinza de fundo devido às menores massas específicas destas cinzas.

4.1.2.

Limites de Atterberg

Os resultados de Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade e Índice de Plasticidade do solo com adição de cinza volante são apresentados na Tabela 4.3 e Figuras 4.3 e 4.4.

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 4.4 e Figuras 4.5 e 4.6.

Tabela 4.3 – 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	48	30	18
S60/CV40	40	39	32	7

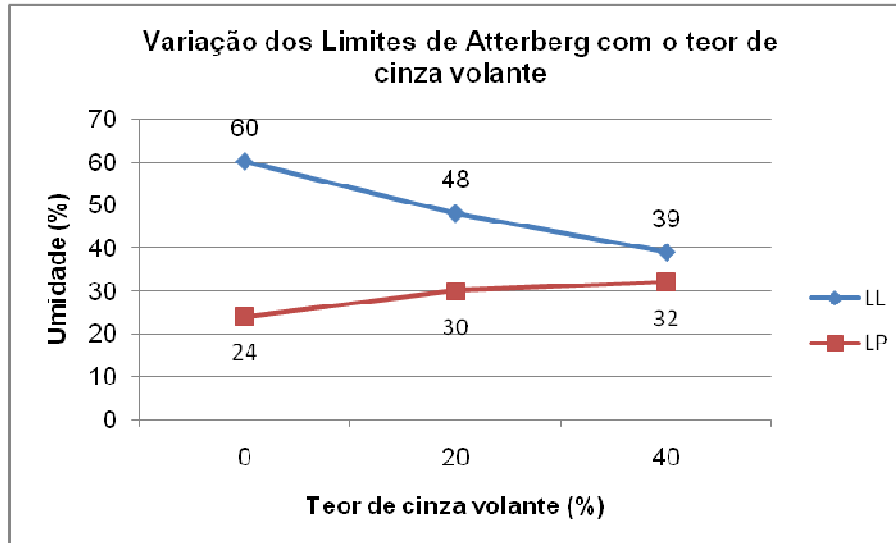


Figura 4.3 – Variação dos Limites de Atterberg com o teor de cinza volante neste estudo.

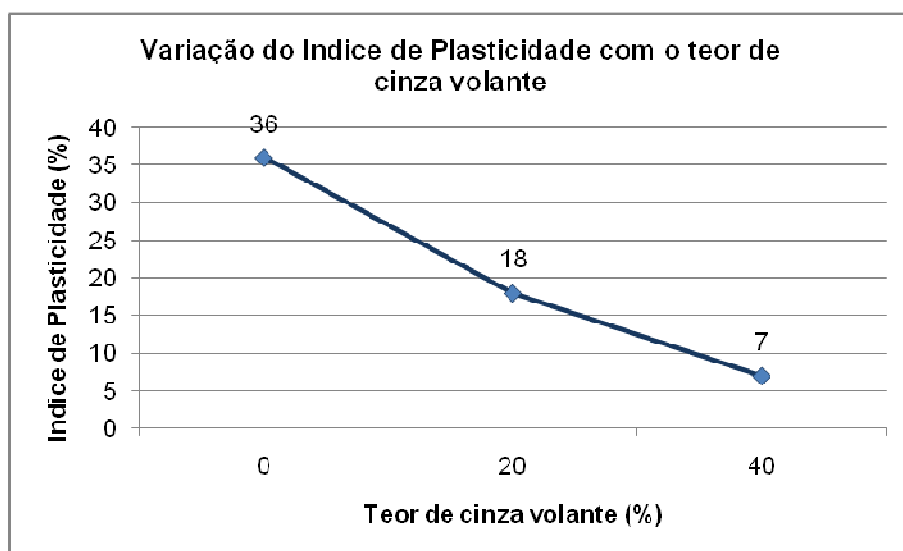


Figura 4.4 – Variação do Índice de Plasticidade com o teor de cinza volante neste estudo.

Tabela 4.4 – 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	36
S80/CF20	20	51	30	21
S60/CF40	40	46	36	10

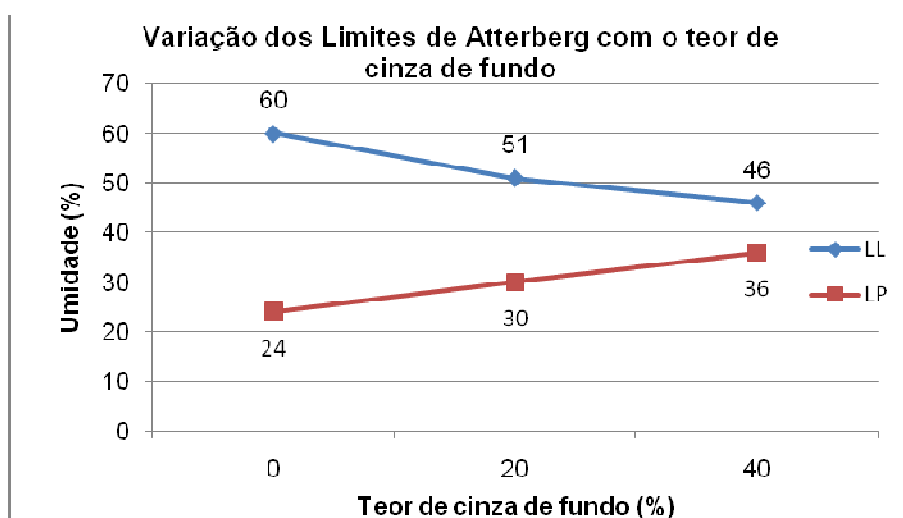


Figura 4.5 – Variação dos Limites de Atterberg com o teor de cinza de fundo deste estudo.

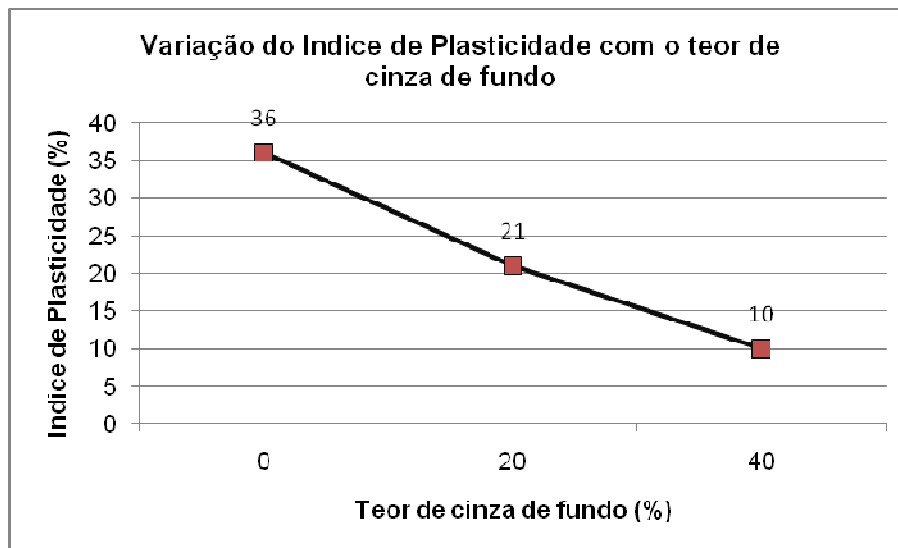


Figura 4.6 – Variação do Índice de Plasticidade com o teor de cinza de fundo deste estudo.

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. Os resultados são apresentados na Figura 4.7. Teores maiores reduzem pouco mais estes parâmetros.

NALBANTOGLU (2004) testou uma cinza volante de carvão para avaliar o seu efeito estabilizador sobre dois solos expansivos da ilha de Chipre. No seu estudo determinou que a inserção da cinza volante diminui o índice de plasticidade de solos altamente plásticos, mas tem menor influência no índice de plasticidade de solos de baixa plasticidade. Ele atribui que partículas menores, maiores superfícies específicas e menor cristalinidade fazem com que os minerais de argila tenham maior susceptibilidade à ação da cinza. Uma comparação é ilustrada na Figura 4.8.

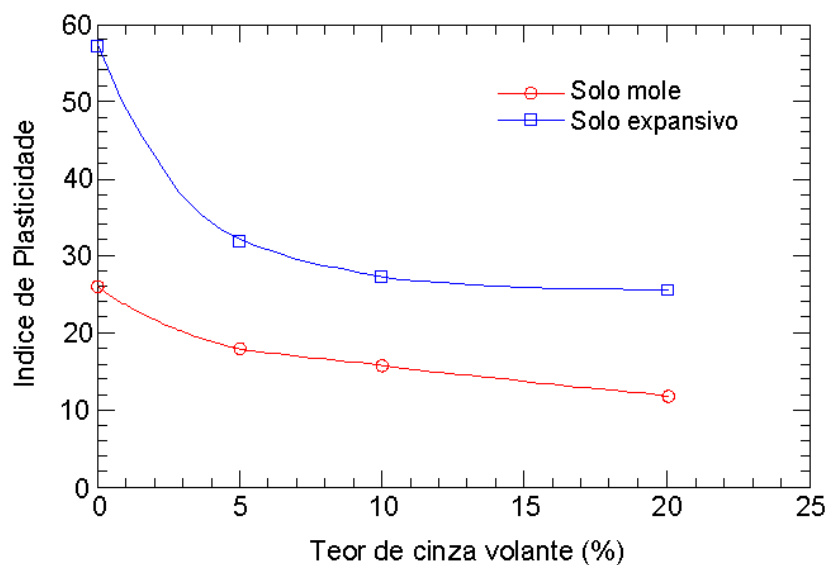


Figura 4.7 – Efeito da estabilização com cinza volante sobre a plasticidade de solos estabilizados (adaptado de BIN-SHAFIQUE, 2009).

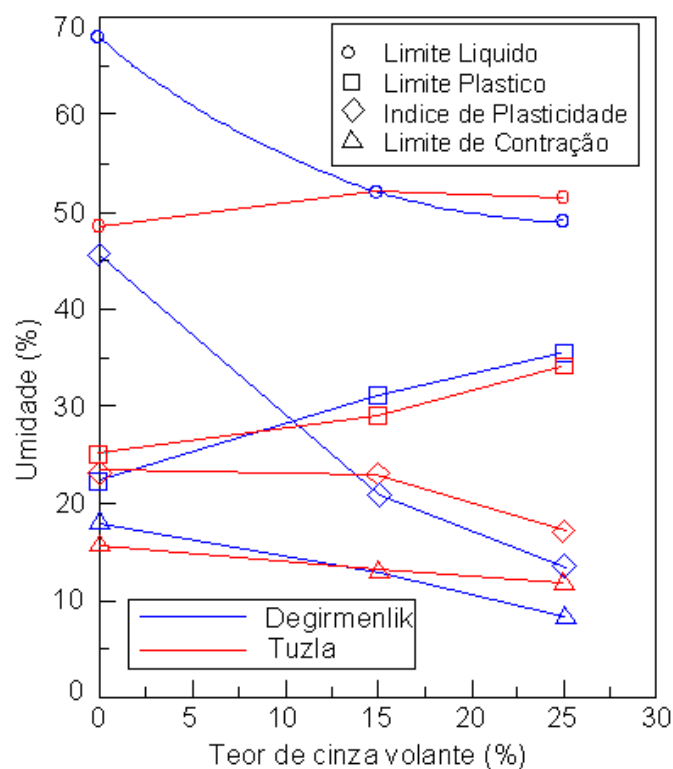


Figura 4.8 – Efeito da cinza volante sobre o índice de plasticidade e limite de contração linear de solos de Degirmenlik e Tuzla, estabilizados com cinza volante (adaptado de NALBANTOGLU, 2004).

4.1.3.

Análise Granulométrica

A Figura 4.9 apresenta as curvas granulométricas do solo, cinza volante e da cinza de fundo. A Figura 4.10 apresenta as curvas granulométricas do solo, cinza volante e misturas do solo com 20% e 40% de cinza volante.

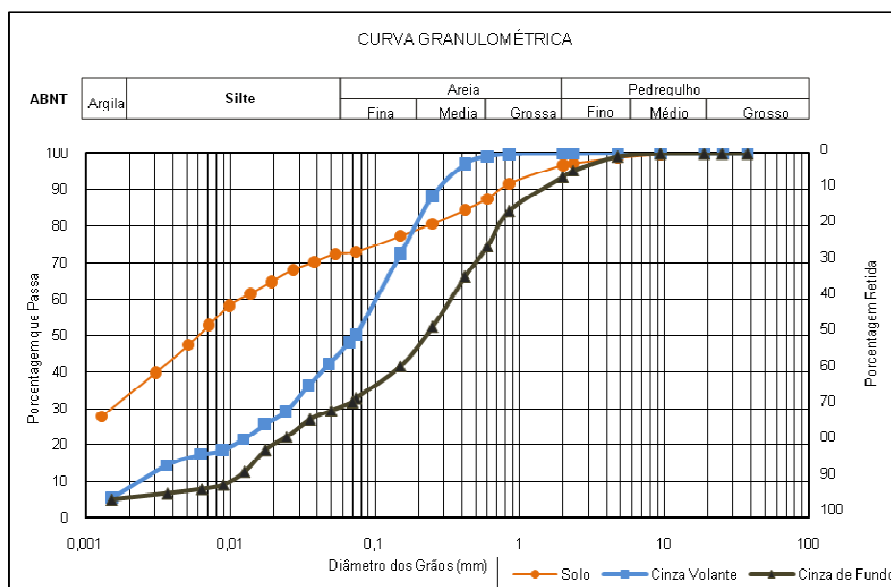


Figura 4.9 – Curvas Granulométricas do solo, cinza de fundo e cinza volante deste estudo.

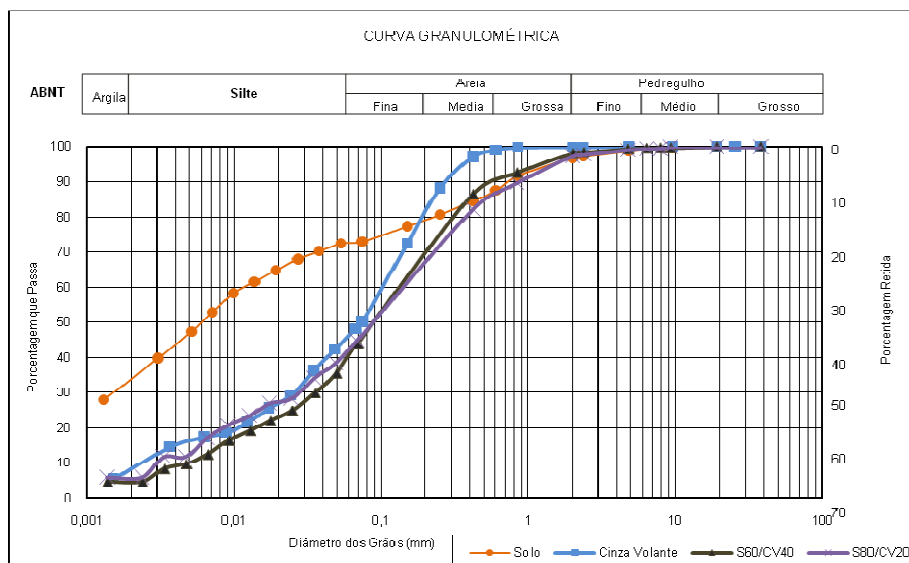


Figura 4.10 – Curvas Granulométricas do solo, cinza volante e misturas do solo com 20% e 40% de cinza volante deste estudo.

As curvas granulométricas das misturas com a cinza volante ficaram com uma granulometria mais graúda que a do solo e da cinza separadamente (Figura 4.10), 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.

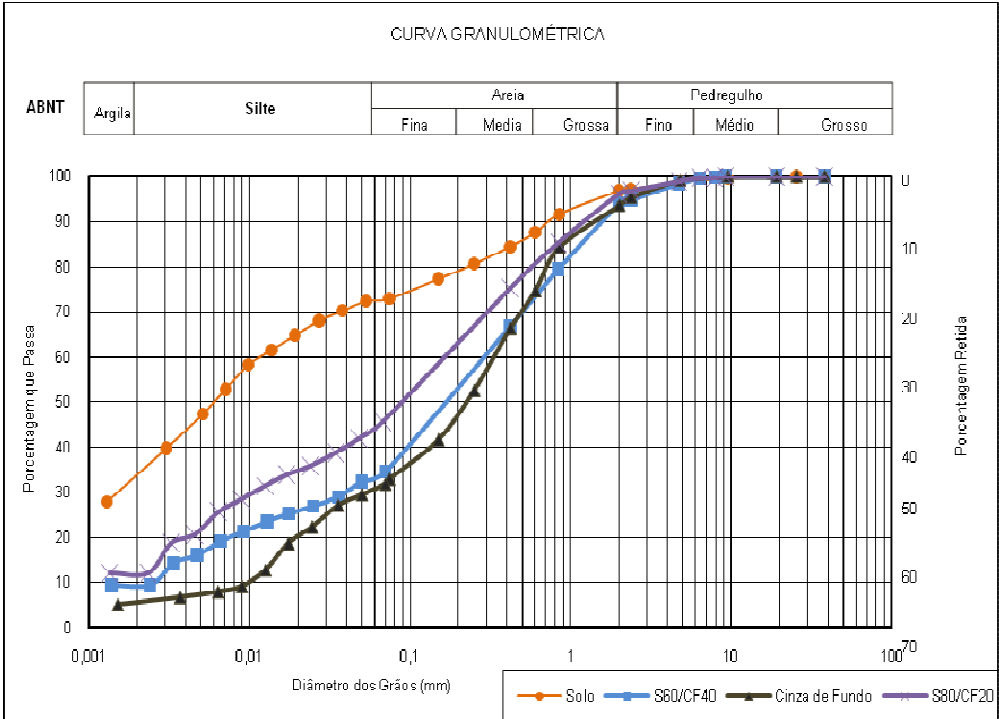


Figura 4.11 – Granulometria do solo, cinza de fundo e misturas do solo com 20% e 40% de cinza de fundo deste estudo.

A Tabela 4.5 apresenta os resultados, em porcentagens, do ensaio de análise granulométrica para o solo, cinza de fundo e cinza volante, obtidos no presente estudo.

Tabela 4.5 – Resultados das análises granulométricas.

Amostra	Argila (%)	Silte (%)	Areia			Pedregulho (%)
			Fina (%)	Média (%)	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

4.1.4.**Classificação SUCS**

Com relação à classificação SUCS, obtiveram-se os índices apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – 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

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.

4.1.5.**Classificação AASHTO**

Com relação à classificação AASHTO, obtiveram-se os índices apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – 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

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.

4.1.6.

Classificação MCT

Com relação à classificação MCT foram obtidos os seguintes parâmetros:

$$c'=1,62 \quad d'=50,0 \quad e'=1,39.$$

A Figura 4.12 apresenta o resultado da classificação MCT para o solo puro.

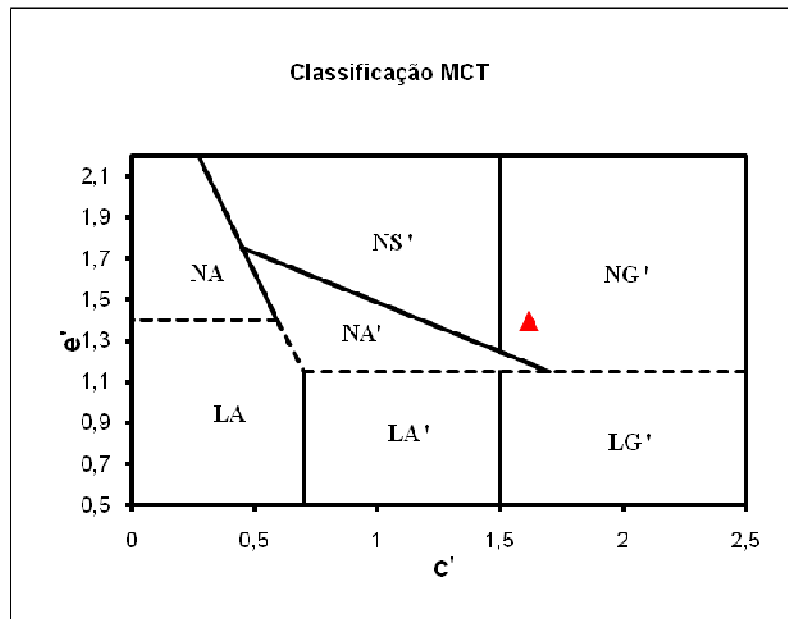


Figura 4.12 - Classificação MCT para o solo puro deste estudo.

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 às 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).

4.2.

Ensaio químicos

4.2.1.

Composição Química

Os resultados da composição química das amostras de solo estão apresentados na Tabela 4.8, onde os ensaios relativos à amostra de Solo (a) foram determinados no LABEST da COPPE/UFRJ, e os ensaios relativos à amostra de Solo (b), do mesmo solo, foram determinados no Laboratório de Química da PUC-Rio;

Tabela 4.8 – Composição química do solo deste estudo realizado em duas amostras do mesmo.

Parâmetros	Símbolo	Amostra (a) Concentração (%)	Amostra (b) Concentração (%)
Sílica	SiO ₂	43,076	36,797
Alumina	Al ₂ O ₃	38,676	35,154
Hematita	Fe ₂ O ₃	13,447	20,962
anidrido sulfúrico	SO ₃	0,858	0,103
óxido de cálcio	CaO	-	-
cloro	Cl	-	-
Dióxido de titânio	TiO ₂	0,929	1,759
Óxido de potássio	K ₂ O	2,103	4,040
Pentóxido de fósforo	P ₂ O ₅	-	-
Óxido de zinco	ZnO	0,022	-
Óxido de cromo (III)	Cr ₂ O ₃	-	-
Óxido de manganês (II)	MnO	0,100	0,153
Óxido de estrôncio	SrO	0,008	0,077
Óxido de zircônio	ZrO ₂	0,181	0,456
Óxido de cobre (II)	CuO	0,019	-
Óxido de chumbo (II)	PbO	-	-
Óxido de Rubídio	Rb ₂ O	0,039	-
Óxido de ítrio (III)	Y ₂ O ₃	0,014	-
Óxido de magnésio	MgO	-	-
Níquel	Ni		
Pentóxido de vanádio	V ₂ O ₅		0,283
Monóxido de nióbio	NbO	0,044	0,097
Óxido de bário	BaO	0,365	

(a) Determinado no LABEST da COPPE/UFRJ;

(b) Determinado no Laboratório de Química da PUC-RJ;

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). Estes componentes maiores também foram obtidos por NASCIMENTO (2005), para três argilas de comportamento não-laterítico no estado de Acre, como se apresenta na Tabela 4.9.

Os “índices de intemperismo” K_i e K_r do solo em estudo são calculados pelas relações moleculares sílica alumina ($K_i = \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) e sílica-sesquióxidos ($K_r = \text{SiO}_2/[\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3]$). Assim, temos que K_i varia entre 1,78 – 1,89 e K_r entre 1,29 – 1,55, sendo que a laterização é caracterizada por valores de K_i e K_r menores que 2 (SILVA, 2009).

Tabela 4.9 – Composição química de três argilas de comportamento não-laterítico. (NASCIMENTO, 2005)

Amostra	Composição Química (%)								Total
	MgO	Al_2O_3	SiO_2	K_2O	TiO_2	Fe_2O_3	ZrO_2	Perda ao Fogo	
AM - 01	0,56	17,42	64,36	1,63	1,05	6,54	0,09	6,54	98,19
AM- 02	0,60	16,65	65,52	1,64	0,99	5,81	0,08	6,77	98,06
AM - 03	0,66	19,15	63,36	1,64	1,06	6,61	0,08	7,45	100,00

BRANT (2005) fez uma análise química para três solos residuais de basalto no Estado de Tocantins, com resultados muito parecidos com os do solo estudado nesta pesquisa. Menciona que solos provenientes de rochas ácidas, tal como os gnaisses, tendem a serem menos argilosos do que os provenientes de rochas básicas, tal como os basaltos. Os seus resultados são apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Análise química semiquantitativa de óxidos para três solos residuais e rocha alterada. (BRANT, 2005)

SOLO/ROCHA	(%)								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	MnO
SR1	45,21	31,13	21,38	-	-	-	-	2,07	-
SR2	51,50	27,23	15,61	0,238	3,06	-	0,382	1,73	0,17
SR3	57,36	19,71	14,3	0,437	5,61	-	0,560	1,51	0,37
Rocha	52,43	15,65	10,13	9,197	7,97	1,73	1,532	1,02	0,24

Na Tabela 4.11, 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.

Tabela 4.11. Composição química da Cinza Volante de RSU, mistura (S60/CV40) e Cinza Volante de Carvão (FONTES, 2008 e WINTERKORN, 1990)

Composto	Concentração (%)			
	CV-RSU este estudo	CV-RSU Fontes (2008)	S60/CV40 este estudo	CV-carvão Winterkorn (1990)
SiO_2	21,2 - 12,9	44,26	26,35	20 - 40
Al_2O_3	15,4 - 12,2	18,16	25,59	10 - 30
Fe_2O_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_2O	2,6 - 4,1	2,61	3,70	0,5 - 4
P_2O_5	1,28 - 0	2,94		
ZnO	0,5 - 1,1	0,46	0,42	
Cr_2O_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_2O_5	0 - 0,25		0,15	

Na Tabela 4.12, 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 , Al e Fe .

Tabela 4.12. Composição química da Cinza de Fundo de RSU mistura (S60/CV40) e Cinza de Fundo de Carvão.

Composto	Concentração (%)			
	CF-RSU este estudo	CF-RSU ARM (2003)	S60/CV40 este estudo	CF-carvão POZZOBOM (1997)
SiO_2	27,086 - 37,761	46	34,317	55,980
Al_2O_3	14,187 - 19,172	10	31,340	26,730
Fe_2O_3	10,027 - 6,696	9	18,114	5,800
SO_3	1,326 - 3,644	-	0,283	-
CaO	20,181 - 31,804	15	4,640	0,840
Cl	2,388 - 3,855	-	-	-
TiO_2	3,683 - 5,549	-	2,056	1,330
K_2O	2,178 - 3,047	-	3,713	2,590
P_2O_5	0 - 1,047	-	-	0,240
ZnO	0,913 - 1,883	-	0,271	-
Cr_2O_3	0 - 0,195	-	-	-
MnO	0,103 - 0,168	-	0,164	0,020
SrO	0,057 - 0,147	-	0,037	-
ZrO_2	0,112 - 0,126	-	0,320	-
CuO	0 - 0,344	-	-	-
Ac	0 - 0,036	-	-	-
Br	0 - 0,009	-	-	-
Rb_2O	0 - 0,014	-	-	-
MgO	0 - 1,722	2		0,590
V_2O_5	0 - 0,43	-	0,134	-
NbO	-	-	0,071	-
NaO_2	-	-	-	0,250

4.2.2.

Teor de Matéria Orgânica

Os resultados do teor de matéria orgânica do solo, cinza de fundo e da cinza volante estão apresentados na Tabela 4.13, 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.

Tabela 4.13 – Teor de matéria orgânica do solo, da cinza de fundo e da cinza volante deste estudo.

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

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 4.14, 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.

Tabela 4.14 – teor de matéria orgânica da mistura S80/CV20, S60/CV40, S80/CF20 e S60/CF40 deste estudo.

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

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 pode-se 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.

4.2.3.

Ensaio de Lixiviação

Os resultados do ensaio de Lixiviação segundo a norma NBR 10005:2004, são apresentados nas Tabelas 4.15 e 4.16.

Tabela 4.15 – Resultados analíticos: Lixiviado - Parâmetros Inorgânicos (TASQA, 2010)

Parâmetros	Unidade	LQ ⁽¹⁾	Cinza Volante	Cinza de Fundo	S60/CV40	NBR 10005:2004 - Lix ⁽²⁾
Arsênio	mg/L	0,04	0,27	< LQ	0,08	1
Bário	mg/L	0,005	0,52	0,68	0,42	70
Cádmio	mg/L	0,003	0,05	0,06	0,007	0,5
Chumbo	mg/L	0,03	< LQ	< LQ	< LQ	1
Cromo Total	mg/L	0,002	0,75	0,03	0,25	5
Fluoretos	mg/L	0,07	2,01	1,30	1,70	150
Mercúrio	mg/L	0,0005	< LQ	< LQ	< LQ	0,1
Prata	mg/L	0,003	0,02	< LQ	< LQ	5
Selênio	mg/L	0,05	< LQ	< LQ	< LQ	1

⁽¹⁾ LQ: Limite de Quantificação

⁽²⁾ VMP: Valores Máximos Permitidos.

Tabela 4.16 – Resultados analíticos: Lixiviado - Parâmetros Orgânicos (TASQA, 2010)

Parâmetros	Unidade	LQ ⁽¹⁾	Cinza Volante	Cinza de Fundo	S60/CV40	NBR 10005:2004 - Lix ⁽²⁾
Aldrin e Dieldrin	mg/L	0,001	< LQ	< LQ	< LQ	0,003
Benzeno	mg/L	0,004	< LQ	< LQ	< LQ	0,5
Benzo(a)pireno	mg/L	0,002	< LQ	< LQ	< LQ	0,07
Clordano (isômeros)	mg/L	0,001	< LQ	< LQ	< LQ	0,02
Cloreto de vinila	mg/L	0,4	< LQ	< LQ	< LQ	0,5
Clorobenzeno	mg/L	0,01	< LQ	< LQ	< LQ	100
Clorofórmio	mg/L	0,004	< LQ	< LQ	< LQ	6
m-Cresol	mg/L	0,01	< LQ	< LQ	< LQ	200
o-Cresol	mg/L	0,01	< LQ	< LQ	< LQ	200
p-Cresol	mg/L	0,01	< LQ	< LQ	< LQ	200
Cresol Total	mg/L	0,01	< LQ	< LQ	< LQ	200
2,4-D	mg/L	0,01	< LQ	< LQ	< LQ	3
DDT (p,p-DDT + p,p-DDE + p,p-DDD)	mg/L	0,001	< LQ	< LQ	< LQ	0,2
1,4-Diclorobenzeno	mg/L	0,004	< LQ	< LQ	< LQ	7,5
1,2-Dicloroetano	mg/L	0,004	< LQ	< LQ	< LQ	1
1,1-Dicloroetileno	mg/L	0,004	< LQ	< LQ	< LQ	3
2,4-Dinitrotolueno	mg/L	0,01	< LQ	< LQ	< LQ	0,13
Endrin	mg/L	0,001	< LQ	< LQ	< LQ	0,06
Heptacloro e seu epóxido	mg/L	0,001	< LQ	< LQ	< LQ	0,003
Hexaclorobenzeno	mg/L	0,001	< LQ	< LQ	< LQ	0,1

Parâmetros	Unidade	LQ ⁽¹⁾	Cinza Volante	Cinza de Fundo	S60/CV40	NBR 10005:2004 - Lix ⁽²⁾
Hexaclorobutadieno	mg/L	0,004	< LQ	< LQ	< LQ	0,5
Hexacloroetano	mg/L	0,01	< LQ	< LQ	< LQ	3
Lindano (g BHC)	mg/L	0,001	< LQ	< LQ	< LQ	0,2
Metiletilcetona	mg/L	0,5	< LQ	< LQ	< LQ	200
Metoxicloro	mg/L	0,001	< LQ	< LQ	< LQ	2
Nitrobenzeno	mg/L	0,01	< LQ	< LQ	< LQ	2
Pentaclorofenol	mg/L	0,01	< LQ	< LQ	< LQ	0,9
Piridina	mg/L	0,01	< LQ	< LQ	< LQ	5
2,4,5-T	mg/L	0,002	< LQ	< LQ	< LQ	0,2
Tetracloreto de Carbono	mg/L	0,004	< LQ	< LQ	< LQ	0,2
Tetracloroetileno	mg/L	0,004	< LQ	< LQ	< LQ	4
Toxafeno	mg/L	0,002	< LQ	< LQ	< LQ	0,5
2,4,5-TP	mg/L	0,01	< LQ	< LQ	< LQ	1
Tricloroetileno	mg/L	0,004	< LQ	< LQ	< LQ	7
2,4,5-Triclorofenol	mg/L	0,01	< LQ	< LQ	< LQ	400
2,4,6-Triclorofenol	mg/L	0,01	< LQ	< LQ	< LQ	20

⁽¹⁾ LQ: Limite de Quantificação

⁽²⁾ VMP: Valores Máximos Permitidos.

Os parâmetros analisados apresentaram concentrações adequadas às indicadas no Anexo F da norma ABNT/NBR 10004:2004.

4.2.4.

Ensaio de Solubilização

Os resultados do ensaio de Solubilização segundo a norma NBR 10006:2004, são apresentados nas Tabelas 4.17 e 4.18.

Tabela 4.17 – Resultados analíticos: Solubilizado - Parâmetros Inorgânicos (TASQA, 2010)

Parâmetros	Unidade	LQ ⁽¹⁾	Cinza Volante	Cinza de Fundo	S60/CV40	NBR 10006:2004 - Sol ⁽²⁾
Alumínio	mg/L	0,07	0,31	0,08	0,70	0,2
Arsênio	mg/L	0,001	< LQ	< LQ	< LQ	0,01
Bário	mg/L	0,005	0,41	0,19	0,20	0,7
Cádmio	mg/L	0,003	< LQ	< LQ	< LQ	0,005
Chumbo	mg/L	0,002	< LQ	< LQ	< LQ	0,01
Cianetos	mg/L	0,005	< LQ	< LQ	< LQ	0,07
Cloretos	mg/L	2	783	271	389	250
Cobre	mg/L	0,003	0,01	0,02	0,06	2
Cromo Total	mg/L	0,002	1,99	< LQ	0,88	0,05
Ferro	mg/L	0,002	0,22	0,06	0,09	0,3
Fluoretos	mg/L	0,07	0,56	0,56	0,76	1,5
Manganês	mg/L	0,002	< LQ	< LQ	< LQ	0,1

Parâmetros	Unidade	LQ ⁽¹⁾	Cinza Volante	Cinza de Fundo	S60/CV40	NBR 10006:2004 - Sol ⁽²⁾
Mercúrio	mg/L	0,0005	< LQ	< LQ	< LQ	0,001
Nitrato (como N)	mg/L	0,10	2,10	3,80	0,90	10
Prata	mg/L	0,003	< LQ	< LQ	< LQ	0,05
Selênio	mg/L	0,002	< LQ	< LQ	< LQ	0,01
Sódio	mg/L	0,05	85,2	236	362	200
Sulfato (expresso como SO ₄)	mg/L	1,00	650	290	600	250
Surfactantes	mg/L	0,40	< LQ	< LQ	< LQ	0,5
Zinco	mg/L	0,006	0,04	0,11	0,03	5

⁽¹⁾ LQ: Limite de Quantificação

⁽²⁾ VMP: Valores Máximos Permitidos.

Tabela 4.18 – Resultados analíticos: Solubilizado - Parâmetros Orgânicos (TASQA, 2010)

Parâmetros	Unidade	LQ ⁽¹⁾	Cinza Volante	Cinza de Fundo	S60/CV40	NBR 10006:2004 - Sol ⁽²⁾
Aldrin e Dieldrin	mg/L	2×10^{-5}	< LQ	< LQ	< LQ	$3,0 \times 10^{-5}$
Clordano (isômeros)	mg/L	0,0002	< LQ	< LQ	< LQ	$2,0 \times 10^{-4}$
2,4-D	mg/L	0,01	< LQ	< LQ	< LQ	0,03
DDT (isômeros)	mg/L	0,001	< LQ	< LQ	< LQ	$2,0 \times 10^{-3}$
Endrin	mg/L	0,0002	< LQ	< LQ	< LQ	$6,0 \times 10^{-4}$
Fenóis Totais	mg/L	0,0042	0,014	0,021	0,012	0,01
Heptacloro e seu epóxido	mg/L	2×10^{-5}	< LQ	< LQ	< LQ	$3,0 \times 10^{-5}$
Hexaclorobenzeno	mg/L	0,001	< LQ	< LQ	< LQ	$1,0 \times 10^{-3}$
Lindano (g BHC)	mg/L	0,001	< LQ	< LQ	< LQ	$2,0 \times 10^{-3}$
Metoxicloro	mg/L	0,001	< LQ	< LQ	< LQ	0,02
2,4,5-T	mg/L	0,002	< LQ	< LQ	< LQ	$2,0 \times 10^{-3}$
2,4,5-TP	mg/L	0,01	< LQ	< LQ	< LQ	0,03
Toxafeno	mg/L	0,002	< LQ	< LQ	< LQ	$5,0 \times 10^{-3}$

⁽¹⁾ LQ: Limite de Quantificação

⁽²⁾ VMP: Valores Máximos Permitidos.

Para a Cinza Volante, os parâmetros analisados Alumínio, Cloretos, Cromo Total, Sulfato (expresso como SO₄), Fenóis Totais apresentaram concentrações superiores às indicadas no Anexo G da norma ABNT/NBR 10004:2004. A classificação para a amostra é **Classe IIA – Resíduo Não Inerte**.

Para a Cinza de Fundo, os parâmetros analisados Cloretos, Sódio, Sulfato (expresso como SO₄), Fenóis Totais apresentaram concentrações superiores às indicadas no Anexo G da norma ABNT/NBR 10004:2004. A classificação para a amostra é **Classe IIA – Resíduo Não Inerte**.

Para a mistura S60/CV40, os parâmetros analisados Alumínio, Cloretos, Cromo Total, Sódio, Sulfato (expresso como SO₄), Fenóis Totais apresentaram

concentrações superiores às indicadas no Anexo G da norma ABNT/NBR 10004:2004. A classificação para a amostra é **Classe IIA – Resíduo Não Inerte**.

Baseados nos resultados dos ensaios mencionados podemos concluir que a mistura solo-cinza volante não é perigosa, sendo que ainda é não inerte, precisam-se aprofundar os estudos ambientais com testes e monitoramento em campo sobre pistas experimentais.

4.3.

Ensaio de Caracterização Mecânica

4.3.1.

Ensaio de Compactação

As curvas de compactação do solo e das misturas com cinza de fundo e cinza volante apresentam-se nas Figuras 4.13 e 4.14. A Tabela 4.19 apresenta um resumo dos valores de umidade ótima (w_{otm}) e de peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{d \text{ máx}}$).

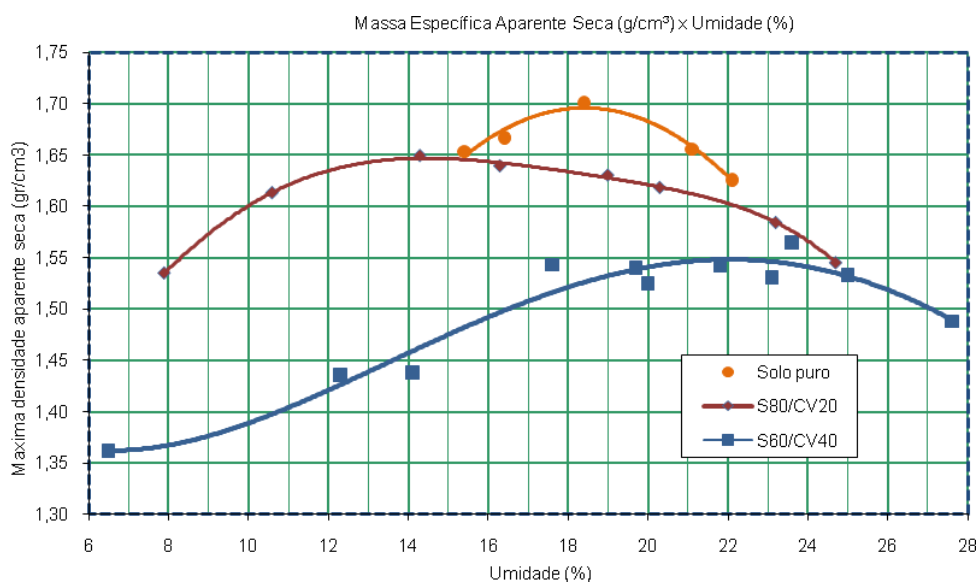


Figura 4.13 – Curvas de compactação de solo e misturas com 20% e 40% de cinza volante deste estudo.

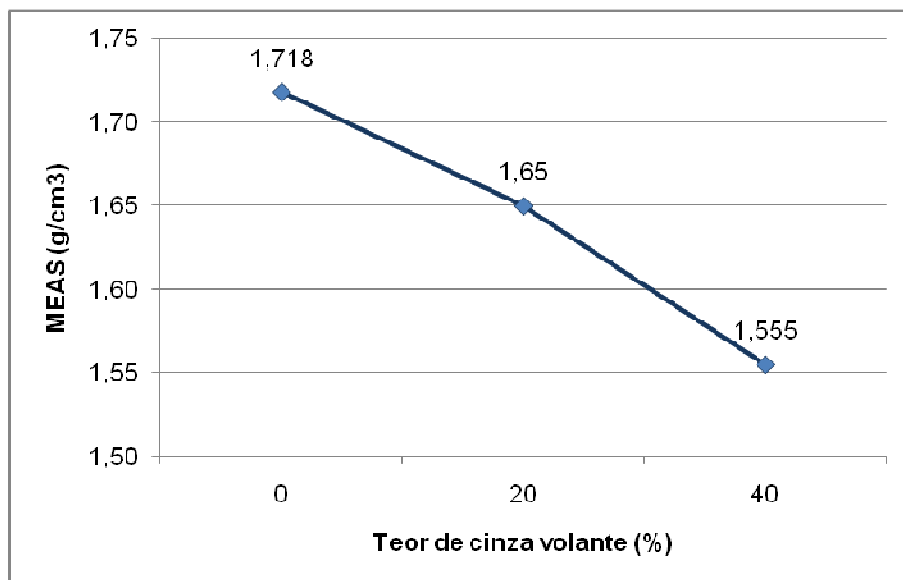


Figura 4.14 – Variação da Massa específica aparente seca com o teor de cinza volante.

Tabela 4.19 – 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

Como pode ser observado na Figura 4.13, 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 4.14, 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 4.15 apresenta as curvas de compactação de solo e misturas com 20% e 40% de cinza de fundo e a Figura 4.16 mostra a variação da massa específica aparente seca com o teor de cinza de fundo. A Figura 4.17 apresenta a variação do teor de umidade ótimo com o teor de cinza de fundo.

Como pode ser observado na Figura 4.16, ao aumentar o teor de cinza de fundo na mistura, a máxima densidade aparente seca tende a diminuir. Neste caso, para a umidade ótima, na Figura 4.17 mostra como o teor de umidade ótima decresce para os teores de 20% e 40% de cinza de fundo.

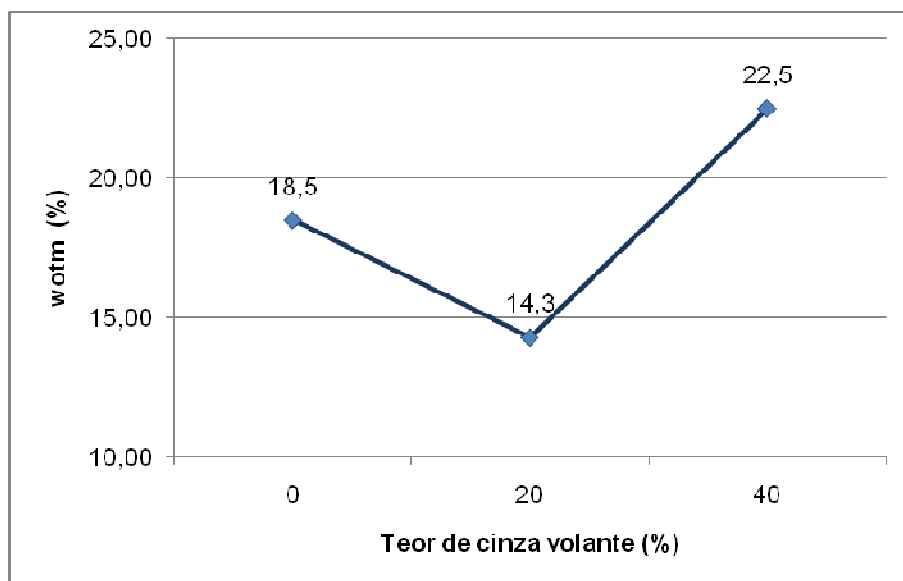


Figura 4.15 – Variação do teor de umidade ótimo com o teor de cinza volante deste estudo.

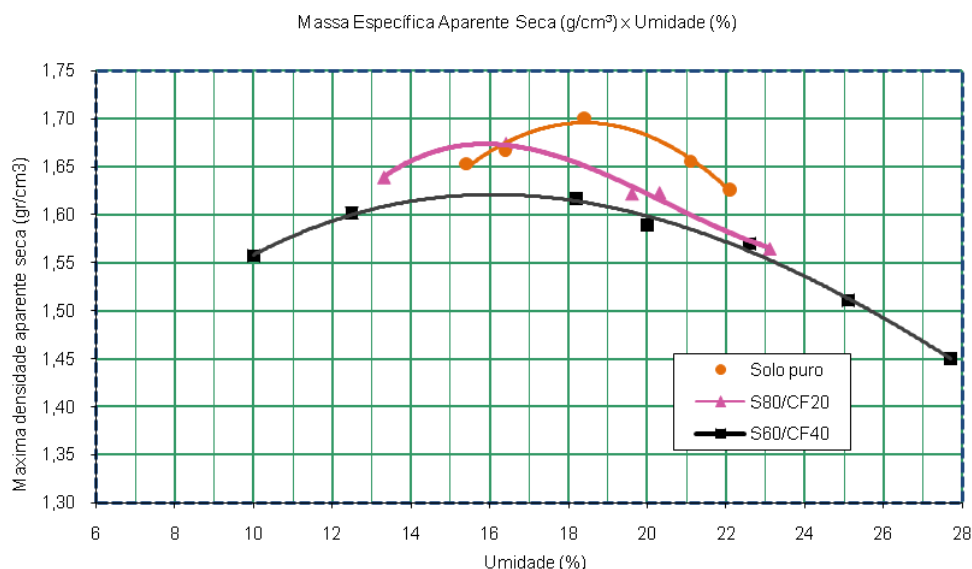


Figura 4.16 – Curvas de compactação de solo e misturas com 20% e 40% de cinza de fundo deste estudo.

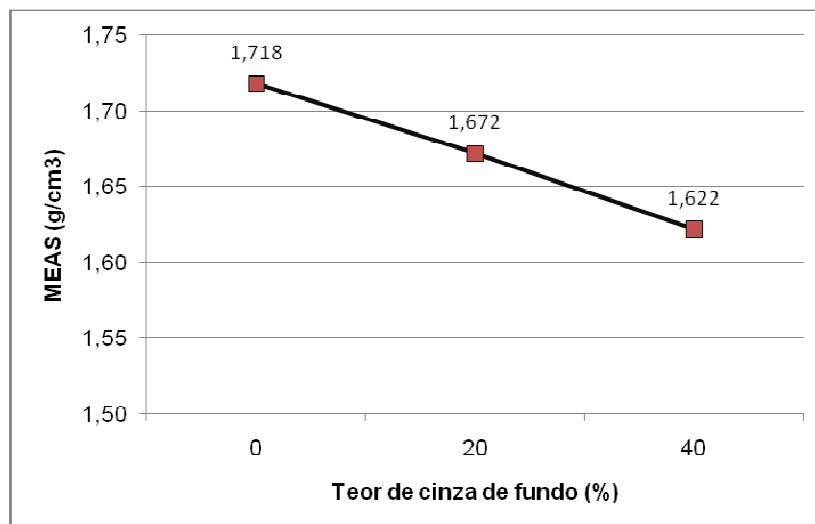


Figura 4.17 – Variação da Massa específica aparente seca com o teor de cinza de fundo deste estudo.

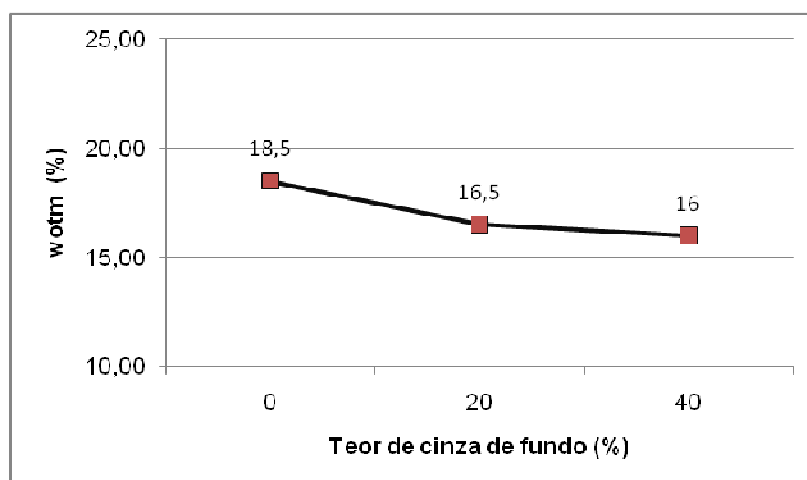


Figura 4.18 – Variação do teor de umidade ótimo com o teor de cinza de fundo deste estudo.

Os resultados da curva de compactação da cinza de fundo são concordantes com os resultados obtidos por FARIAS (2005), para cinza pesada de carvão, como apresentado na Figura 4.18, na qual 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.

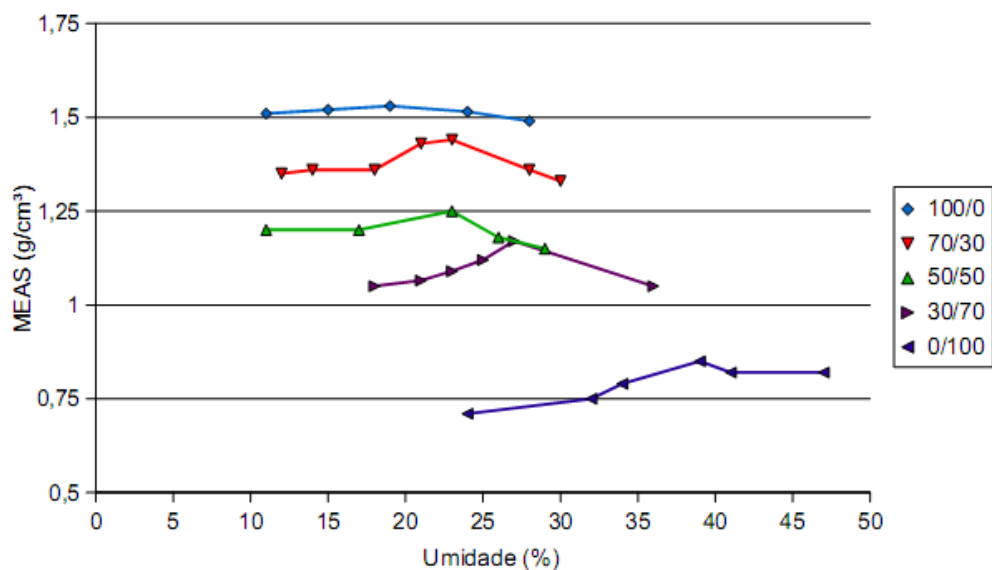


Figura 4.19 – Curva de compactação das misturas solo/cinza pesada (FARIAS, 2005)

4.3.2.

Ensaio de Módulo de Resiliência

Foram moldados três corpos de prova para cada material ou mistura, na umidade ótima, e ensaiados no equipamento triaxial dinâmico da COPPE/UFRJ, dos quais se obtiveram valores de Módulo Resiliente (MR) para diferentes valores de tensão, tanto confinante (σ_3) quanto 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, como apresentados na Tabela 4.19, com a ajuda do Programa Computacional STATISTICA (STATSOFT, 2004).

Nas Figuras 4.20 a 4.24 estão esquematizadas as superfícies no espaço tridimensional [$\sigma_3 \times \sigma_d \times MR$] para uma faixa de tensões comumente utilizadas em pavimentos, que foram geradas por ajustes, baseados no modelo Composto. Cabe mencionar que o propósito de obter-se tais superfícies é para previsão de Módulos Resilientes para diversas combinações de tensão confinante e tensão desviadora conhecidas.

Tabela 4.20 – Valores dos coeficientes do modelo composto para cada material ou mistura desta pesquisa.

Material ou mistura	Compactação		Modulo de Resiliencia			Coeficiente de correlação (R)
	Umidade ótima (%)	Máxima densidade aparente seca	k1	k2	k3	
S	18,5	1,718	185,2712	0,1772	-0,4197	0,867
S80/CV20	14,3	1,65	305,5556	0,2939	-0,4708	0,833
S60/CV40 (*)	22,5	1,555	181,3510	0,2364	-0,4482	0,939
S80/CF20	16,5	1,672	120,3640	0,1259	-0,5194	0,876
S60/CF40	16	1,622	112,3940	0,0799	-0,3898	0,861

(*) Com 7 dias de cura após a compactação.

Os resultados obtidos dos ensaios de Modulo de Resiliência demonstram que o solo em estudo tem seu módulo de resiliência 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.

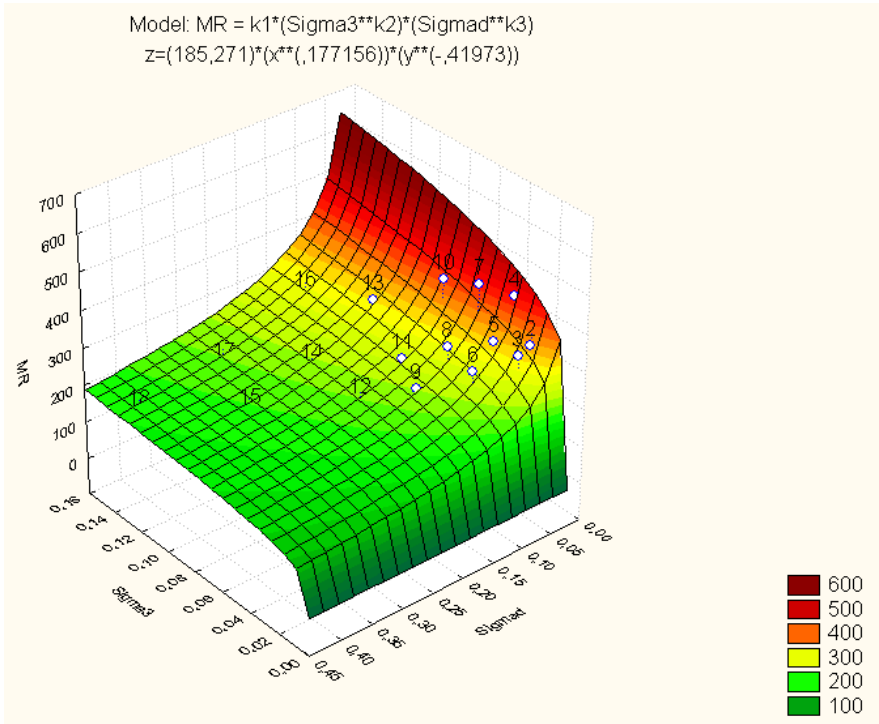


Figura 4.20 – Gráfico 3D do modelo composto do Módulo Resiliente do solo puro deste estudo.

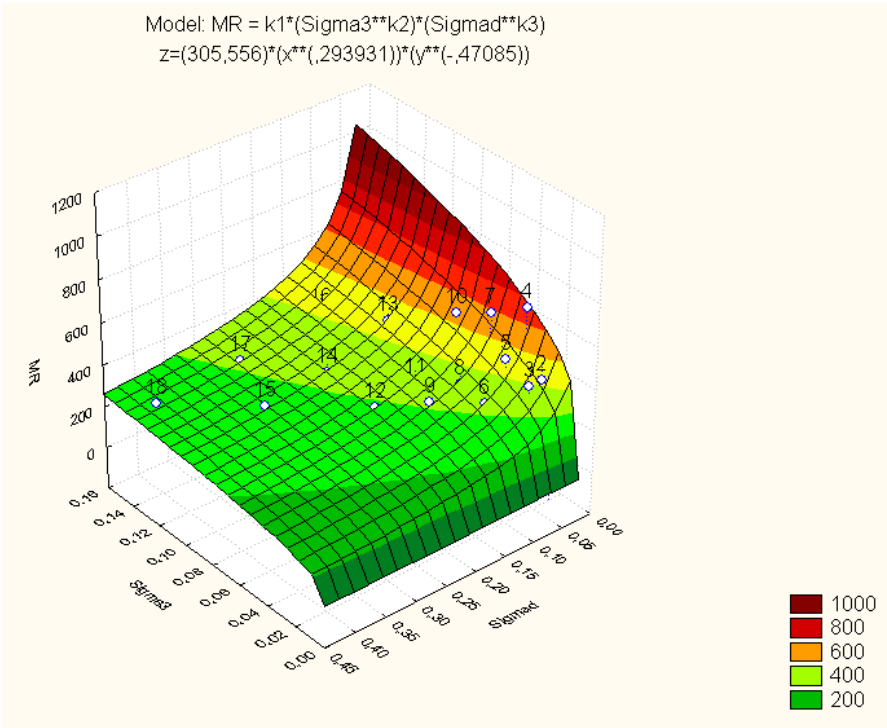


Figura 4.21 – Gráfico 3D do modelo composto do Módulo Resiliente da mistura S80/CV20 deste estudo.

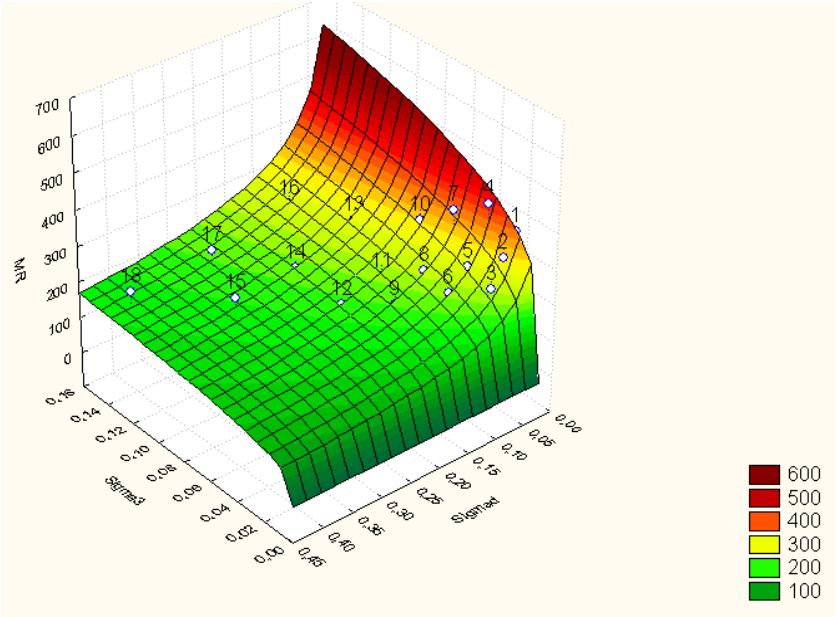


Figura 4.22 – Gráfico 3D do modelo composto do Módulo Resiliente da mistura S60/CV40 deste estudo.

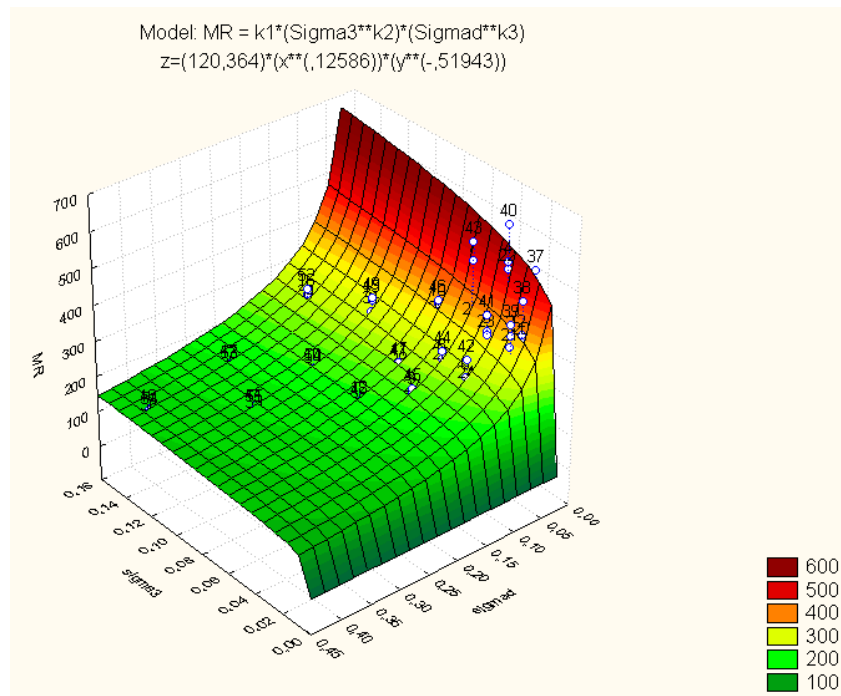


Figura 4.23 – Gráfico 3D do modelo composto do Módulo Resiliente da mistura S80/CF20 deste estudo.

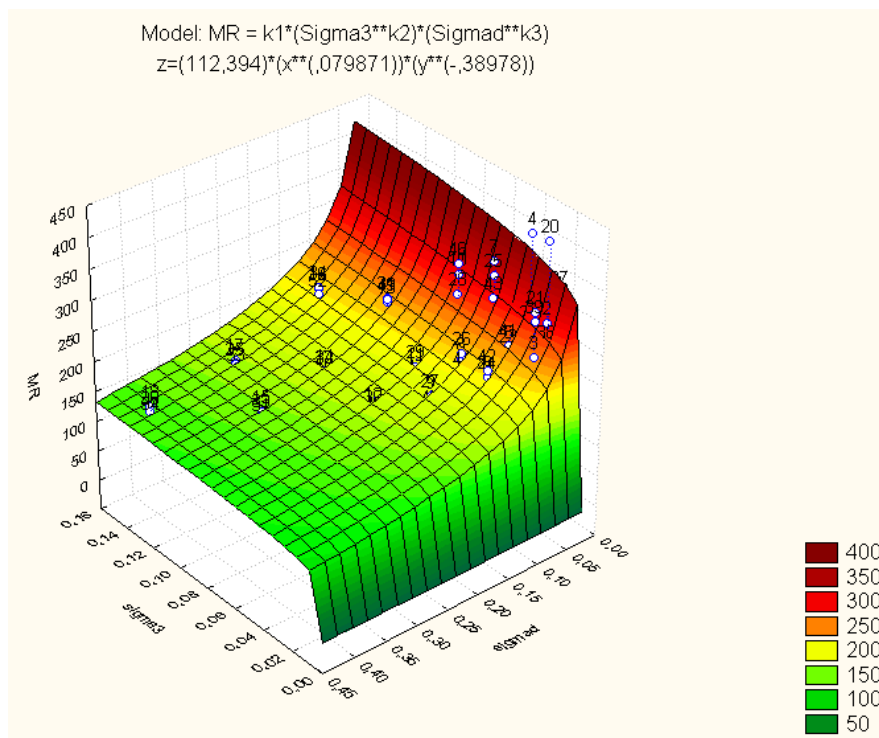


Figura 4.24 – Gráfico 3D do modelo composto do Módulo Resiliente da mistura S60/CF40 deste estudo.

4.3.2.1

Influência do tempo de cura e atraso na compactação no módulo resiliente

FERGUSON (1993) relata que a adição de cinza volante ao solo tende a alterar as características da compactação e assim, as relações umidade-densidade deverão ser estabelecidas para cada teor de cinza volante. Para materiais compactados imediatamente após a mistura, a mudança é principalmente devida à alteração da graduação dos materiais. Quando a compactação é atrasada em relação à mistura com água, produtos da hidratação começam a ligar as partículas num estado fraco e uma ruptura destas agregações é requerida para compactar o material. Portanto, uma porção da energia de compactação é utilizada para superar a cimentação e a massa específica aparente seca máxima é reduzida com o incremento no atraso da compactação. A quantidade de redução é dependente da taxa na qual a cinza volante hidrata e pode diferir consideravelmente, dependendo da fonte da cinza.

O atraso na compactação também reduz a máxima resistência potencial de um material estabilizado com cinza volante. Produtos cimentícios formados antes da compactação podem ser rompidos para compactar o material e estas ligações podem não serem recuperadas a sua plena resistência. A redução em densidade também resulta em menos pontos de contatos intergranulares, nos quais os produtos da hidratação da cinza proporcionarão ligação do sistema de partículas.

Foram realizados três ensaios de módulo resiliente para avaliar a variação deste com o atraso na compactação e a influência do tempo de cura. Os valores dos coeficientes do Modelo Composto estão na Tabela 4.15 e nas Figuras 4.24 e 4.25, onde é mostrada a variação do Módulo Resiliente com o tempo de atraso da compactação e o tempo de cura após a compactação na umidade ótima.

Observa-se que o tempo de cura tem uma ação benéfica no comportamento mecânico, isto talvez se deva às reações pozolánicas na mistura. O atraso na compactação em relação à hidratação no material deste estudo, aumenta o Módulo Resiliente em comparação à compactação imediata sem período de cura, isto pode ser devido a uma taxa lenta de hidratação, como assinalado por FERGUSON (2003).

Nas Figuras 4.26 e 4.27 apresenta-se a variação do Módulo Resiliente com o teor de umidade para a mistura S60/CV40. Cada teor de umidade representa um ponto ao longo da curva de compactação. Observa-se que quanto maior for o teor de umidade, menor é o Módulo Resiliente, isto permite apreciar a influência

do teor de umidade no comportamento mecânico da mistura, sendo que a estrutura do pavimento está sempre exposta às variações sazonais, como mencionado por SILVA (2009).

Tabela 4.21 – Variação dos coeficientes do modelo composto com o atraso na compactação e o tempo de cura para a mistura S60/CV40 deste estudo.

Atraso na compactação (dias)	Tempo de cura após compactação (dias)	k_1	k_2	k_3	Coefficiente de correlação (R)
1	0	115,2278	0,2851	-0,5014	0,902
0	0	63,2242	0,2375	-0,4469	0,887
0	7	181,3510	0,2364	-0,4482	0,939

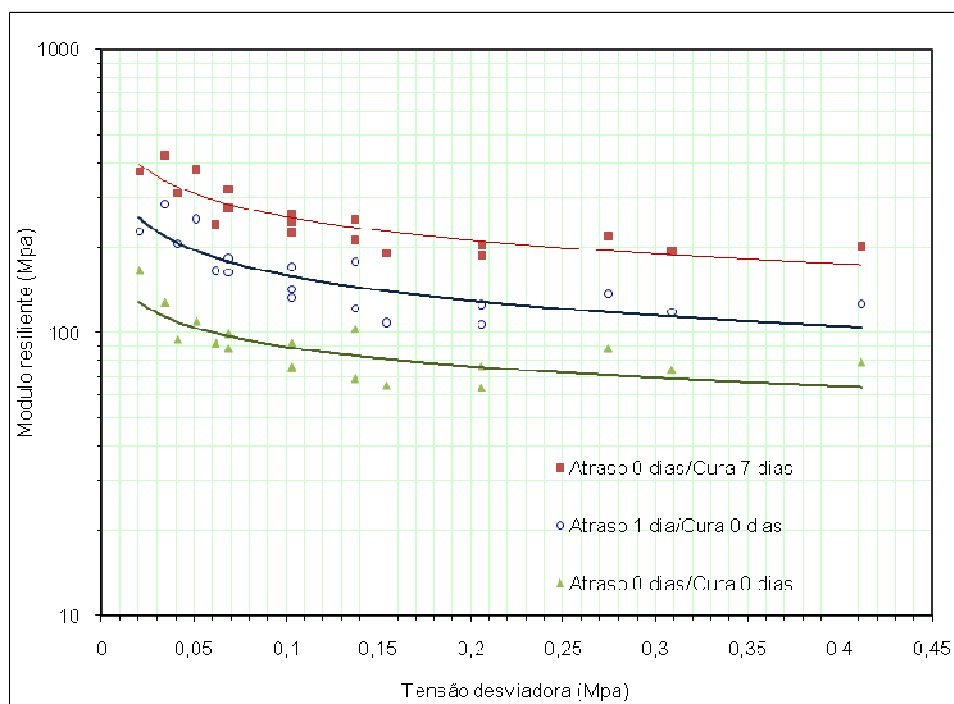


Figura 4.25 – Variação do Módulo Resiliente vs. tensão desviadora da mistura S60/CV40 com o tempo de atraso e o tempo de cura deste estudo.

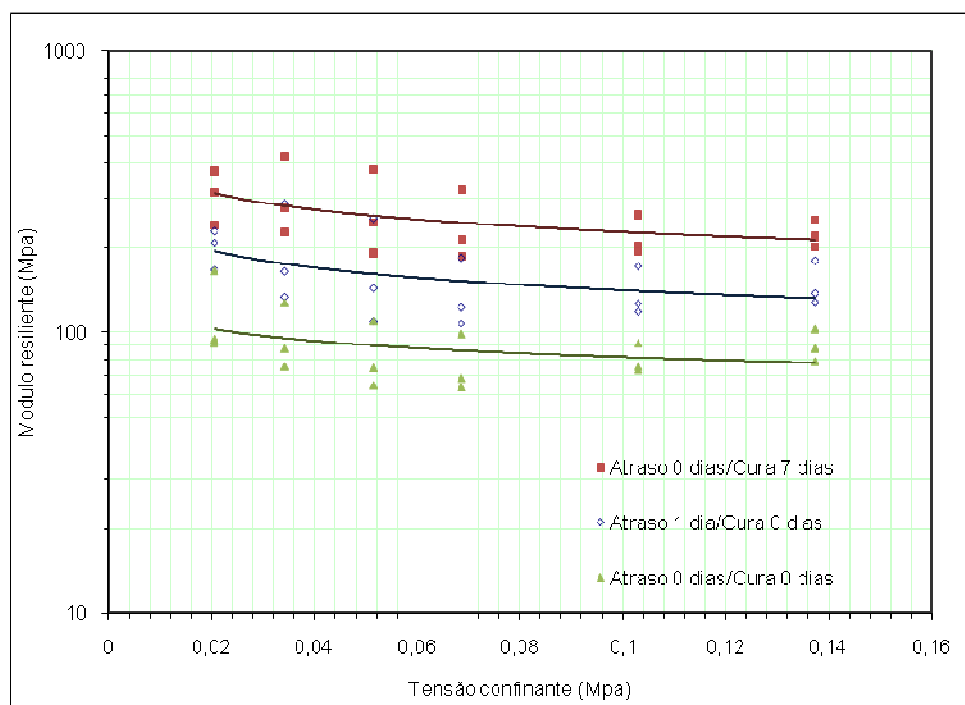


Figura 4.26 – Variação do Módulo Resiliente vs. tensão confinante da mistura S60/CV40 com o tempo de atraso e o tempo de cura deste estudo.

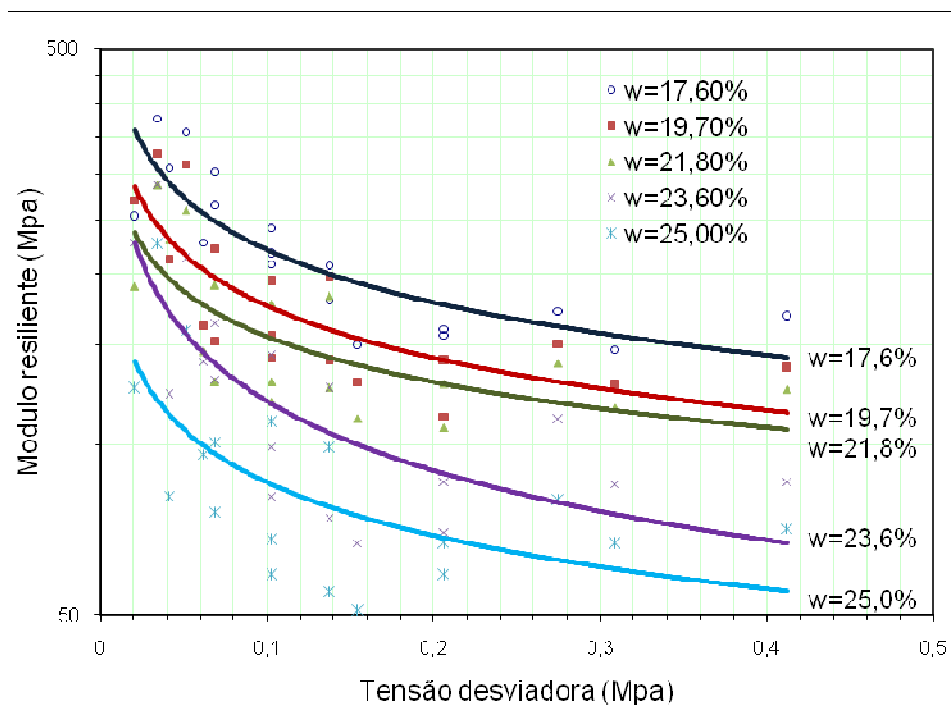


Figura 4.27 – Variação do Módulo Resiliente vs. tensão desviadora da mistura S60/CV40 com o teor de umidade deste estudo.

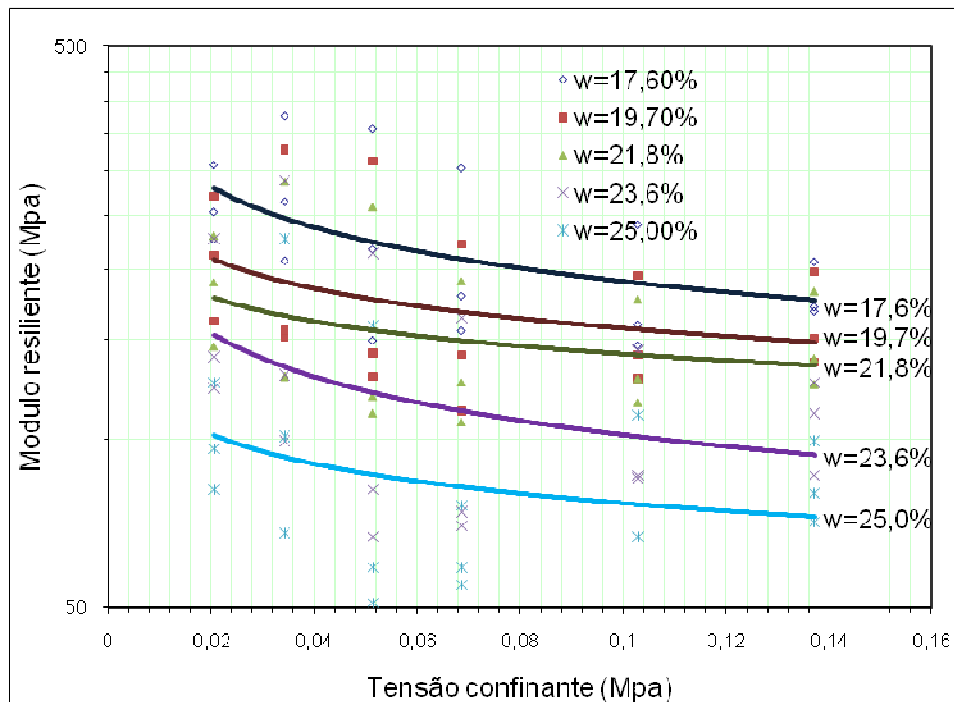


Figura 4.28 – Variação do Módulo Resiliente vs. tensão confinante da mistura S60/CV40 com o teor de umidade deste estudo.

4.3.2.2

Influência do número de ciclos de carregamento N no modulo resiliente

Nas Figuras 4.29 e 4.30 apresenta-se a variação do Módulo Resiliente com o número de ciclos de carregamento para a mistura S60/CV40. Observa-se que para 500 000 ciclos, o Módulo Resiliente é aproximadamente 8 vezes maior que para a mesma mistura sem nenhum ciclo; isto é concordante com os ensaios realizados por GUIMARÃES (2001).

4.3.3.

Ensaio de CBR

Os Valores de expansão e de CBR são apresentados nas Tabelas 4.21 e 4.22, respectivamente.

Observa-se que a cinza volante diminui a expansibilidade do material até menos que 0,5%, o que viabiliza sua utilização como base de pavimento. As outras misturas reduzem a expansibilidade do solo, mas não em grandeza suficiente para que possa ser utilizado em estruturas de pavimentos.

O CBR é aumentado em 16 vezes com a adição de 40% de Cinza Volante, e em 4 vezes com a adição de Cinza de Fundo; os valores de CBR são tomados neste estudo apenas como referência, já que também é realizada uma análise mecanística-empírica utilizando o módulo resiliente.

Tabela 4.22– Valores de expansão aos 4 dias de imersão, sem tempo de cura e três dias de atraso na compactação após hidratação.

Material ou mistura	Símbolo	Expansão aos 4 dias (%)
Solo	S	4,87
Mistura 1	S80/CV20	3,60
Mistura 2	S60/CV40	0,40
Mistura 3	S80/CF20	4,77
Mistura 4	S60/CF40	2,30

Tabela 4.23 – Valores de CBR

Material ou mistura	Símbolo	CBR (%)
Solo	S	2
Mistura 1	S60/CV40	33
Mistura 2	S60/CF40	8

A partir destes resultados não se fez a avaliação do comportamento mecânico das misturas solo-cinza de fundo. Pode-se tentar uma adição de cal em estudos futuros para combater a expansão residual. Outro ponto também que pode ser verificado é fazer o ensaio de expansão após cura para ver se há melhoria.

4.4.

Dimensionamento de pavimento típico

Assumiu-se uma estrutura do pavimento tal como apresenta-se na Figura 4.28, bem como características do tráfego, como ilustrado na Tabela 4.29 e dados do clima da cidade de Rio de Janeiro, como mostrado na Figura 4.30, com a finalidade de se avaliar o efeito da adição de Cinza Volante ao solo, em um projeto de pavimentação. A Tabela 4.24 e Figura 4.31 apresentam as espessuras de camadas em função do período de projeto para cada tipo de

mistura de solo-cinza obtidas com o programa computacional SisPav (FRANCO, 2007).

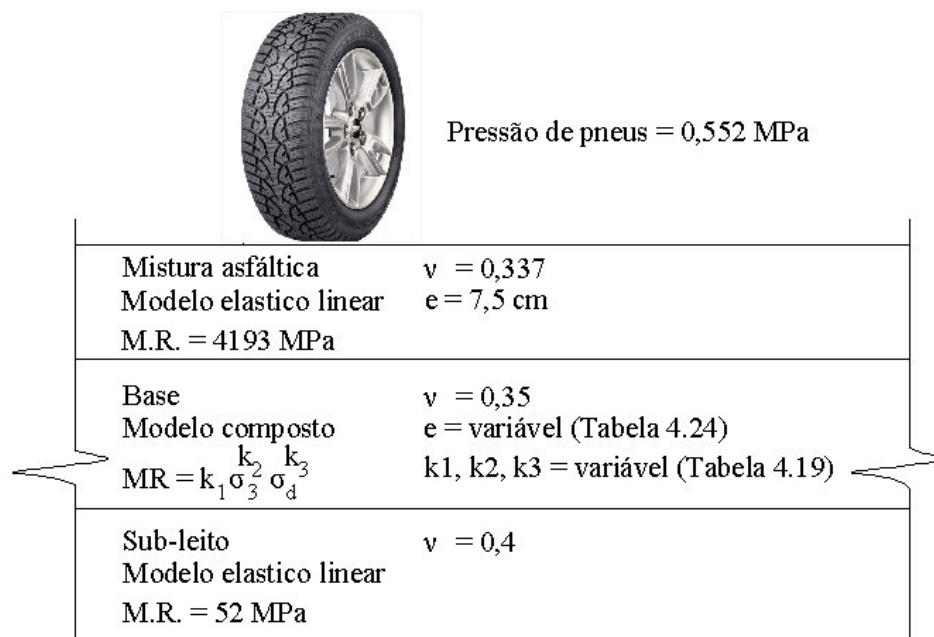


Figura 4.29. Estrutura do pavimento adotada.

Tabela 4.24. Dados do tráfego.

Configuração	Rodas	Volume/ano	Carga (kg)
Eixo duplo	4	100 000	8 200

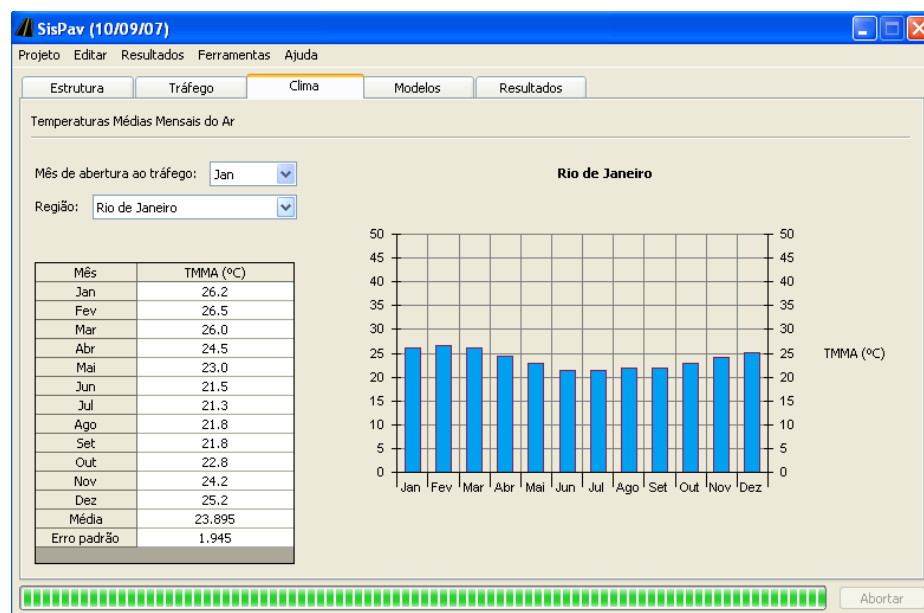


Figura 4.30 – Dados do clima utilizado para o programa SisPav.

Tabela 4.25. Espessura de camada em função do período de projeto para cada tipo de solo ou mistura.

Período de projeto (anos)	Nº equiv. de operações (N) (**)	Espessura da camada (cm)		
		Solo puro (S)	S80/CV20	S60/CV40
6	5,71E+05	10,00	10,00	10,00
7	6,66E+05	10,00	10,00	10,56
8	7,61E+05	10,00	10,00	14,50
9	8,56E+05	10,92	10,00	16,74
10	9,51E+05	12,45	10,00	22,15
11	1,05E+06	15,43	10,00	26,88
12	1,14E+06	18,21	10,00	31,02
13	1,24E+06	20,82	10,00	45,50

(**) O valor de N é só referencial, não sendo utilizado nas análises pelo SisPAV.

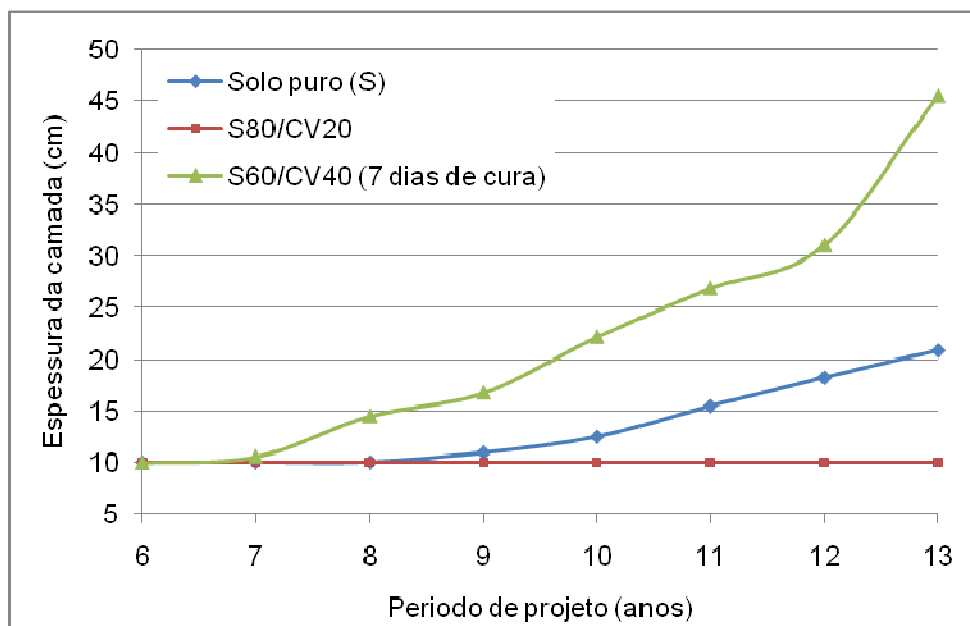


Figura 4.31. Variação das espessuras de camada em função do período de projeto.

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. A mistura com 40% de cinza volante piorou o comportamento mecânico do solo puro, no entanto, para um período de projeto de 8 anos, sua espessura como base para as cargas devidas ao tráfego admitido, chega a ser levemente maior que a espessura da base de solo puro (14,5 cm para a mistura S60/CV40 com 7 dias de cura, contra 10 cm do solo puro), sendo para fins de construção, arredondada em 15 cm.

Observa-se que as misturas com inserção de cinzas volantes de RSU apresentaram um comportamento mecânico compatível com as exigências de um pavimento de baixo volume de tráfego.

A inserção de 20% de cinza volante ao solo argiloso não-laterítico melhorou o comportamento mecânico do solo, reduziu a expansibilidade do solo, embora não o suficiente para que este possa ser utilizado como base ou sub-base de pavimentos rodoviários pelas especificações atuais.

O solo misturado com um teor de 40% de Cinza Volante piorou o seu comportamento mecânico em relação ao solo puro, com o conseqüente aumento da espessura de camada, em contrapartida, reduziu notavelmente a expansibilidade do solo a menos de 0,5%, isto faz com que essa mistura possa ser utilizada em camadas de pavimentos, podendo ser viável para rodovias de baixo volume de tráfego, 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.

Não foram avaliadas as misturas com Cinza de Fundo devido à sua elevada expansibilidade, o que impossibilita sua utilização em camadas de base de pavimentos.

4.5.

Considerações sobre a apresentação e discussão dos resultados

Os resultados exploratórios obtidos neste estudo se mostraram satisfatórios e cumpriram os objetivos iniciais propostos com relação ao desenvolvimento desta Dissertação, com relação à investigação do comportamento solo-cinza. Os resultados são concordantes com os obtidos em outras pesquisas relatadas na revisão bibliográfica desta Dissertação.