

4

Apresentação e Discussão dos Resultados

4.1. Considerações Iniciais

Os resultados apresentados e discutidos neste capítulo dizem respeito aos ensaios realizados para a avaliação do aproveitamento de cinzas, pesadas e volantes de carvão mineral, quando misturadas com solo regional do estado do Rio de Janeiro e cal.

Os resultados referentes a todas as etapas envolvidas no estudo serão apresentados seguindo a ordem do capítulo anterior, no qual foi descrita a metodologia experimental utilizada.

4.2. Ensaio de Caracterização Física

4.2.1. Limites de Atterberg

Os ensaios para determinação dos limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP) em ambos os laboratórios foram realizados conforme as normas brasileiras NBR 6459/1984 e NBR 7180/1984 (ABNT, 1984).

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

Ubaldo (2005), também utilizou as mesmas cinzas, de fundo e volante, do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, e classificou-as em materiais não-plásticos. Leandro (2005) estudou as cinzas de fundo oriundas do mesmo local e também as classificou como materiais não-plásticos.

4.2.2. Massa Específica dos Grãos

No Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio, para a determinação da massa específica dos grãos (G_s), tanto da cinza volante como de fundo, foram adotados os procedimentos das NBR6508/1984 (ABNT, 1984).

No Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COPPE/UFRJ, onde foram determinadas as massas específicas dos grãos do solo e das misturas, adota-se procedimento da DNER-ME 093/94 (DNER, 1984).

Na Tabela 4.1 são apresentados os resultados obtidos em ambos os laboratórios.

Tabela 4.1– Resultados da Massa Específica dos Grãos

Material/Mistura	Massa Específica dos Grãos (Gs)
S	2,772
CF	1,988
CV	2,105
S70/CF27/C3	2,526
S60/CF37/C3	2,411
S90/CV7/C3	2,688
S80/CV17/C3	2,603
S70/CF30	2,445
S60/CF40	2,370
S90/CV10	2,632
S80/CV20	2,578

Nas Figuras 4.1.a e 4.1.b estão apresentadas as variações da massa específica dos grãos em relação aos teores de cinzas, demonstrando que, tanto na adição de cinzas de fundo, quanto na de cinza volante há queda no valor da massa específica dos grãos, sendo esta mais representativa no caso das cinzas de fundo, talvez pelo teor de cinzas acrescentado às misturas ter sido mais representativo nestes casos.

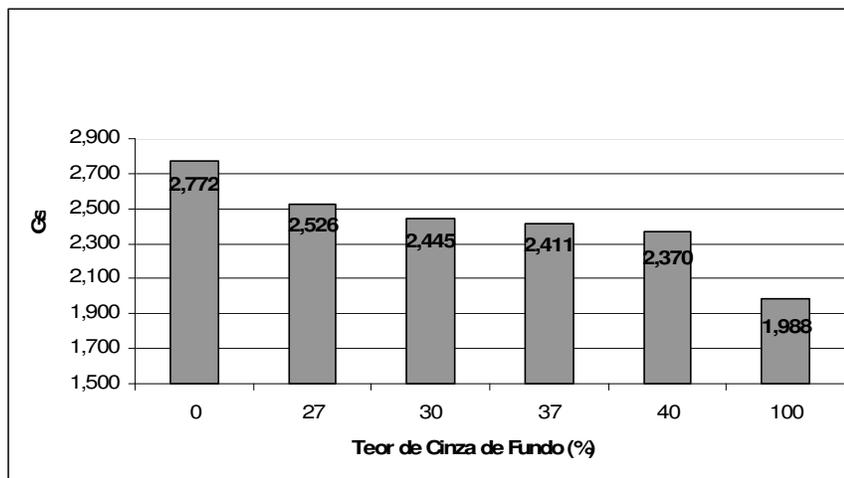


Figura 4.1.a – Variação da Massa Específica dos Grãos com o teor de cinza de Fundo

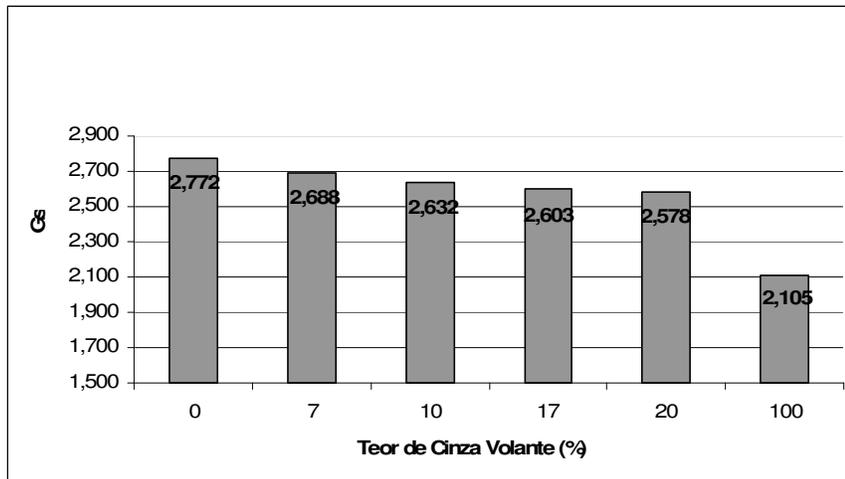


Figura 4.1.b - Variação da Massa Específica dos Grãos com o teor de cinza Volante

Ubaldo (2005), para cinzas oriundas da mesma usina termelétrica, determinou massa específica dos grãos para cinza de fundo e volante de 2,043 e 2,090, respectivamente. Tal autora faz referência aos resultados de Mendonça (2004), também com as mesmas cinzas, porém coletadas em outra época, com valores de 1,958 para cinza de fundo e 2,092 para cinza volante, demonstrando a variabilidade da qualidade e propriedades das cinzas, em função de diversos fatores, dentre eles, a composição química do carvão, como citado no capítulo 2. Isto é esperado por se tratar de um resíduo, em alguns casos podendo até ser maior.

Pesquisas realizadas com a cinza de fundo do Complexo Termelétrico de Jorge Lacerda, por Rocha (2001) e Leandro (2002; 2005) encontraram valores para G_s compatíveis com os determinados pelo presente estudo: 1,910; 1,980 e 1,979 g/cm³, respectivamente.

4.2.3. Análise Granulométrica

As curvas granulométricas de todos os materiais e misturas envolvidos na pesquisa foram determinadas considerando os procedimentos da NBR 7181/1984 (ABNT, 1984), no Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COPPE/UFRJ.

Os resultados encontrados na análise granulométrica do solo puro, cinza de fundo e volante, além das misturas, em percentual, são apresentados na Tabela 4.2; e as curvas granulométricas dos mesmos estão na Figura 4.2.

Tabela 4.2 – Resultados das Análises Granulométricas dos materiais deste estudo

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

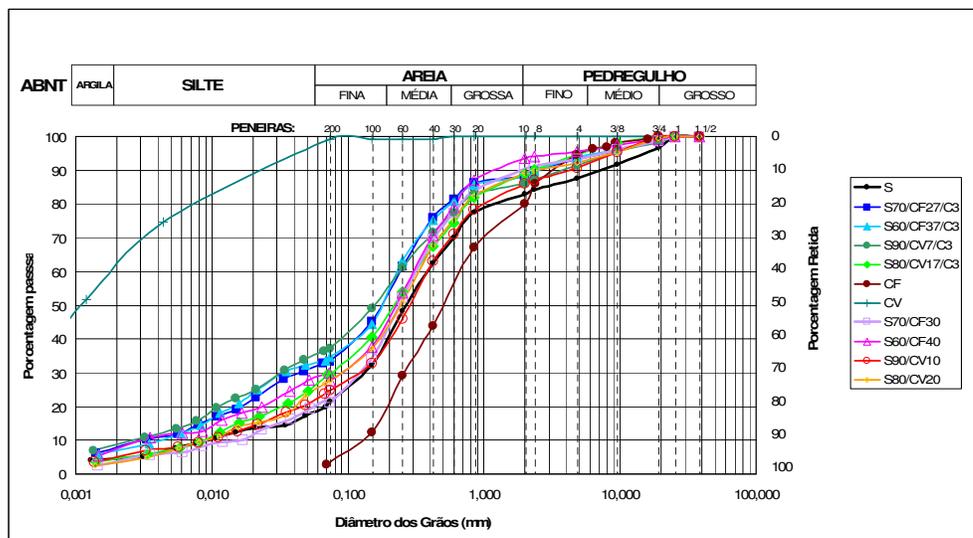


Figura 4.2 - Curvas Granulométricas dos materiais estudados.

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

Tendo em vista que se trata de um solo saprolítico, do horizonte C, como pode ser observado na Figura 3.3, a distribuição granulométrica se justifica e é esperado heterogeneidade ao longo da jazida.

4.2.3.1. Classificação SUCS

De acordo com a classificação do Sistema Unificado de Classificação dos Solos – SUCS, inicialmente elaborado pelo Prof. Casagrande (1948) para obras de aeroportos, tendo, atualmente, seu emprego generalizado e normatizado pela ASTM D2487 (1983), o solo se enquadra na classificação SM. Não é muito apropriado aplicar esta classificação para cinzas ou misturas tendo em vista que fogem do espaço de inferência para o qual a classificação foi proposta, no entanto, para simples comparação foi feita a aplicação para as cinzas e misturas utilizadas nesta pesquisa que obtiveram a classificação indicada na Tabela 4.3.

Considerando a classificação SUCS, a granulometria do solo não foi significativamente alterada, dado que as misturas estudadas mantiveram a mesma classificação do solo puro já que também não apresentaram plasticidade.

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

Tabela 4.3 – Classificação SUCS dos materiais desta pesquisa.

Material/Mistura	SUCS	
	Grupo	Material
S	SM	Areia Siltosa
CF	SM	Areia Siltosa
CV	ML	Silte
S70/CF27/C3	SM	Areia Siltosa
S60/CF37/C3	SM	Areia Siltosa
S90/CV7/C3	SM	Areia Siltosa
S80/CV17/C3	SM	Areia Siltosa
S70/CF30	SM	Areia Siltosa
S60/CF40	SM	Areia Siltosa
S90/CV10	SM	Areia Siltosa
S80/CV20	SM	Areia Siltosa

4.2.3.2. Classificação HRB

Segundo Pinto (2002), o sistema de classificação da Highway Research Board – HRB, ou sistema rodoviário de classificação é amplamente empregado na engenharia rodoviária em todo mundo e, foi proposto originalmente nos Estados Unidos, pelo Bureau of Public Roads. A classificação dos solos, neste

sistema, é feita com base na granulometria e limites de Atterberg e é normatizado pela AASHTO M145 (1973). Da mesma forma, a aplicação desta classificação para materiais compostos pode não ser aplicável, no entanto, visando simplesmente situar a análise granulométrica das cinzas e das misturas, a HRB foi utilizada também para estes. A classificação dos materiais e misturas tratados neste trabalho encontra-se apresentados na Tabela 4.4. O solo e as combinações solo – cinza permaneceram na classe A-2-4 de materiais de comportamento médio em termos de pavimentos.

Da mesma forma que a classificação anterior, a classificação da cinza volante obtida divergiu da demais, e corresponde à da pesquisa de Rohde et al. (2006): cinza volante oriunda de termelétrica da região sul do país enquadra-se como A-4, solo siltoso.

A questão das classificações tradicionais aplicadas à previsão do comportamento para pavimentação é questionada de longa data no meio rodoviário nacional, inclusive levou ao surgimento da classificação brasileira MCT para melhor se adequar à avaliação dos solos tropicais (Nogami e Cozzolino, 1985).

Motta (2011) diz: “Mesmo não sendo solo fino para o qual se aplica a MCT, de qualquer forma é preciso questionar a validade de se manter a aplicação das classificações tradicionais. Classificar tem a intenção de agrupar em classes de igual comportamento, a partir de ensaios simples e não mecânicos. Quando se faz mistura de um solo natural com resíduos, e ainda mais quando se usa a cal, há realmente mudanças no comportamento físico e químico do solo, com alteração variável com o tempo, que medir a qualidade geotécnica simplistamente pela granulometria e limites de consistência não é capaz de quantificar. Perde um pouco o sentido “classificar” para inferir julgamento de previsão do comportamento mecânico futuro, como se demonstra com os ensaios de carga repetida. Portanto, é mais simbólico este enquadramento”.

Tabela 4.4 - Classificação HRB dos materiais estudados nesta pesquisa.

Material/Mistura	HRB	
	Grupo	Material
S	A-2-4	Areia Siltosa
CF	A-2-4	Areia Siltosa
CV	A-4	Solo Siltoso
S70/CF27/C3	A-2-4	Areia Siltosa
S60/CF37/C3	A-2-4	Areia Siltosa
S90/CV7/C3	A-2-4	Areia Siltosa
S80/CV17/C3	A-2-4	Areia Siltosa
S70/CF30	A-2-4	Areia Siltosa
S60/CF40	A-2-4	Areia Siltosa
S90/CV10	A-2-4	Areia Siltosa
S80/CV20	A-2-4	Areia Siltosa

4.3. Ensaios de Caracterização Química e Ambiental

4.3.1. Composição Química

Os resultados dos ensaios de composição química, realizados no laboratório do Departamento de Engenharia Química da PUC-Rio, para as amostras de cinzas pesada e volante, e misturas com cal encontram-se na Tabela 4.5 em termos dos elementos químicos, e na Tabela 4.6 são mostrados os componentes químicos presentes nas misturas com cal. Este ensaio não foi reproduzido nas misturas sem a adição de cal, S70/CF30, S60/CF40, S90/CV10 e S809/CV20, por estas terem sido propostas em uma segunda etapa da metodologia experimental, quando estes ensaios já tinham sido realizados. Porém, considerando o baixo teor de cal utilizado nas misturas, acredita-se que a composição química das misturas sem cal será bem similar a de suas similares com cal, com exceção de alguns parâmetros, tais como de Cálcio.

No Quadro 4.1 estão apresentados os componentes químicos encontrados na composição química das cinzas de fundo e volantes oriundas também do Complexo Termelétrico de Jorge Lacerda, determinados por Mendonça(2004).

Tabela 4.5 – Elementos Químicos presentes nas Cinzas e Misturas deste estudo.

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

Tabela 4.6 – Componentes Químicos das Misturas deste estudo.

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

Quadro 4.1 - Componentes Químicos das Cinzas de Fundo e Volante determinados por Mendonça (2004). (Fonte: Ubaldo, 2005)

Composição Química		
Símbolos	MENDONÇA (2004)	
	Cinza de Fundo	Cinza Volante
SiO ₂	57,900	57,100
Al ₂ O ₃	27,300	28,700
Fe ₂ O ₃	5,500	4,400
CaO	1,400	2,000
K ₂ O	2,500	2,600
MgO	0,640	0,720
TiO ₂	1,100	1,300
ZrO ₂	0,120	0,130
S	<200ppm	0,400
PbO	-	<200ppm
Cl-	1,700	0,090
SO ₃	< 200ppm	1,000

Como apresentado na revisão, os principais componentes das cinzas, tanto de fundo quanto volante, são o silício, alumínio e ferro, o que também foi citado nos estudos de Ubaldo (2005). A representatividade destes elementos foi mantida nas misturas estudadas na presente pesquisa, de onde pode se concluir que tais elementos químicos também devem estar presentes em grande quantidade no solo utilizado. É sabido que em geral os componentes principais do solo são SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ que são participantes ativos do processo de estabilização.

No Quadro 4.2 de Chies et al. (2003, apud Ubaldo, 2005) estão mostradas as composições químicas de cinzas de carvão mineral, de fundo e volante, de outras usinas termelétricas localizadas no território brasileiro. Pode ser percebida pequena variabilidade entre as concentrações dos principais elementos químicos, explicada por possíveis variações na composição química do carvão mineral utilizado, originado de diferentes ou até da mesma jazida, diferenças existentes entre os sistemas de queima do carvão, dentre outras.

Quadro 4.2– Concentração dos principais constituintes das cinzas de fundo e volante de diferentes procedências. (Fonte: Chies (2003, apud Ubaldo, 2005))

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

CF¹ - Cinza de Fundo - CV² - Cinza Volante

4.3.2. Teor de Matéria Orgânica

O ensaio de teor de matéria orgânica foi realizado no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio, somente para as misturas com adição de cal, S70/CF27/C3, S60/CF37/C3, S90/CV7/C3 e S80/CV17/C3, assim como o ensaio para determinação da composição química e pelas mesmas razões só nestas amostras.

Os resultados encontrados na determinação do teor de matéria orgânica nas misturas mostraram que a presença desta não é relevante em nenhuma das misturas com cal, o que pode ser esperado também nas misturas sem cal, tendo em vista que eventual presença de matéria orgânica no solo não é esperada tendo em vista a profundidade de coleta e tipo de formação local (horizonte C) e nas cinzas o processo de fabricação com queima em elevadas temperaturas, elimina parcial ou totalmente a presença de matéria orgânica.

Nas misturas com cinza de fundo, S70/CF27/C3 e S60/CF37/C3, foram encontrados 0,96% e 0,91% de teor de matéria orgânica, já nas misturas com cinzas volantes, S90/CV7/C3 e S80/CV17/C3, os teores foram 1,05% e 1,00%.

Nas análises de Ubaldo (2005) do teor de matéria orgânica somente nas cinzas volantes e de fundo, derivadas do Complexo Termelétrico de Jorge Lacerda, foram encontrados, 1,03% e 2,09% de teor de matéria orgânica, respectivamente, na mesma ordem de grandeza dos resultados obtidos na presente pesquisa.

É válido ressaltar que pesquisas anteriores comprovaram que quando a matéria orgânica se mostra significativa na composição do solo ou da mistura, esta pode retardar ou até mesmo inibir a ocorrência das reações pozolânicas. Nardi (1975) relata que a presença de matéria orgânica influencia negativamente a reação, e destaca que a água utilizada deverá estar livre de impurezas como óleo, ácidos e matéria orgânica.

4.3.3. Ensaio de Solubilização e Lixiviação

Os resultados encontrados nos ensaios de solubilização e lixiviação, feitos apenas em amostras de cinzas, de fundo e volante, realizados pelo laboratório TASQA Serviços Analíticos Ltda. encontram-se nas Tabelas 4.7 a 4.10, a seguir. Os relatórios completos emitidos pela empresa responsável pela realização dos ensaios podem ser encontrados no Anexo A.

Tabela 4.7– Resultados Analíticos do Ensaio de Lixiviação – Parâmetros Inorgânicos (TASQA, 2010)

Parâmetros Inorgânicos				
Parâmetro	Limite de Quantificação (LQ) (mg/L)	Cinza de Fundo (mg/L)	Cinza Volante (mg/L)	VMP ¹ NBR 10.005:2004 Lixiviado (mg/L)
Arsênio	0,04	< LQ	< LQ	1
Bário	0,005	0,21	0,14	70
Cádmio	0,003	< LQ	< LQ	0,5
Chumbo	0,03	< LQ	< LQ	1
Cromo Total	0,002	< LQ	0,01	5
Fluoretos	0,05	0,1	1,77	150
Mercúrio	0,005	< LQ	< LQ	0,1
Prata	0,003	< LQ	< LQ	5
Selênio	0,05	< LQ	< LQ	1

Tabela 4.8 - Resultados Analíticos do Ensaio de Lixiviação – Parâmetros Orgânicos
(TASQA, 2010)

Parâmetros Orgânicos				
Parâmetro	Limite de Quantificação (LQ) (mg/L)	Cinza de Fundo (mg/L)	Cinza Volante (mg/L)	VMP ¹ NBR 10.005:2004 Lixiviado (mg/L)
Aldrin e Dieldrin	0,001	< LQ	< LQ	0,003
Benzeno	0,004	<LQ	< LQ	0,5
Benzo(a)pireno	0,002	< LQ	< LQ	0,07
Clordano (isômeros)	0,001	< LQ	< LQ	0,02
Cloreto de Vinila	0,4	< LQ	< LQ	0,5
Clorobenzeno	0,01	< LQ	< LQ	100
Clorofórmio	0,004	0,00	< LQ	6
m-Cresol	0,01	< LQ	< LQ	200
o-Cresol	0,01	< LQ	< LQ	200
p-Cresol	0,01	< LQ	< LQ	200
Cresol Total	0,01	< LQ	< LQ	200
2,4-D	0,01	< LQ	< LQ	3
DDT (p,p-DDT+p,p-DDE+p, p-DDD)	0,001	< LQ	< LQ	0,2
1,4-Diclorobenzeno	0,004	< LQ	< LQ	7,5
1,2-Dicloroetano	0,004	< LQ	< LQ	1
1,1-Dicloroetileno	0,004	< LQ	< LQ	3
2,4-Dinitrotolueno	0,01	< LQ	< LQ	0,13
Endrin	0,001	< LQ	< LQ	0,06
Heptacloro e seu epóxido	0,001	< LQ	< LQ	0,003
Hexaclorobenzeno	0,001	< LQ	< LQ	0,1
Hexaclorobutadieno	0,004	< LQ	< LQ	0,5
Hexacloroetano	0,01	< LQ	< LQ	3
Lindano (g BHC)	0,001	< LQ	< LQ	0,2
Metiletilcetona	0,5	< LQ	< LQ	200
Metoxicloro	0,001	< LQ	< LQ	2
Nitrobenzeno	0,01	< LQ	< LQ	2
Pentaclorofenol	0,01	< LQ	< LQ	0,9
Piridina	0,01	< LQ	< LQ	5
2,4,5-T	0,002	< LQ	< LQ	0,2
Tetracloroeto de Carbono	0,004	< LQ	< LQ	0,2
Tetracloroetileno	0,004	< LQ	< LQ	4
Toxafeno	0,002	< LQ	< LQ	0,5
2,4,5 –TP	0,01	< LQ	< LQ	1
Tricloroetileno	0,004	< LQ	< LQ	7
2,4,5-Triclorofenol	0,01	< LQ	< LQ	400
2,4,6-Triclorofenol	0,01	< LQ	< LQ	20

Tabela 4.9 - Resultados Analíticos do Ensaio de Solubilização – Parâmetros Inorgânicos (TASQA, 2010)

Parâmetros Inorgânicos				
Parâmetro	Limite de Quantificação (LQ) (mg/L)	Cinza de Fundo (mg/L)	Cinza Volante (mg/L)	VMP¹ NBR 10.006:2004 Solubilizado (mg/L)
Alumínio	0,07	< LQ	3,65	0,2
Arsênio	0,001	< LQ	< LQ	0,01
Bário	0,005	0,25	0,17	0,7
Cádmio	0,003	< LQ	< LQ	0,005
Chumbo	0,002	< LQ	< LQ	0,01
Cianetos	0,005	0,018	0,011	0,07
Cloretos	2,00	24,1	5,97	250
Cobre	0,003	0,02	0,02	2
Cromo Total	0,002	< LQ	0,01	0,05
Ferro	0,002	< LQ	< LQ	0,3
Fluoretos	0,05	0,14	2,52	1,5
Manganês	0,002	0,003	0,02	0,1
Merúrio	0,0005	< LQ	< LQ	0,001
Nitrato (como N)	0,1	0,4	0,1	10
Prata	0,003	< LQ	< LQ	0,05
Selênio	0,002	< LQ	< LQ	0,01
Sódio	0,05	21,3	36,3	200
Sulfato (expresso como SO ₄)	1,00	30,5	163	250
Surfactantes	0,03	0,065	0,065	0,5
Zinco	0,006	0,15	0,2	5

Tabela 4.10 - Resultados Analíticos do Ensaio de Solubilização – Parâmetros Orgânicos (TASQA, 2010)

Parâmetros Orgânicos				
Parâmetro	Limite de Quantificação (LQ) (mg/L)	Cinza de Fundo (MG/L)	Cinza Volante (mg/L)	VMP¹ NBR 10.006:2004 Solubilizado (mg/L)
Aldrin e Eldrin	0,00002	< LQ	< LQ	0,00003
Clordano (isômeros)	0,0002	< LQ	< LQ	0,0002
2,4-D	0,01	< LQ	< LQ	0,03
DDT (isômeros)	0,001	< LQ	< LQ	0,002
Endrin	0,0002	< LQ	< LQ	0,0006
Fenóis Totais	0,0025	< LQ	0,028	0,01
Heptacloro e seu epóxido	0,00002	< LQ	< LQ	0,00003
Hexaclorobenzeno	0,001	< LQ	< LQ	0,001
Lindano (g BHC)	0,001	< LQ	< LQ	0,002
Metoxicloro	0,001	< LQ	< LQ	0,02
2,4,5-T	0,002	< LQ	< LQ	0,002
2,4,5-TP	0,01	< LQ	< LQ	0,03
Toxafeno	0,002	< LQ	< LQ	0,005

Tendo em vista os resultados das tabelas 4.7 a 4.10, de acordo com as diretrizes dos Anexos F e G da NBR 10.004:2004 (ABNT, 2004), que regem os valores máximos permitidos nos ensaios de Lixiviação e Solubilização, respectivamente, a cinza de fundo foi classificada como pertencente à *Classe II B – Resíduo Inerte* e a cinza volante, como da *Classe II A – Resíduo Não Inerte*. A cinza volante recebeu tal classificação por ter apresentado no Ensaio de Solubilização, concentrações superiores às máximas permitidas por norma, de Alumínio, Fluoretos e Fenóis Totais.

Ubaldo (2005) relata que em sua pesquisa as cinzas, de fundo e volantes, de mesma origem das analisadas no presente estudo, ambas, foram inseridas na *Classe II A – Resíduo Não Inerte*, pois no Ensaio de Solubilização apresentaram concentrações acima das permitidas de Alumínio (cinza de fundo e volante), Cromo e Sulfatos (somente a cinza volante).

A classificação das cinzas volantes em *II A – Resíduo Não Inerte* não desclassifica sua utilização como agente cimentante em misturas com o solo, considerando que no ensaio de lixiviação, que representa a infiltração da água da chuva no solo, todos os parâmetros analisados encontram-se dentro dos limites permitidos. Entretanto, sugere-se em estudos futuros, a análise da influência dos parâmetros que extrapolaram limites da norma, para o solo e meio ambiente, em geral.

Segundo o anexo II da Resolução CONAMA 420 de 2009, que dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto a presença de substâncias químicas, a concentração máxima tolerável em reservatórios de água subterrânea para o Alumínio é de 3.500µg/l, o que afirma que a concentração apresentada pelas cinzas volantes, não causa dano a saúde humana.

4.4. Ensaio de Caracterização Mecânica

4.4.1. Ensaio de Compactação

Os ensaios de compactação foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COPPE/UFRJ, para as misturas com adição de cal, para corpos-de-prova 10 X 20 cm (diâmetro X altura) em energia modificada, e os resultados encontrados estão mostrados na Tabela 4.11 e na Figura 4.3, as

relações existentes entre as variações de massa específica aparente seca máxima (MEAS – g/cm³) e umidade ótima (%) e o teor de cinzas.

Tabela 4.11 – Resultados dos Ensaio de Compactação dos materiais deste estudo

Material/Mistura	Umidade Ótima (%)	Massa Esp. Seca Aparente Máxima (g/cm ³)
S	9,7	2,065
CF	38,0	1,846
CV	22,8	1,925
S70/CF27/C3	16,8	1,598
S60/CF37/C3	17,8	1,449
S90/CV7/C3	11,1	1,941
S80/CV17/C3	12,9	1,835

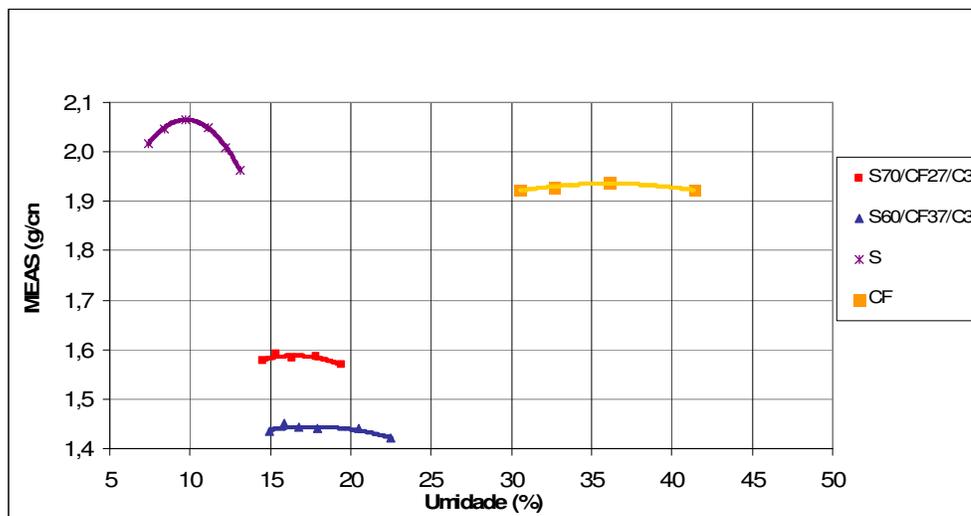


Figura 4.3 – Curvas de Compactação do Solo, Cinza Pesada e Misturas com Cinzas de Fundo deste estudo

Como esperado, na curva de compactação da cinza de fundo, bem como nas referentes às misturas S70/CF27/C3 e S60/CF37/C3, com presença desta cinza, não são percebidos pontos de massa específica aparente máxima e umidade ótima bem definidos. Usmen et al. (1983, apud Leandro, 2005) afirma que o ensaio de compactação das cinzas pesadas produz curvas “achatadas” devido a complexa estrutura porosa das partículas constituintes, o que também foi verificado por Lovell et al. (1991), como mostrado na Figura 4.3, com cinzas

de fundo de diferentes locais. As curvas são caracterizadas por apresentarem MEAS elevada para o ramo seco, e, também, no ramo úmido, intercalados por valores menores da massa específica seca aparente, para teores de umidade intermediários, e segundo Lovell et al. (1991) este comportamento é característico de materiais sem coesão.

Usmen et al. (1983, apud Leandro, 2005) relata que a massa específica aparente seca máxima da cinza pesada pode variar de 1,121 a 1,842 g/cm³, enquanto a umidade ótima pode apresentar valores na faixa entre 15 a 20%. Lovell et al. (1991), obtiveram valores de massa específica aparente seca máxima variando de 1,537 a 1,734 g/cm³ e umidade ótima entre 12 e 24%.

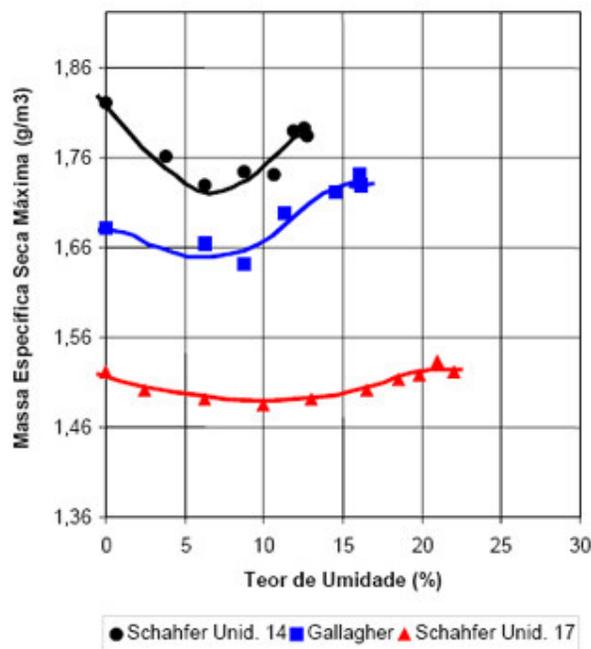


Figura 4.4– Curvas de Compactação típicas de Cinzas de Fundo (Fonte: Lovell et al., 1991)

Outros autores obtiveram resultados semelhantes em suas pesquisas, como por exemplo, Ubaldo (2005), apresentado na Figura 4.5 com cinzas de fundo provenientes do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, com umidade ótima de 40% e peso específico seco aparente máximo, 9,9 KN/m³.

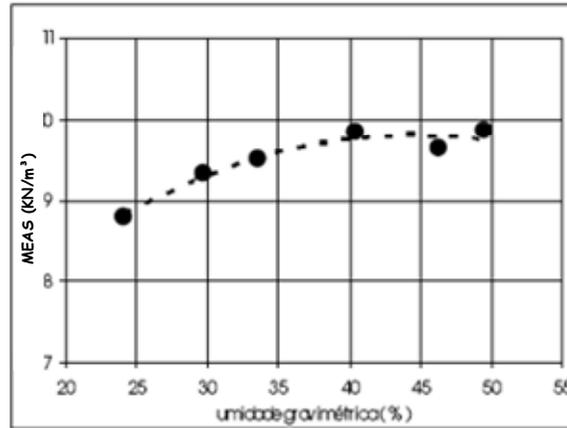


Figura 4.5 – Curva de Compactação da Cinza de Fundo do Complexo Termelétrico de Jorge Lacerda (Fonte: Ubaldo, 2005)

A curva de compactação do solo puro possui comportamento comum aos solos areno-siltosos, como foi classificada a amostra deste estudo, e compara-se ao padrão exemplificado por Pinto (2002), reproduzido na Figura 4.6, onde são apresentadas curvas de compactação de solos típicos do Brasil.

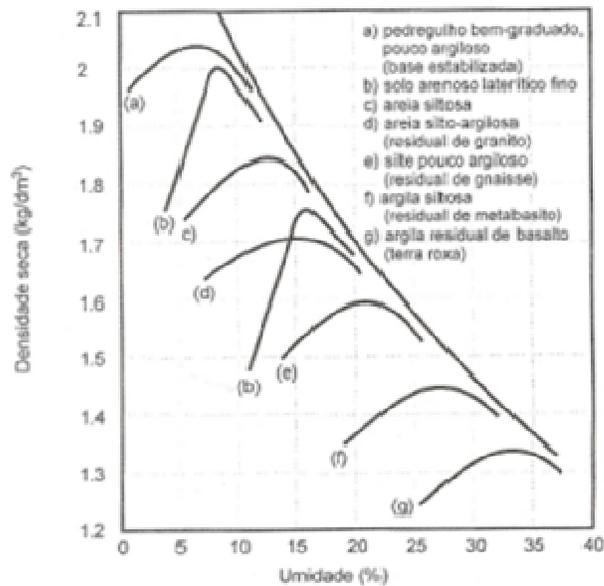


Figura 4.6 - Curvas de Compactação de Solos típicos do Brasil (Fonte: Pinto, 2002)

As curvas de compactação do solo puro e das misturas, S90/CV7/C3 e S80/CV17/C3 com a presença de cinza volante, Figura 4.7, ao serem comparadas apresentam pequenas variações de umidade ótima e MEAS máxima, o que pode ser justificado pelos baixos teores de cinza volante,

presentes nas composições das misturas. Este fato é ainda mais destacado quando se compara às variações existentes entre o solo puro e as misturas, S70/CF27/C3 e S60/CF37/C3, com cinza pesada, que apresentam mais variações que com cinza volante.

Na Figura 4.8 é apresentada a curva de compactação definida na pesquisa de Ubaldo (2005), para cinzas volantes, os valores encontrados para a umidade ótima e massa específica aparente seca máxima, foram 29% e 11,8 KN/m³, respectivamente. Tais valores são um pouco diferentes dos encontrados na presente pesquisa, mas o que pode ser justificado dado o grande intervalo de tempo entre os dois estudos, e todos os fatores que podem influenciar nas propriedades físico-químicas das cinzas.

Na Figura 4.9, são apresentadas curvas de compactação determinadas por Nardi (1975), para misturas de solos arenosos (83%), com cinza volante (13%), e cal (4%), para duas energias de compactação, definindo como umidade ótima 9,8% e massa específica aparente seca máxima, 1,926 g/cm³, para energia intermediária e, na modificada, 9,2% de umidade ótima e 1,968 g/cm³ de massa específica aparente seca máxima. Os valores apresentados por Nardi (1975) são semelhantes aos encontrados na presente pesquisa e as pequenas diferenças existentes podem ter ocorrido devido a diferença dos solos estudados e de eventuais diferenças nas características das cinzas, com grande intervalo de tempo de coleta entre as duas pesquisas.

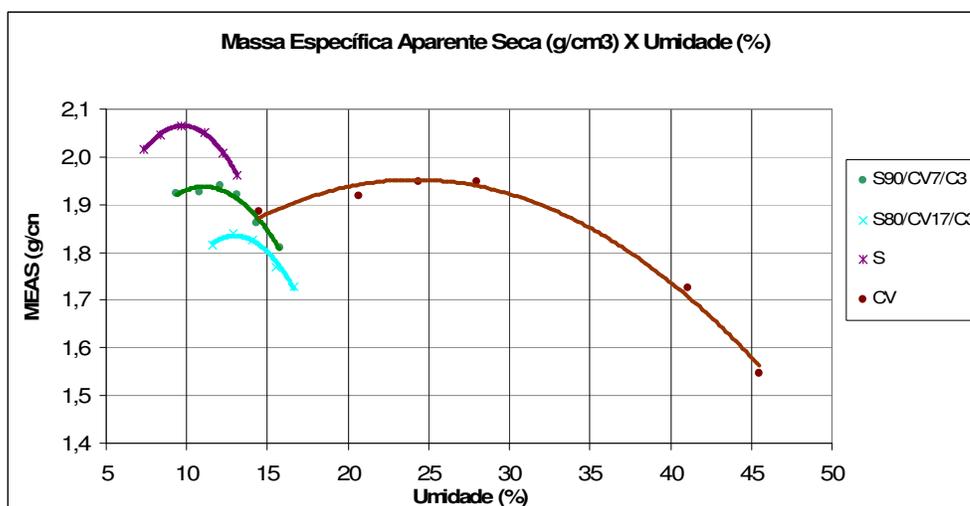


Figura 4.7– Curvas de Compactação do Solo, Cinza Volante e Misturas com Cinza Volante do presente estudo

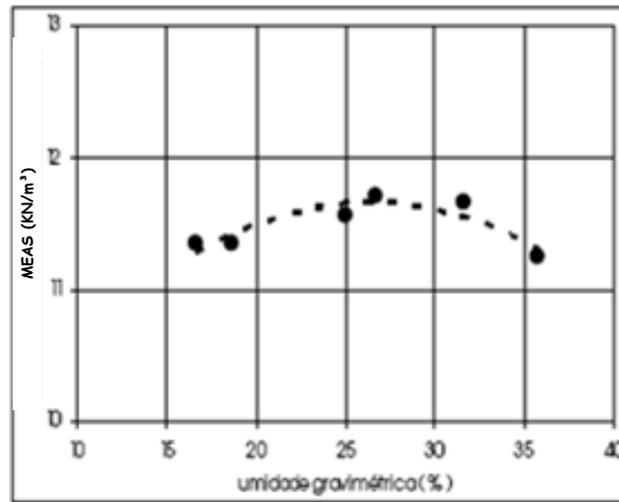


Figura 4.8 - Curva de Compactação da Cinza Volante do Complexo Termelétrico de Jorge Lacerda (Fonte: Ubaldo, 2005)

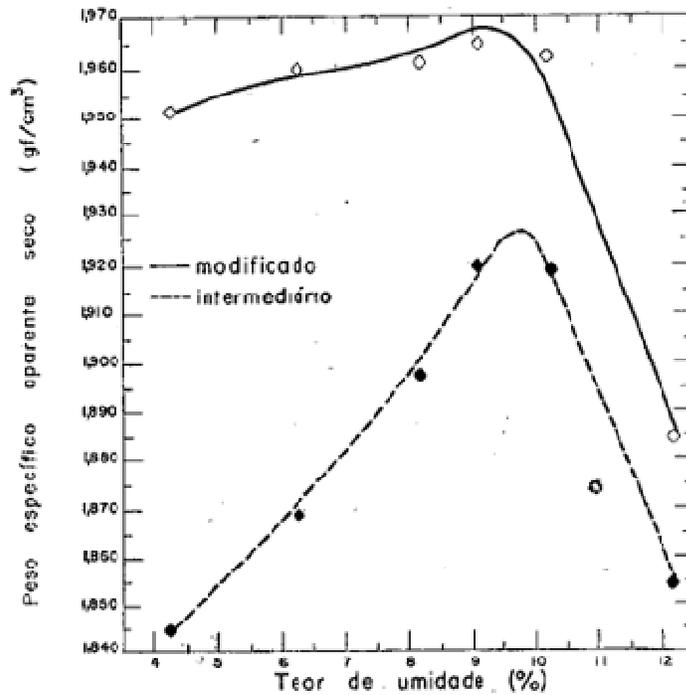


Figura 4.9 – Curvas de Compactação de Misturas Solo-Cinza Volante-Cal por Nardi (Fonte: Nardi, 1975)

Nas Figuras 4.10 e 4.11 são apresentadas as variações da massa específica aparente seca máxima com os teores de cinza de fundo e volante, respectivamente, nas misturas com cal e para o solo puro (0% de cinzas). Em

ambas é verificado que ao aumentar o teor de cinza nas misturas ocorre um decréscimo na massa específica aparente seca máxima.

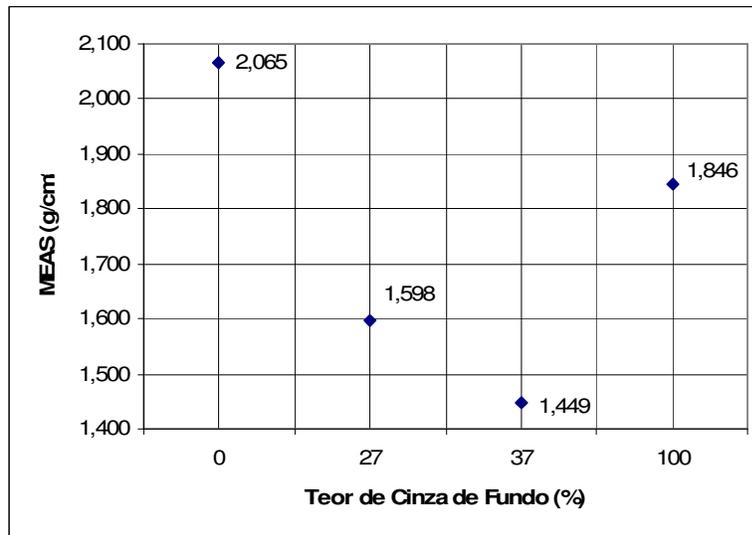


Figura 4.10 – Variação da Massa Esp. Aparente Seca Máxima com o teor de Cinza de Fundo do presente estudo

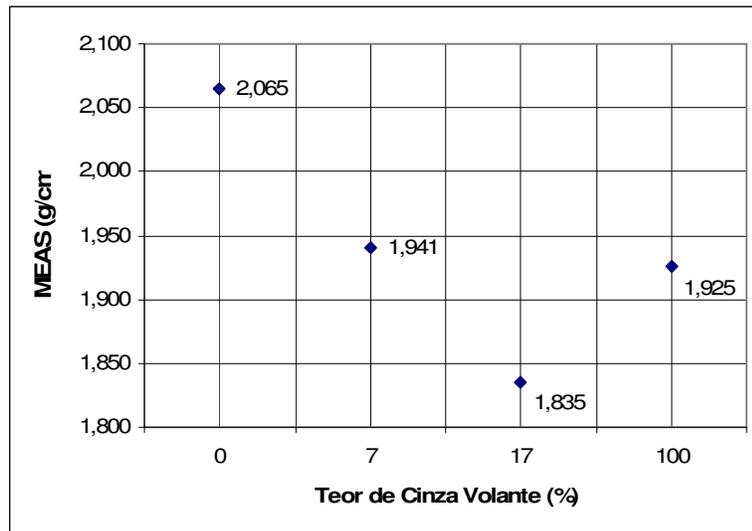


Figura 4.11 – Variação da Massa Esp. Aparente Seca Máxima com o teor de Cinza Volante do presente estudo

Nas Figuras 4.12 e 4.13, são apresentadas as variações da umidade ótima com os teores de cinza de fundo e volante, respectivamente. E o mesmo comportamento é verificado nos dois tipos de cinzas: aumento da umidade ótima, com o aumento do teor de cinzas nas misturas.

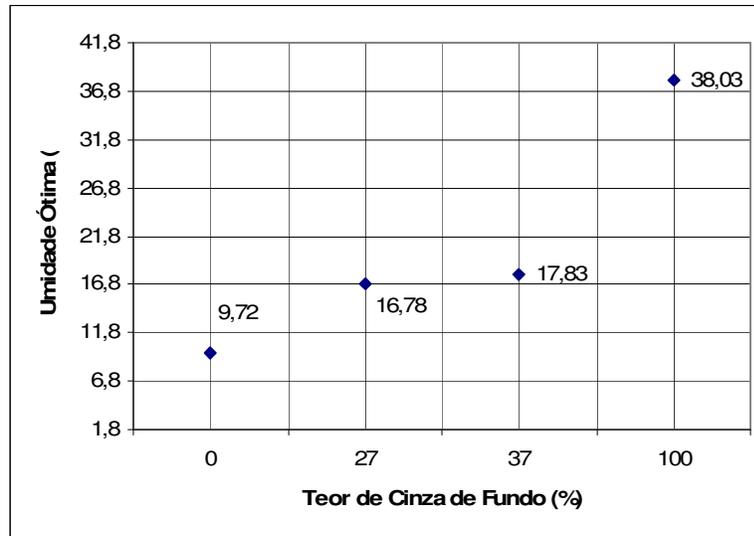


Figura 4.12 – Variação da Umidade Ótima com o teor de Cinza de Fundo

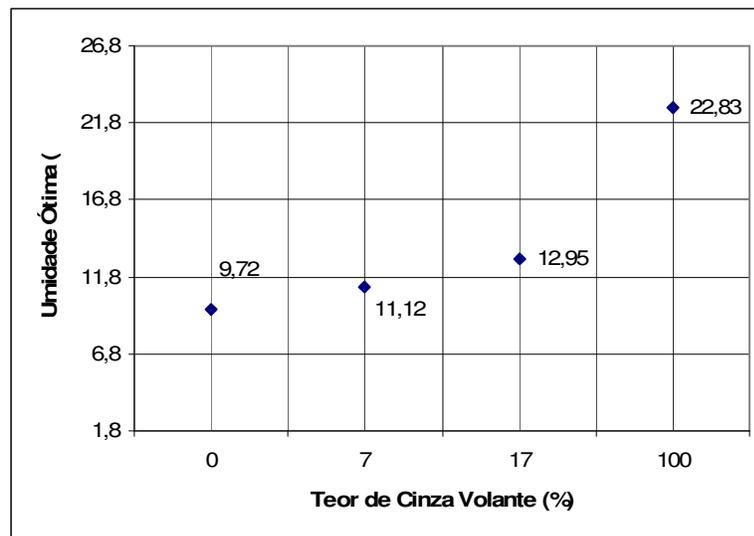


Figura 4.13 – Variação da Umidade Ótima com o teor de Cinza Volante

Não foram feitas novas curvas de compactação para as misturas sem a adição de cal, S70/CF30, S60/CF40, S90/CV10 e S80/CV20, dado que tais misturas foram inseridas no estudo com este em andamento e uma nova bateria de ensaios de compactação não era compatível com o cronograma. Os corpos-de-prova dos ensaios mecânicos de Módulo de Resiliência e Deformação Permanente no caso destas misturas foram moldados considerando a umidade ótima e MEAS da mistura de referência com a adição de cal: isto é, um corpo-de-prova da mistura S70/CF30, foi moldado com a umidade ótima e MEAS determinada pela curva de compactação da mistura S70/CF27/C3.

Este fato pode ter prejudicado as análises das misturas sem a adição de cal, uma vez que a cal tende a aumentar a umidade ótima, e os corpos-de-prova para estas misturas foram moldados com referência na umidade ótima das misturas com a adição de cal.

4.4.2. Ensaio de Módulo de Resiliência ou Resiliente

Para o Ensaio do Módulo de Resiliência, como já citado, foram moldados três corpos-de-prova para cada mistura com cal, ensaiados nos diferentes tempos de cura, pré-determinados, com o objetivo de obter maior representatividade dos resultados encontrados. Em sua totalidade, tais ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COPPE/UFRJ.

Os corpos-de-prova foram moldados na condição de umidade ótima e massa específica aparente máxima, na Energia Modificada de compactação e imediatamente após a homogeneização da mistura, como relatado anteriormente.

Nos ensaios no equipamento triaxial dinâmico da COPPE/UFRJ foram obtidos os valores de Módulo Resiliente para diferentes pares de tensões confinante (σ_3) e desviadora (σ_d) e a partir destes valores, com a utilização do programa computacional STATISTICA (STATSOFT, 2004), por correlação elástica, foram determinados os coeficientes k_1, k_2, k_3 do Modelo Composto, como apresentados na Tabela 4.12a e 4.12b.

Tabela 4.12 a– Coeficientes do Modelo Composto pelo Programa STATISTICA para os módulos de resiliência dos matérias deste estudo

Material/Mistura	Cura (dias)	Compactação		Módulo de Resiliência				
		wot (%)	MEAS máx. (g/cm3)	k1	k2	k3	Coef. de Correlação R ²	
S	0	9,72	2,065	251	0,54	-0,30	0,827	
				129	0,05	-0,04	0,064	
				197	0,46	-0,32	0,718	
S70/CF27/C3	0	16,78	1,544	653	0,63	-0,14	0,957	
	7			1756	0,67	0,17	0,861	
	28			798	0,47	-0,10	0,813	
	90	17,05	1,558	765	0,36	-0,07	0,745	
	0			531	0,60	-0,21	0,944	
	7			682	0,56	-0,13	0,904	
	28	16,79	1,546	712	0,41	-0,05	0,760	
	90			723	0,38	-0,05	0,731	
	0			1798	1,18	-0,11	0,937	
	S60/CF37/C3	7	17,61	1,436	647	0,52	-0,14	0,772
		28			1087	0,46	0,10	0,969
		90			748	0,37	-0,05	0,773
0		17,66	1,419	679	0,63	-0,13	0,983	
7				675	0,52	-0,07	0,912	
28				X	X	X	X	
90		17,66	1,404	685	0,32	-0,04	0,672	
0				501	0,55	-0,17	0,910	
7				644	0,54	-0,14	0,847	
28		11,39	1,902	851	0,44	0,05	0,904	
90				474	0,32	-0,21	0,354	
0				469	0,48	-0,15	0,833	
S90/CV7/C3	7	11,47	1,895	685	0,52	-0,07	0,904	
	28			1077	0,54	0,08	0,966	
	90			849	0,46	-0,07	0,719	
	0	11,25	1,926	455	0,52	-0,23	0,904	
	7			489	0,38	-0,24	0,723	
	28			1209	0,43	0,01	0,969	
	90	11,47	1,895	1209	0,33	-0,03	0,812	
	0			455	0,52	-0,17	0,930	
	7			543	0,40	-0,12	0,798	
	28	11,25	1,926	1150	0,48	0,01	0,935	
	90			981	0,31	-0,03	0,779	
	0			479	0,47	-0,11	0,736	
7	11,25	1,926	317	0,23	-0,24	0,573		
28			1467	0,49	-0,02	0,988		
90			1237	0,32	-0,03	0,821		

Tabela 4.12a – Coeficientes do Modelo Composto pelo Programa STATISTICA para os módulos de resiliência dos materiais deste estudo - continuação

Material/Mistura	Cura (dias)	Compactação		Módulo de Resiliência			
		wot (%)	MEAS máx. (g/cm ³)	K1	k2	k3	Coef. de Correlação R ²
S80/CV17/C3	0	12,59	1,824	383	0,48	-0,22	0,830
	7			871	0,47	-0,05	0,937
	28			1434	0,45	0,05	0,978
	90			1854	0,53	0,11	0,952
	0	12,79	1,798	382	0,45	-0,21	0,875
	7			771	0,43	-0,05	0,916
	28			1303	0,46	0,05	0,975
	90			1297	0,42	0,09	0,955
	0	12,78	1,803	383	0,46	-0,19	0,824
	7			843	0,47	-0,04	0,906
	28			1267	0,45	0,02	0,951
	90			1355	0,41	0,12	0,974

Tabela 4.12b – Coeficientes do Modelo Composto pelo Programa STATISTICA para os módulos de resiliência dos materiais deste estudo

Material/Mistura	Cura (dias)	Compactação		Módulo de Resiliência			
		wot (%)	MEAS máx. (g/cm ³)	K1	k2	k3	Coef. de Correlação R ²
70S/30CF	0	17,20	1,577	524	0,51	-0,08	0,957
	35			646	0,57	-0,02	0,980
	90			577	0,53	-0,06	0,967
	0	16,80	1,572	422	0,43	-0,12	0,620
	35			605	0,54	-0,05	0,981
	90			692	0,60	-0,01	0,973
	0	16,39	1,563	537	0,53	-0,10	0,949
	35			599	0,56	-0,08	0,958
	90			696	0,61	-0,03	0,967
60S/40CF	0	16,53	1,545	517	0,48	-0,08	0,934
	35			X	X	X	X
	90			590	0,52	-0,03	0,969
	0	16,85	1,546	565	0,50	-0,04	0,973
	35			X	X	X	X
	90			510	0,51	-0,12	0,939
	0	16,4	1,546	517	0,51	-0,08	0,933
	35			X	X	X	X
	90			550	0,51	-0,09	0,944

Tabela 4.12b – Coeficientes do Modelo Composto pelo Programa STATISTICA para os módulos de resiliência dos matérias deste estudo - continuação

Material/Mistura	Cura (dias)	Compactação		Módulo de Resiliência			
		wot (%)	MEAS máx. (g/cm ³)	K1	k2	k3	Coef. de Correlação R ²
90S/10CV	0	10,87	1,958	208	0,48	-0,25	0,798
	35			254	0,39	-0,17	0,729
	90			276	0,43	-0,10	0,860
	0	11,58	1,963	180	0,45	-0,36	0,630
	35			230	0,49	-0,21	0,778
	90			139	0,42	-0,17	0,789
	0	11,32	1,960	244	0,45	-0,21	0,800
	35			231	0,39	-0,26	0,637
	90			311	0,42	-0,12	0,855
80S/20CV	0	11,27	1,920	242	0,42	-0,22	0,777
	35			185	0,33	-0,32	0,540
	90			305	0,39	-0,11	0,839
	0	11,32	1,924	114	0,26	-0,24	0,510
	35			169	0,33	-0,40	0,536
	90			333	0,40	-0,07	0,866
	0	11,44	1,884	X	X	X	X
	35			241	0,40	-0,20	0,685
	90			277	0,40	-0,10	0,816

Como observado por Silva (2003), a visualização da superfície 3D do Modelo Composto (Equação 3.4), gerada pelo programa computacional STATISTICA traz como vantagem adicional a facilidade na observação de qual tensão mais exerce influência no comportamento resiliente do solo, e os sentidos crescente ou decrescente. Ainda da observação dos valores, em módulo, dos coeficientes, k_2 e k_3 , pode-se determinar se a relação com tais tensões é crescente ou decrescente e, a razão k_2/k_3 determina o quanto a tensão confinante é mais influente que a tensão desviadora.

Deste modo, considerando os coeficientes, k_2 e k_3 , apresentados na Tabela 4.12a e 4.12b, pode-se concluir que tanto no solo puro como em todas as misturas estudadas, a tensão confinante exerce maior influência no comportamento resiliente, assim como acontece na maioria dos materiais granulares.

No Anexo B são apresentadas como exemplo, todas as superfícies obtidas com os resultados dos ensaios no espaço tridimensional [$\sigma_3 \times \sigma_d \times MR$] em um ensaio representativo de cada tempo de cura, para a faixa de tensões pré-determinadas, comumente utilizadas em projetos e cálculos de pavimentos,

baseados no Modelo Composto. O propósito da obtenção destas superfícies é a previsão de Módulos de Resiliência para diversas combinações de tensão desviadora e confinante.

No Anexo B, também, estão representadas as relações do Modelo Composto para as misturas sem a adição de cal, nos diferentes tempos de cura estudados. Neste caso, optou-se por realizar três diferentes tempos de cura, 0, 35 e 90 dias.

Em alguns dos ensaios de módulo de resiliência previstos ocorreram problemas durante sua execução, o que ocasionou perda dos dados e diminuição da representatividade dos resultados de algumas misturas em um dado tempo de cura. Por este motivo, na Tabela 4.12a e 4.12b e em algumas das Figuras referentes a superfícies 3D, são apresentados somente dois gráficos ao invés dos três esperados para cada mistura, como por exemplo, no caso da mistura S60/CF37/C3 com o ensaio de 28 dias de cura, no qual houve um problema no software utilizado na realização do ensaio que não registrou os dados do mesmo, ou ainda, na mistura S80/CV20, quando ocorreu falta de energia elétrica durante a execução do ensaio. Quanto aos ensaios previstos para a mistura S60/CF40 com 35 dias de cura houve uma falha de cronograma e os mesmos não puderam ser realizados. Em outros casos, estas falhas foram contornadas e outros corpos-de-prova foram moldados para a realização de novos ensaios.

Em outros ensaios, como exposto na Tabela 4.12a, é notado que alguns coeficientes do modelo composto desviam da média apresentada pelos demais corpos de prova, tal fato pode ser justificado por algum eventual problema na moldagem dos mesmos.

A análise dos resultados de módulo de resiliência será feita por partes a seguir.

4.4.2.1. Influência do Tempo de Cura

Como visto na revisão bibliográfica, agentes cimentantes de natureza pozolânica, artificialmente introduzidos como mecanismo de estabilização de solos, têm no tempo de cura uma das variáveis mais significativas para a caracterização do comportamento mecânico, uma vez que este afeta diretamente a efetividade do grau de cimentação da mistura. O tempo de cura pode ser considerado o principal fator influente no ganho de resistência à

compressão simples, à temperatura ambiente (aproximadamente 21 °C), para materiais estabilizados quimicamente, especialmente com cal.

Assim, a análise da influência do tempo de cura no comportamento mecânico das misturas torna-se de suma importância dado que a estabilização química do solo estudado, através de reações, entre o solo, cinzas de fundo ou volante, e cal necessita de tempo para se tornar efetiva em termos de resistência e deformabilidade.

Como referido no Capítulo de metodologia, foram realizados ensaios de módulo de resiliência para as misturas com cal, em quatro tempos de cura diferentes e pré-determinados (0, 7, 28 e 90 dias), já para as misturas somente com cinzas foram feitos ensaios com três tempos de cura (0, 35 e 90 dias). É importante lembrar que para esta análise, optou-se por moldar três corpos-de-prova de cada mistura a ser ensaiado em todos os tempos de cura pré-determinados: um mesmo corpo-de-prova foi submetido ao Ensaio de Módulo de Resiliência três ou até quatro vezes, dependendo da mistura. Esta opção foi feita, para diminuir a influência de outros fatores na análise da influência do tempo de cura, como por exemplo, os fatores envolvidos no processo de moldagem – umidade e massa específica aparente seca do corpo - de - prova.

Nas Figuras 4.14 a 4.17 são apresentadas as relações do Módulo de Resiliência com a tensão confinante, mais influente no caso dos materiais estudados, nos diferentes tempos de cura, para cada mistura. A cura dos corpos-de-prova foi realizada em câmara úmida do Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COPPE/UFRJ.

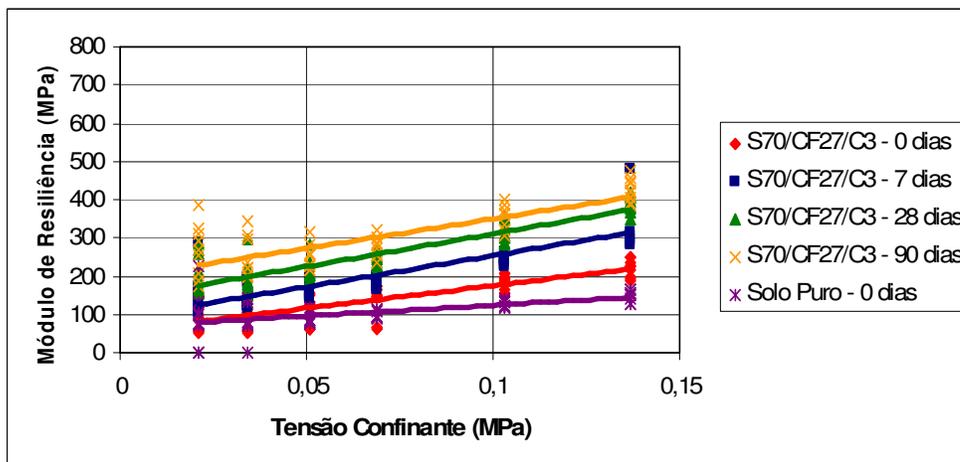


Figura 4.14 – Variação do Módulo Resiliente vs. Tensão Confinante para Mistura S70/CF27/C3 para os diferentes tempos de cura.

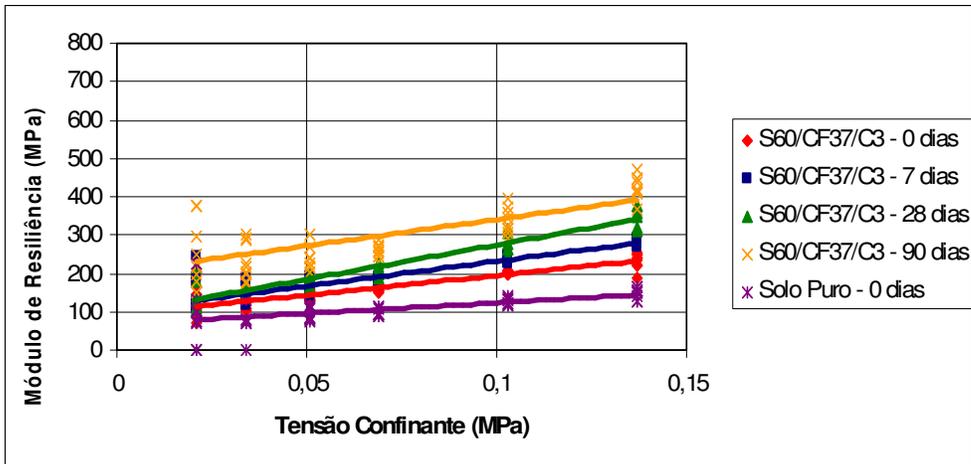


Figura 4.15 – Variação do Módulo Resiliente vs. Tensão Confinante para Mistura S60/CF37/C3 para os diferentes tempos de cura.

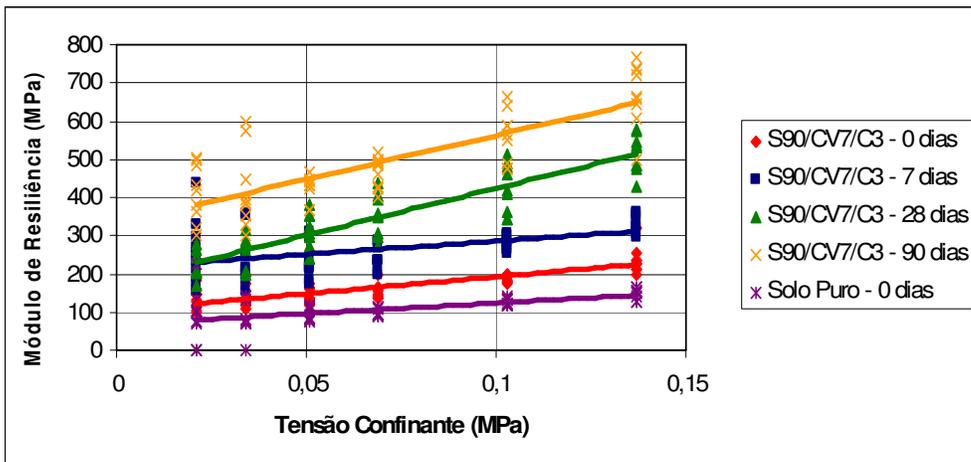


Figura 4.16 - Variação do Módulo Resiliente vs. Tensão Confinante para Mistura S90/CV7/C3 para os diferentes tempos de cura.

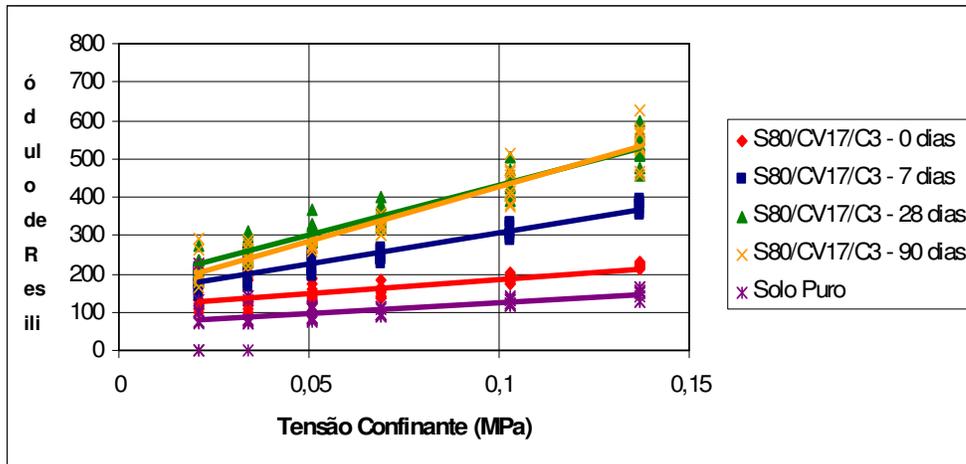


Figura 4.17 – Variação do Módulo Resiliente vs. Tensão Confinante para Mistura S80/CV27/C3 para os diferentes tempos de cura.

Comparando o tempo zero de todas as misturas com o módulo de resiliência do solo puro já se nota um ganho de rigidez, mesmo que não muito acentuado, somente a presença “granulométrica” das cinzas e cal já provocaram algum efeito estabilizante. Também pode ter ocorrido as primeiras reações da cal com os finos.

Analisando os resultados das misturas com cal, pode-se perceber que em todas houve aumento do Módulo de Resiliência com a cura. Isto comprova a ocorrência de reações químicas e/ou pozolânicas de melhoria real das características do solo e diminuição da deformabilidade, o que é buscado para diminuir a flexão do revestimento e aumentar a vida de fadiga.

Na mistura S70/CF27/C3 o aumento do Módulo de Resiliência, em relação ao Solo Puro, para baixas tensões confinantes foi aproximadamente de 150%, e um pouco superior para altas tensões confinantes, algo em torno de 180%. O ganho do Módulo de Resiliência na mistura S60/CF37/C3 foi bem similar ao comportamento da mistura anterior, para baixas tensões confinantes, 150% e de 160%, para elevados valores de σ_c . Este fato é relevante, uma vez que, a cinza de fundo, não é considerada uma pozolana, entretanto, com a adição de cal às misturas pode-se perceber que esta promove no solo algum tipo de estabilização química, melhorando seu comportamento mecânico. É importante lembrar que a porcentagem de argila no solo é de 5%.

Em ambas as misturas com a presença de cinzas volantes (CV), como esperado, houve aumento do Módulo de Resiliência, em níveis superiores aos das misturas com a cinza de fundo, especialmente para baixo teor de CV. A

mistura S90/CV7/C3 apresentou ganhos da ordem de 310 % a 354%, em baixos e elevados valores de tensão confinante, respectivamente, em relação ao Solo Puro. Já na mistura S80/CV17/C3, os ganhos foram inferiores ao da mistura com menor teor de cinzas volantes, da ordem de 110% a 250%, para baixas e altas tensões confinantes, respectivamente, em relação ao Solo Puro.

Em relação ao resultado da mistura S80/CV17/C3 (Figura 4.17), é importante destacar que para os tempos de cura de 28 e 90 dias os MR foram muito semelhantes, o que possivelmente representa uma estagnação das reações químicas, ou seja, estas teriam se realizado por completo no tempo de cura de 28 dias. Tal fato pode ser atribuído ao teor de cinzas volantes, que pode ter sido superior a um suposto “teor ótimo” de cinzas volantes para as condições e materiais estudadas.

Tendo em vista os resultados dos Ensaio de Módulo de Resiliência que com tempo zero já mostravam algum efeito, e com cal foi constatada a influência do tempo de cura, e possível reações pozolânicas, foi proposta uma segunda etapa de ensaios, com misturas nas mesmas proporções solo-cinza, só que sem adição da cal. A finalidade é isolar a influência das reações químicas entre a cal e as cinzas no comportamento mecânico das misturas ou mesmo avaliar se vale a pena somente contar com as cinzas. Tais relações são apresentadas nos gráficos a seguir nas Figuras 4.18 a 4.21.

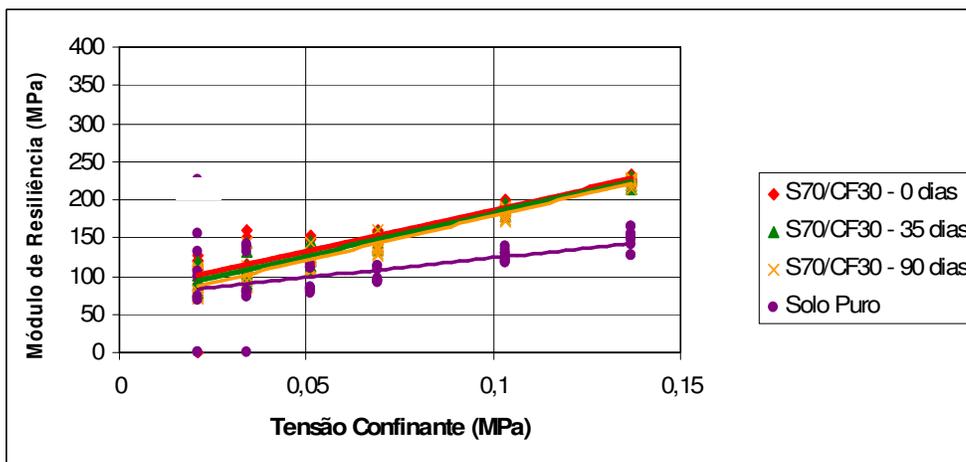


Figura 4.18- Variação do Módulo Resiliente vs. Tensão Confinante para Mistura S70/CF30 para os diferentes tempos de cura.

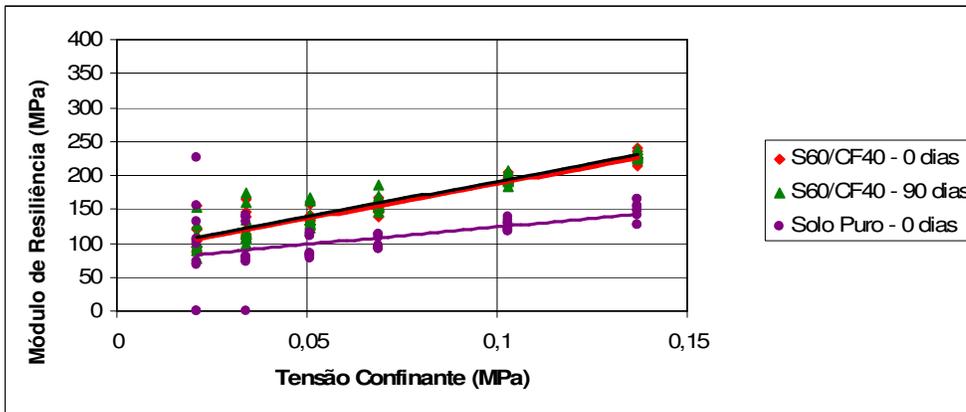


Figura 4.19 – Variação do Módulo Resiliente vs. Tensão Confinante para Mistura S60/CF40 para os diferentes tempos de cura.

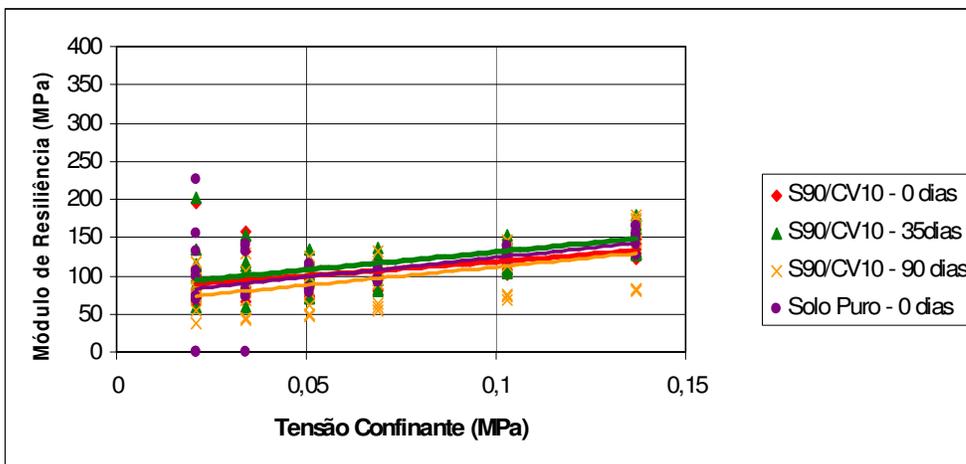


Figura 4.20 - Variação do Módulo Resiliente vs. Tensão Confinante para Mistura S90/CV10 para os diferentes tempos de cura.

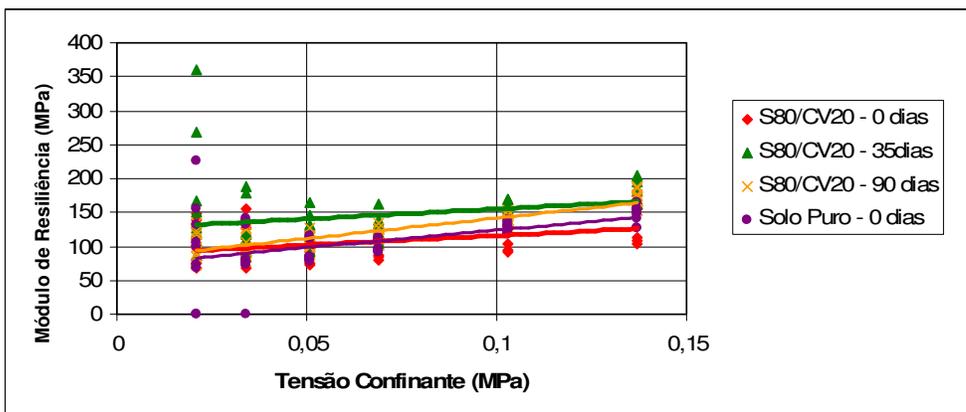


Figura 4.21 - Variação do Módulo Resiliente vs. Tensão Confinante para Mistura S80/CV20 para os diferentes tempos de cura.

O comportamento das misturas S70/CF30 e S60/CF40, com presença somente da cinza de fundo (ausência da cal) foram bem semelhantes, apresentando ganhos de até 50% nos valores de Módulo de Resiliência, para elevadas tensões confinantes e quase nenhum ganho para baixas tensões confinantes. Em ambas as misturas não houve aumento do Módulo de Resiliência com o tempo de cura, o que demonstra que a presença da cal é necessária para a ocorrência de reações químicas entre o solo e as cinzas de fundo, que somente as cinzas não são capazes de promover uma estabilização química do solo, mas melhoram o comportamento tensão – deformação mesmo que pouco, o que já é um ganho: pode-se melhorar o meio ambiente confinando as cinzas e diminuir a exploração de volumes correspondentes de jazida.

Entretanto é possível perceber que com a adição das cinzas de fundo, ocorreu melhora imediata do Módulo de Resiliência, para os dois teores estudados, tal comportamento pode ser justificado por provável estabilização granulométrica do solo com a adição da cinza de fundo.

Nas misturas S90/CV10 e S80/CV20 não ocorreu aumento nos valores de Módulo de Resiliência em relação ao Solo Puro, com a cura, o que pode evidenciar o não acontecimento de estabilização granulométrica ou química.

Considerando todos os gráficos apresentados para análise da influência do tempo de cura, pode se perceber que a cal exerce forte influência no aumento dos valores de Módulo de Resiliência, o que será detalhado no item Influência da Cal nas Misturas com Cinzas de Fundo e Volante.

4.4.2.2. Influência do Teor e Tipo de Cinzas

Um dos objetivos específicos da presente pesquisa é a avaliação do teor de cinzas que se deve misturar ao solo selecionado e análise do comportamento dos tipos de cinza como fator influente no comportamento mecânico das misturas solo-cinzas-cal. Tais relações são apresentadas nas Figuras 4.22 a 4.29, comparando-se os resultados obtidos nos ensaios de módulo de resiliência para as misturas com o mesmo tipo de cinza, no mesmo tempo de cura, mas com teores de cinzas diferentes.

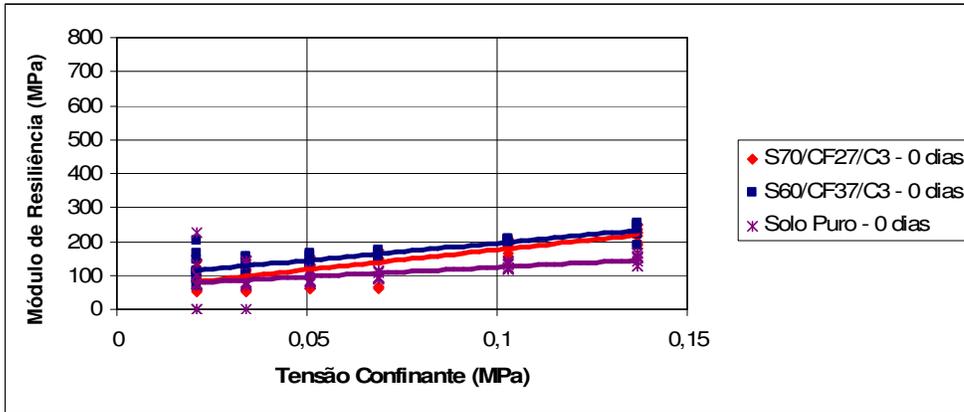


Figura 4.22 – Influência do Teor de Cinza de Fundo nas Misturas S70/CF27/C3 e S60/CF37/C3 no tempo de cura de 0 dias

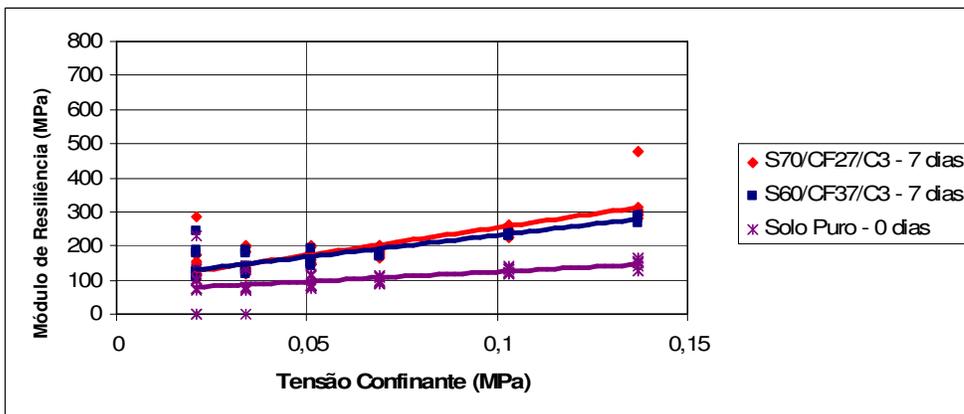


Figura 4.23 - Influência do Teor de Cinza de Fundo nas Misturas S70/CF27/C3 e S60/CF37/C3 no tempo de cura de 7 dias

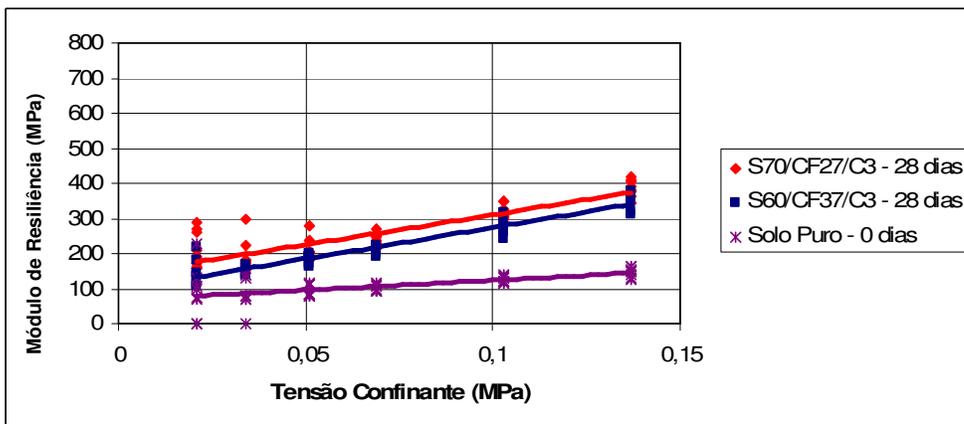


Figura 4.24 - Influência do Teor de Cinza de Fundo nas Misturas S70/CF27/C3 e S60/CF37/C3 no tempo de cura de 28 dias

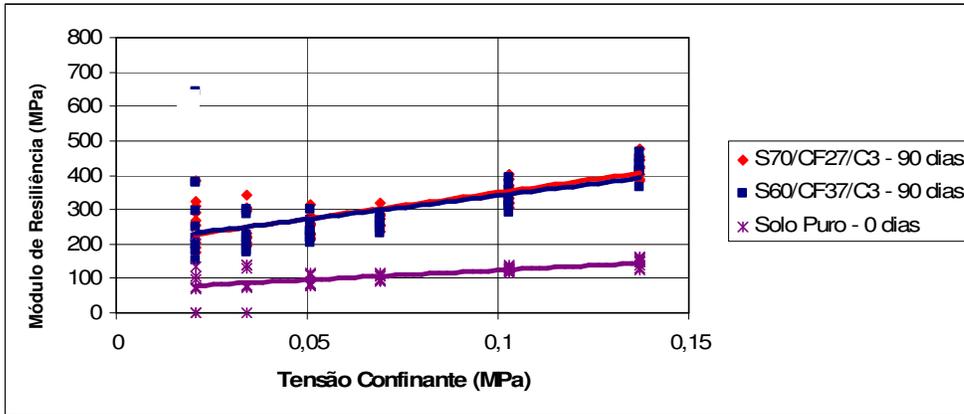


Figura 4.25 - Influência do Teor de Cinza de Fundo nas Misturas S70/CF27/C3 e S60/CF37/C3 no tempo de cura de 90 dias

Os resultados apresentados pelas misturas com a presença de cinza de fundo na proporção de 27 e 37% e cal foram bem semelhantes em todos os tempos de cura analisados: sempre superiores ao do Solo Puro, e aumentando gradativamente com a cura, mas bem próximos entre si. Com dois teores não foi possível a determinação de um possível “teor ótimo” de cinza de fundo nas condições analisadas.

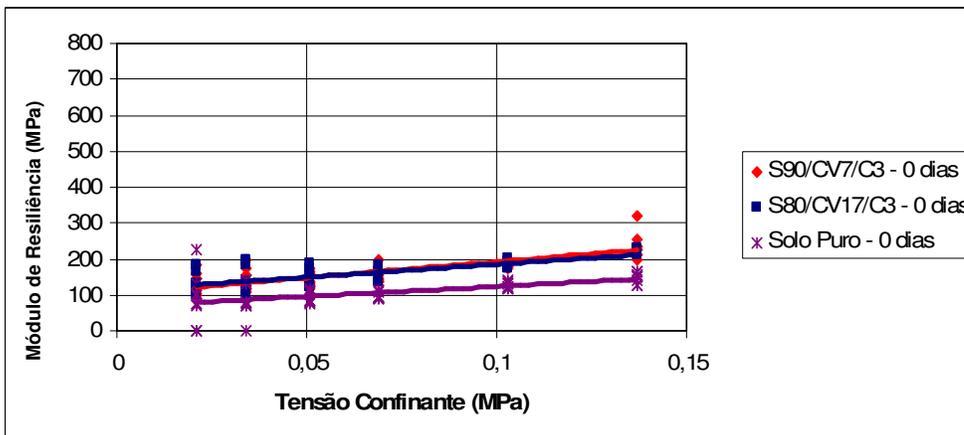


Figura 4.26 - Influência do Teor de Cinza Volante nas Misturas S90/CV7/C3 e S80/CV17/C3 no tempo de cura de 0 dias

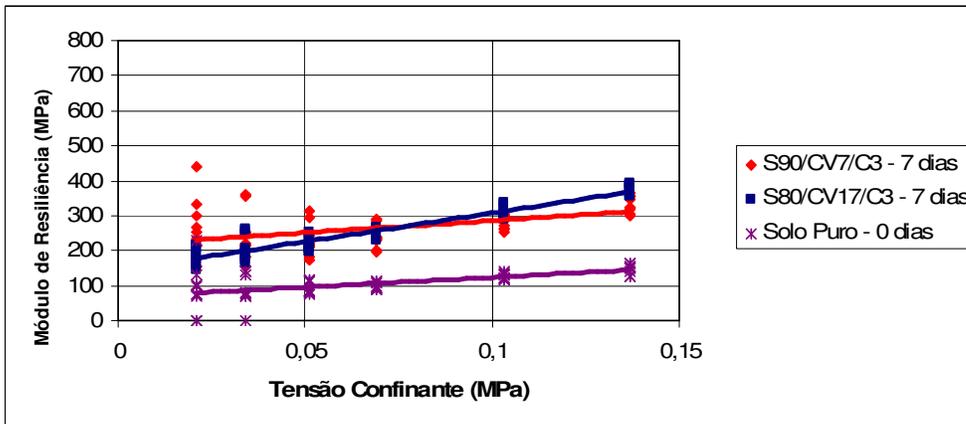


Figura 4.27 - Influência do Teor de Cinza Volante nas Misturas S90/CV7/C3 e S80/CV17/C3 no tempo de cura de 7 dias

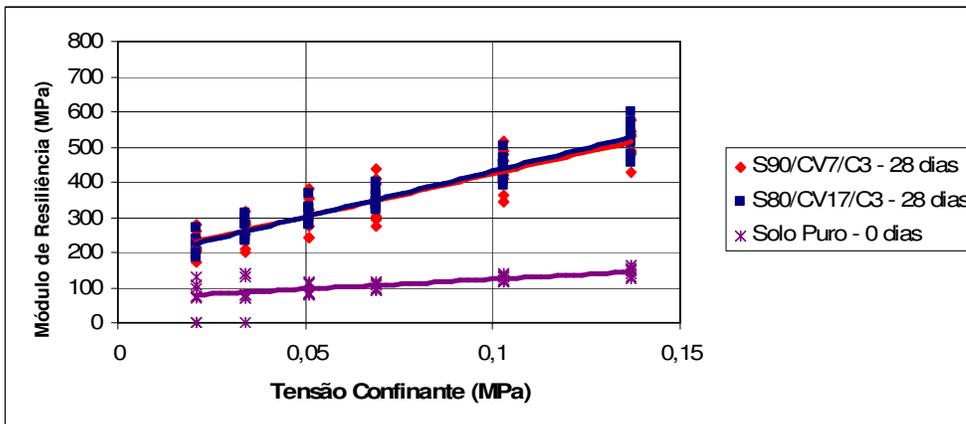


Figura 4.28 - Influência do Teor de Cinza Volante nas Misturas S90/CV7/C3 e S80/CV17/C3 no tempo de cura de 28 dias

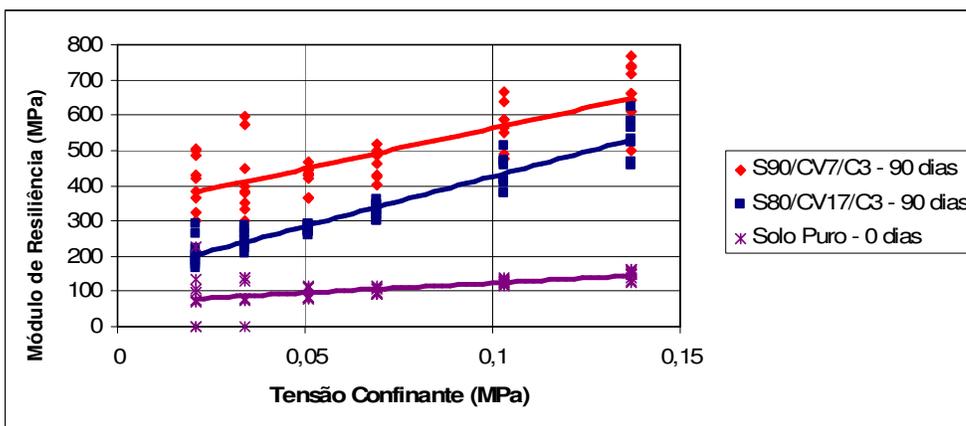


Figura 4.29 - Influência do Teor de Cinza Volante nas Misturas S90/CV7/C3 e S80/CV17/C3 no tempo de cura de 90 dias

Já nas misturas com cinzas volantes, S90/CV7/C3 e S80/CV17/C3, foi perceptível diferença no aumento do Módulo de Resiliência, no ensaio com tempo de cura de 90 dias. Nos ensaios anteriores, quando se acredita que as reações pozolânicas ainda não ocorreram por completo, ambas as misturas apresentaram resultados muito semelhantes.

A semelhança existente entre os resultados nos ensaios com menores tempos de cura, possivelmente pode ser justificada na similaridade entre as curvas granulométricas de ambas as misturas, dado que inicialmente, a estabilização granulométrica exerce papel mais importante que a estabilização química, uma vez que as reações ainda não ocorreram por completo. Entretanto, com o passar do tempo e a concretização das reações pozolânicas, a mistura S90/CV7/C3, obteve melhor resultado, mesmo com teor de cinza volante inferior ao da mistura S80/CV17/C3, o que possivelmente sinaliza para um “teor ótimo” de cinza volante para o solo estudado. Estudos futuros podem pesquisar mais teores para “acertar” melhor o alvo, talvez em torno de 7% de cinza volante em peso. Aparentemente a adição de cinza volante à mistura acima de um dado teor pode ser prejudicial ao comportamento mecânico do material.

Nas Figuras 4.30 a 4.34 constam os gráficos com o comportamento das misturas sem cal, o que proporciona a análise individual do papel das cinzas nas misturas com o solo.

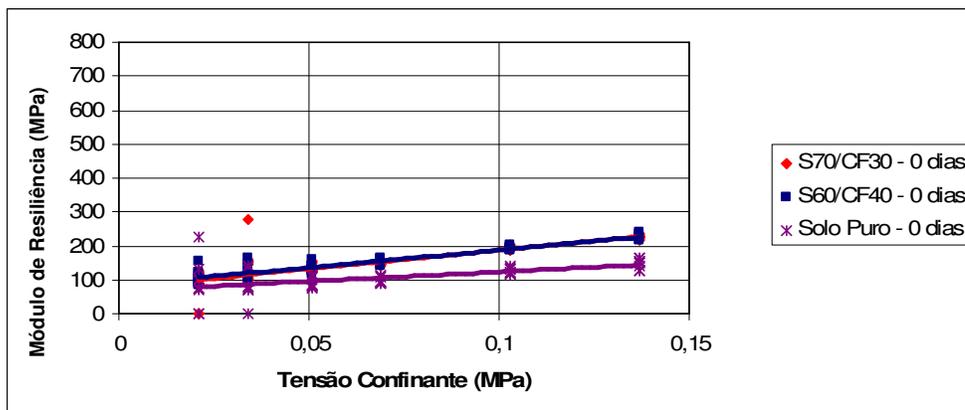


Figura 4.30 - Influência do Teor de Cinza de Fundo nas Misturas S70/CF30e S60/CF40 no tempo de cura de 0 dias

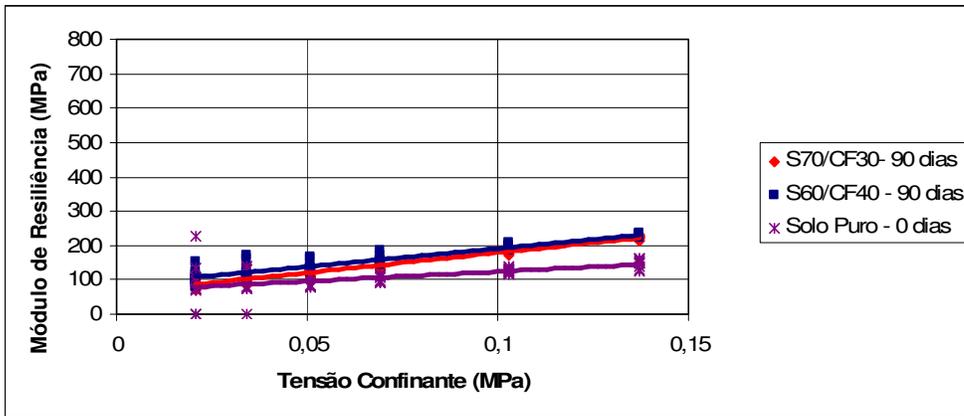


Figura 4.31 - Influência do Teor de Cinza de Fundo nas Misturas S70/CF30e S60/CF40 no tempo de cura de 90 dias.

Os teores de cinzas de fundo estudados sem a adição de cal apresentaram resultados muito semelhantes nos diferentes tempos de cura, sem apresentar representativos ganhos de módulo de resiliência, porém com comportamento mecânico superior ao do Solo Puro.

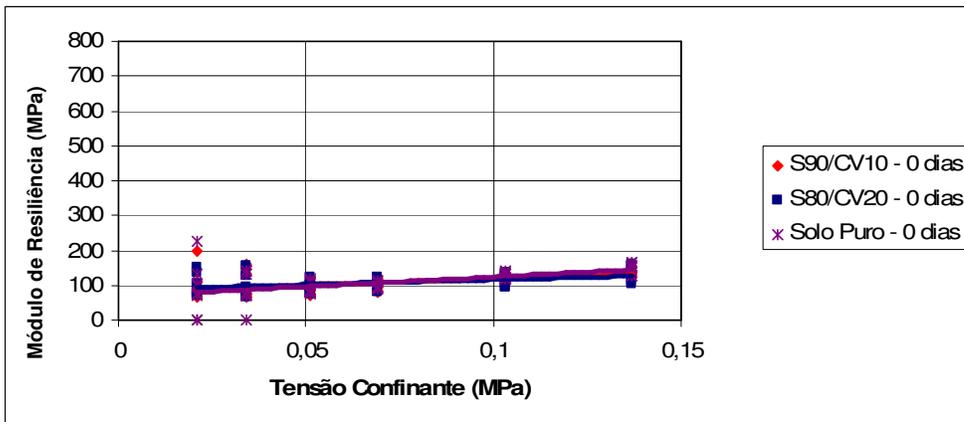


Figura 4.32 - Influência do Teor de Cinza Volante nas Misturas S90/CV10e S80/CV20 no tempo de cura de 0 dias

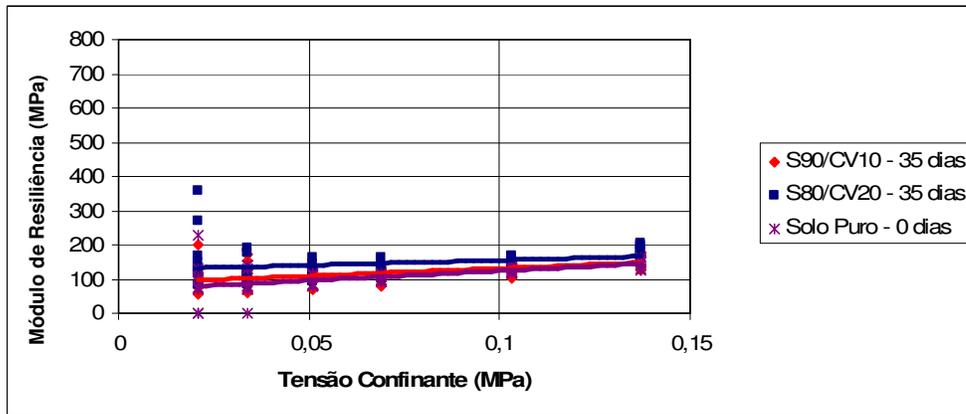


Figura 4.33 - Influência do Teor de Cinza Volante nas Misturas S90/CV10e S80/CV20 no tempo de cura de 35 dias

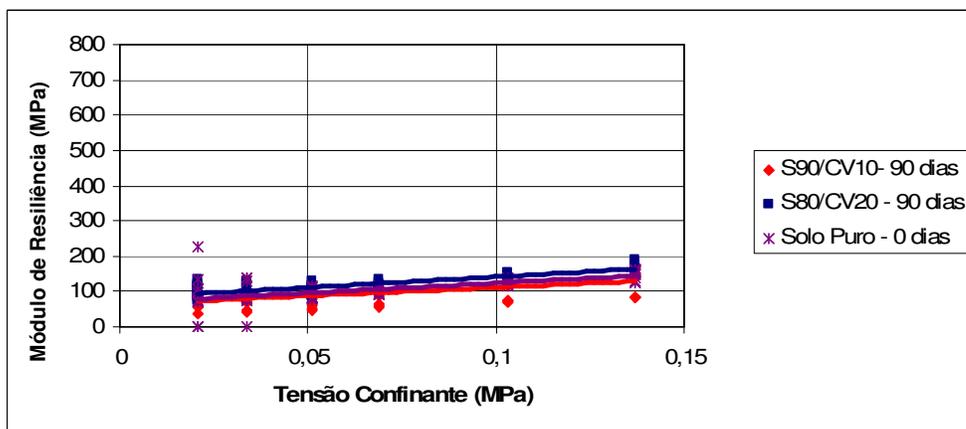


Figura 4.34 - Influência do Teor de Cinza Volante nas Misturas S90/CV10e S80/CV20 no tempo de cura de 90 dias

Nas misturas somente com cinza volante, sem adição de cal, a relação do Módulo de Resiliência pela tensão confinante, é muito similar para as duas misturas, S90/CV10 e S80/CV20, entre si, e equivalente a do Solo Puro, para os tempos de cura estudados. Este fato confirma que ao se adicionar somente cinza volante, nos teores estudados, ao solo, não foi possível proporcionar nenhum tipo de estabilização ao solo, granulométrica ou química, mas não piorou o comportamento. Portanto, ainda vale a pena conforme já comentado, em substituição aos materiais convencionais.

Tendo em vista todos os gráficos apresentados e comparando-se os desempenhos das misturas com cal e sem cal é plausível concluir que, como esperado, a cinza volante se mostra mais eficiente como agente cimentante do que as cinzas de fundo. A estabilização química, proporcionada pelas cinzas volantes em conjunto com a cal conduziram aos melhores resultados de Módulo

de Resiliência. Contudo, na condição das misturas sem cal, somente com a adição das cinzas, sem a presença da cal, as misturas com as cinzas de fundo apresentaram melhores resultados, possivelmente por produzir certa estabilização granulométrica. As cinzas de fundo possuem granulometria mais graúda do que a volante e a cal, e foram acrescidas nas misturas em teores significativamente maiores do que as volantes, o que pode ter proporcionado tal efeito.

4.4.2.3. Influência da Cal nas Misturas com Cinzas de Fundo e Volante

A segunda etapa dos ensaios com as misturas sem a adição de cal possibilitou melhor análise da influência da cal nas misturas com cinzas de fundo e volante. Nas Figuras 4.35 a 4.46 são apresentados os gráficos comparativos das misturas com e sem a cal, para os mesmos tempos de cura e teores de solo e cinza.

É importante repetir que a porcentagem de cal escolhida e a própria escolha deste cimentante foi adicionada às misturas propostas, inicialmente considerando a composição química das cinzas volantes estudadas (teor de CaO livre), que conforme a classificação da norma norte-americana se encaixam na Classe F. Cinza Volantes da Classe F normalmente são produzidas na queima de carvão betuminoso, e raramente possuem características cimentantes quando misturadas somente com água e solo. Desta forma, se configurou no delineamento do programa experimental a necessidade da adição de cal às misturas, visando aumentar a probabilidade da ocorrência de reações pozolânicas. A classificação da ASTM 618C só se aplica a cinzas volantes, entretanto o raciocínio foi estendido às cinzas de fundo, uma vez que estas possuem, reconhecidamente, menor índice de atividade pozolânica.

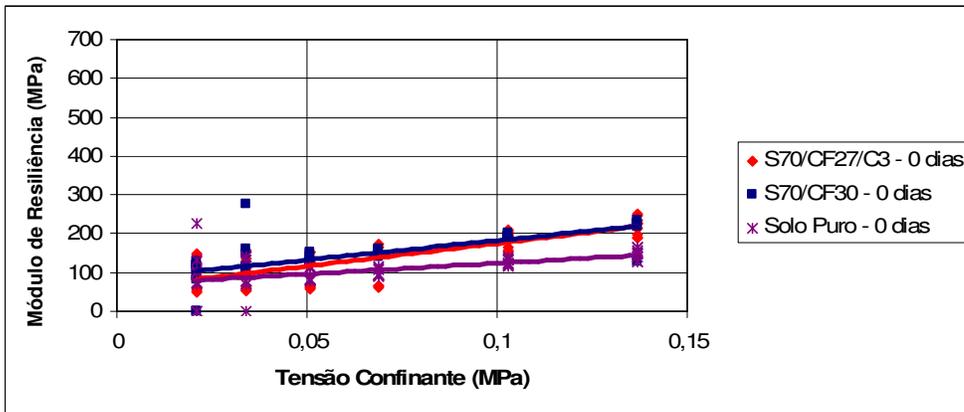


Figura 4.35 – Influência da Cal nas Misturas S70/CF27/C3 e S70/CF30 com 0 dias de cura

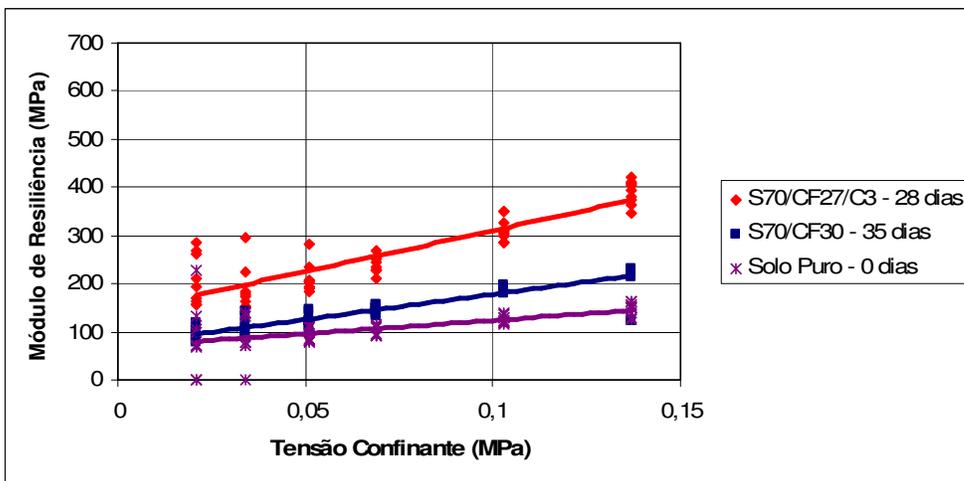


Figura 4.36- Influência da Cal nas Misturas S70/CF27/C3 e S70/CF30 com 28 e 35 dias de cura, respectivamente

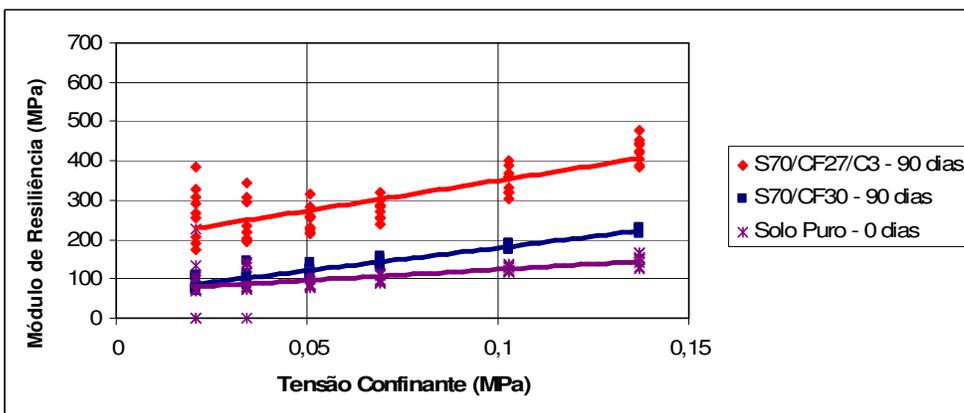


Figura 4.37 - Influência da Cal nas Misturas S70/CF27/C3 e S70/CF30 com 90 dias de cura

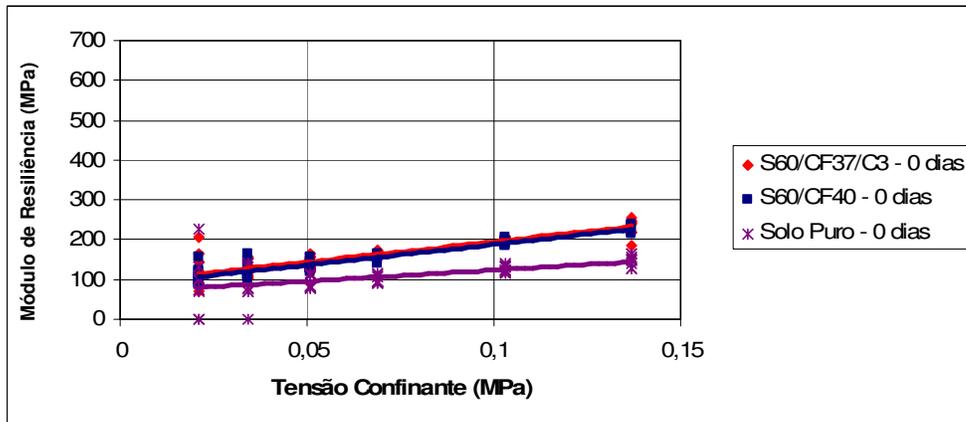


Figura 4.38 - Influência da Cal nas Misturas S60/CF37/C3 e S60/CF40 com 0 dias de cura

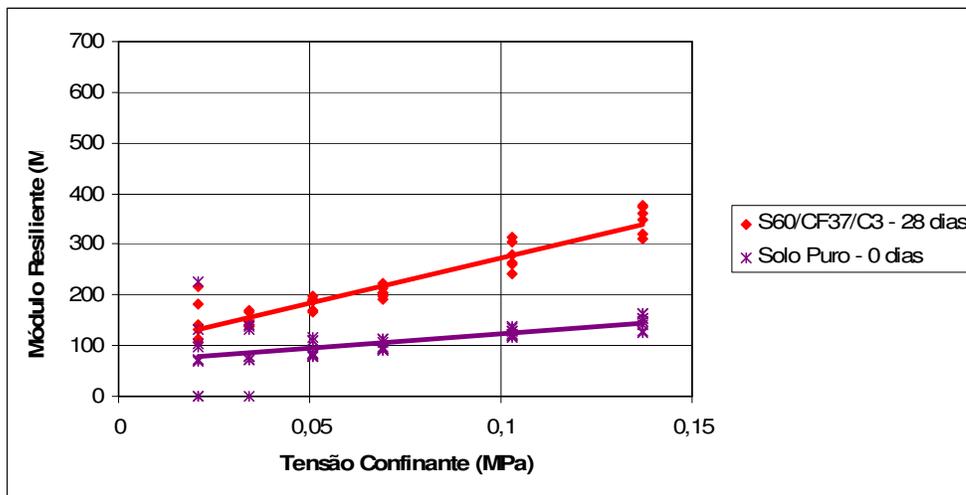


Figura 4.39- Influência da Cal nas Misturas S60/CF37/C3 e S60/CF40 com 28 e 35 dias de cura, respectivamente

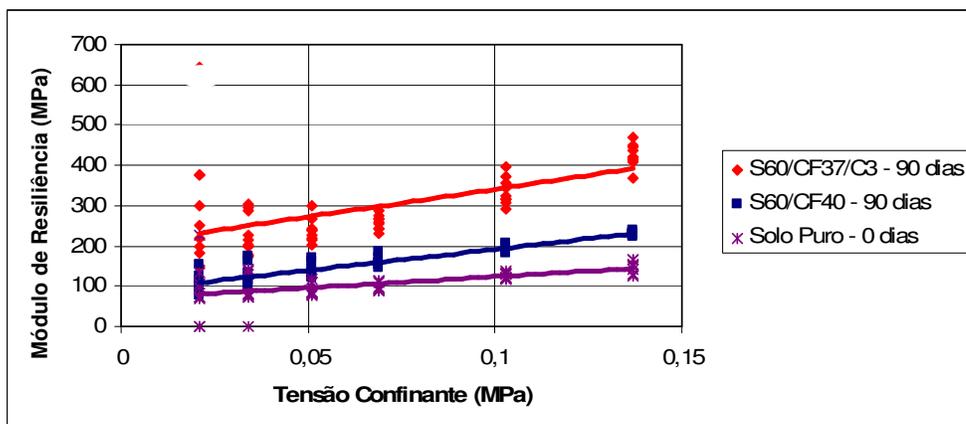


Figura 4.40 - Influência da Cal nas Misturas S60/CF37/C3 e S60/CF40 com 90 dias de cura

Novamente o comportamento das misturas com cinza de fundo foi muito similar entre si. Em ambos os casos, no ensaio imediato, com tempo de cura de 0 dias, as misturas apresentaram comportamento levemente melhor que do Solo Puro. Já com a cura, as misturas com a presença de cal se destacaram, apresentando resultados muito superiores aos das misturas sem cal, este comportamento pode ser eventualmente mais relevante com tempos de cura maiores. Este efeito pode ser atribuído a pouca ou inexistência de reações químicas imediatas à compactação nas misturas com cinzas de fundo. Tais reações só ocorreram com maior tempo de cura, dada a diferença no desempenho das misturas, S70/CF27/C3 e S70/CF30, além de S60/CF37/C3 e S60/CF40.

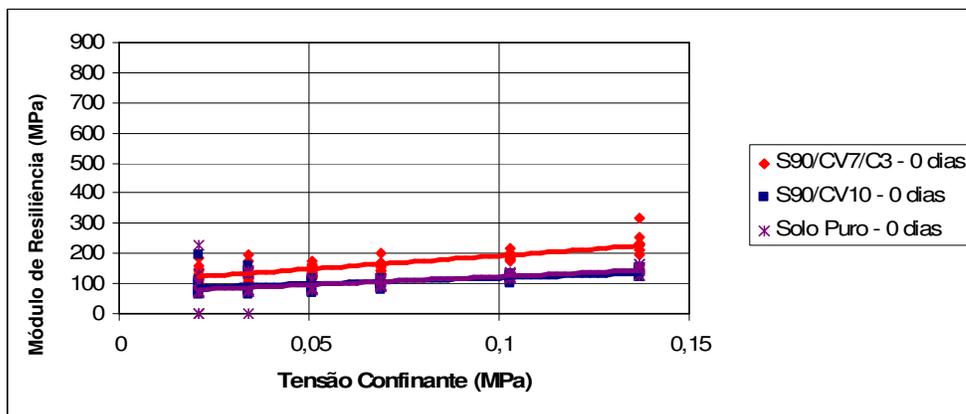


Figura 4.41 - Influência da Cal nas Misturas S90/CV7/C3 e S90/CV10 com 0 dias de cura

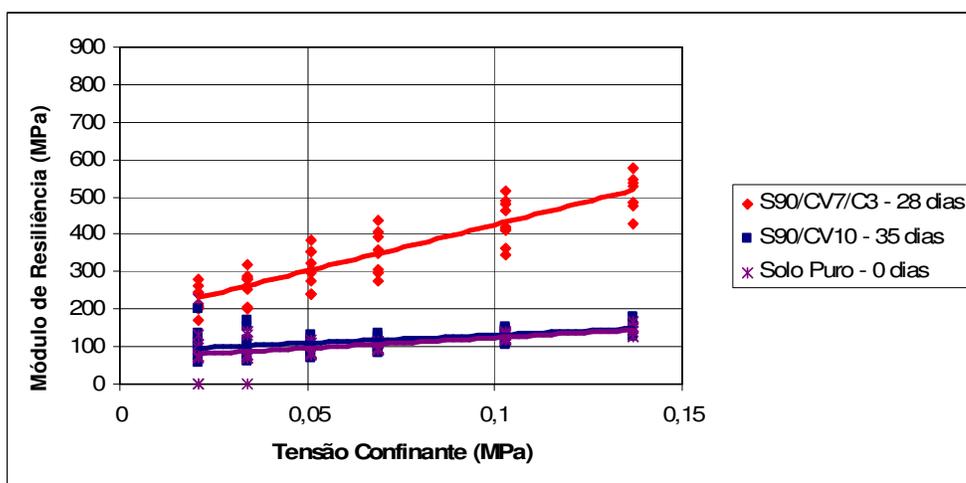


Figura 4.42 - Influência da Cal nas Misturas S90/CV7/C3 e S90/CV10 com 28 e 35 dias de cura, respectivamente

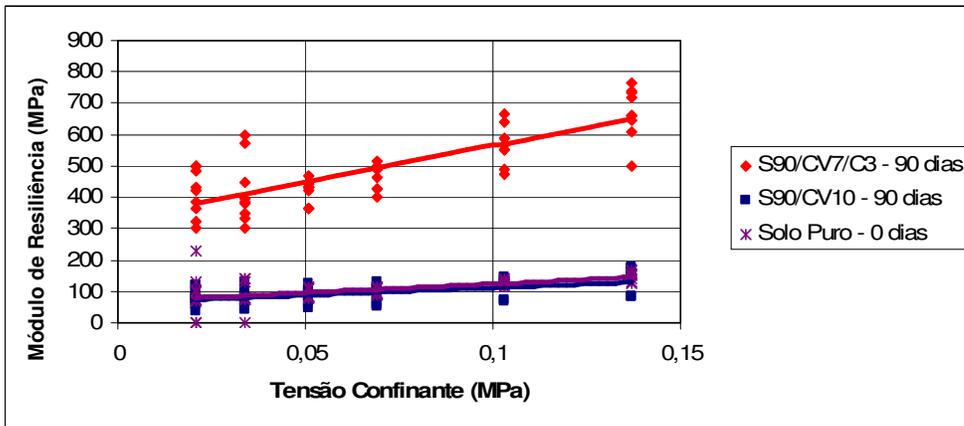


Figura 4.43 - Influência da Cal nas Misturas S90/CV7/C3 e S90/CV10 com 90 dias de cura

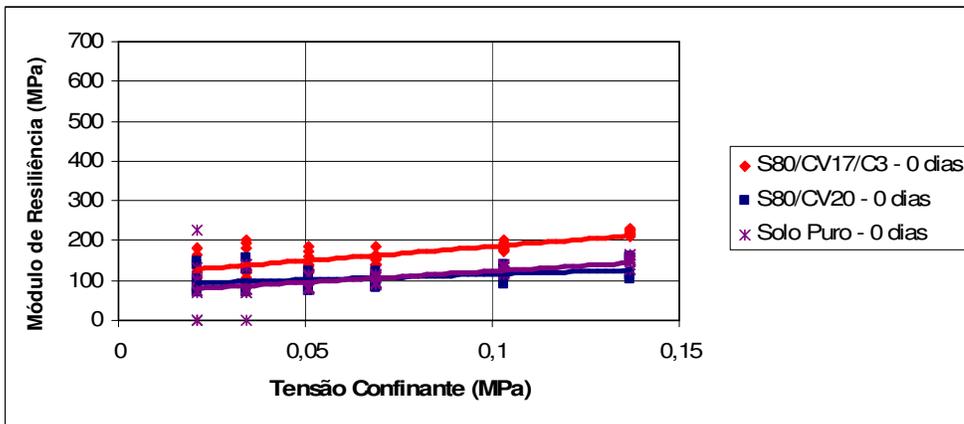


Figura 4.44 - Influência da Cal nas Misturas S80/CV17/C3 e S80/CV20 com 0 dias de cura

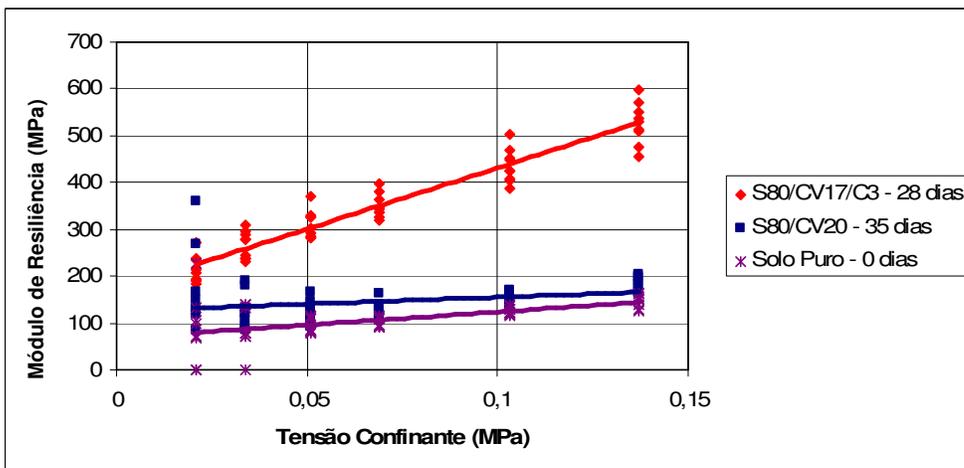


Figura 4.45- Influência da Cal nas Misturas S80/CV17/C3 e S80/CV20 com 28 e 35 dias de cura, respectivamente

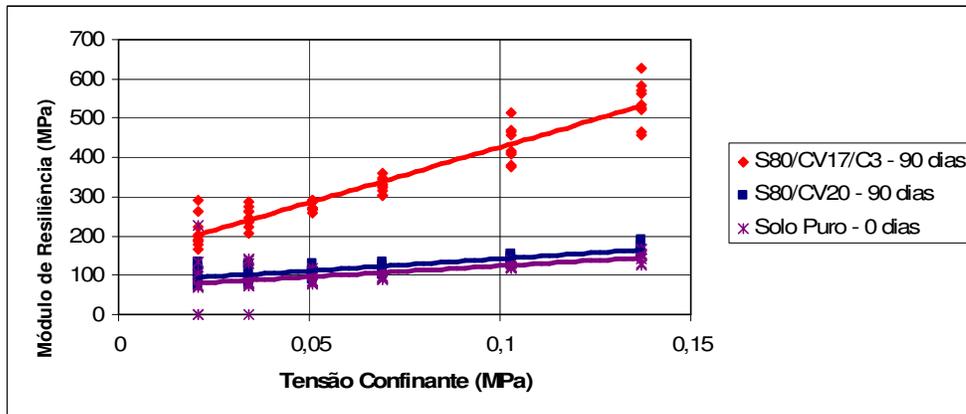


Figura 4.46 - Influência da Cal nas Misturas S80/CV17/C3 e S80/CV20 com 90 dias de cura

Nas misturas com cinza volante, como já mostrado, foram obtidos maiores valores de Módulo Resiliente. No comparativo das misturas S90/CV7/C3 e S90/CV10 é possível perceber que já no ensaio com tempo de cura de 0 dias, a mistura com cal mostra-se com desempenho superior a sem cal, esta com comportamento equivalente ao Solo Puro. O aumento do MR é ainda maior com a cura, não havendo evolução no comportamento da S90/CV10, com a cura. Uma pequena diferença ocorreu no comportamento da mistura S80/CV20 que com o ensaio de 35 dias, apresentou pequeno ganho do Módulo Resiliente em relação ao imediato, que apresentou comportamento semelhante ao Solo Puro. Ainda sim, as misturas S80/CV17/C3 e S80/CV20, mantiveram o comportamento das demais, em que a mistura com cal obteve melhor resultado do que as somente com as cinzas volantes.

4.4.3. Ensaio de Deformação Permanente

Os ensaios de Deformação Permanente foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COPPE/UFRJ, em corpos-de-prova moldados nas condições de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima, na energia de compactação equivalente a Energia Modificada, como os demais corpos-de-prova de MR. Foram realizados ensaios para 7, 28 e 90 dias de cura em câmara úmida. Os ensaios foram realizados com tensão confinante, σ_c igual a 0,1MPa e tensão desviadora, σ_d de 0,4MPa,

Somente as misturas propostas inicialmente, com adição de cal (S70/CF27/C3, S60/CF37/C3, S90/CV7/C3 e S80/CV17/C3) foram submetidas

aos Ensaio de Deformação Permanente. As demais misturas, sem adição de cal, propostas com a pesquisa já em andamento, não puderam ser submetidas a este ensaio, dado seu longo tempo de execução e incompatibilidade com o cronograma de ensaios programados para utilização do equipamento. Desta forma, não foi possível uma análise direta da influência da cal na deformação permanente das misturas estudadas sem a cal.

Tendo em vista que o ensaio de Deformação Permanente é de longa duração, com grande número de ciclos (N) de aplicação de cargas, na Tabela 4.13, são apresentados os valores das deformações permanentes em momentos específicos, a deformação permanente inicial ($\epsilon_p^{inicial}$), com 10.000 ciclos de aplicação da carga ($\epsilon_p^{10.000}$), e finalmente com 100.000 ciclos ($\epsilon_p^{100.000}$).

Tabela 4.13 – Resultados dos Ensaio de Deformação Permanente de alguns materiais deste estudo

Material/Mistura	Cura (dias)	Compactação		Deformação Permanente (mm)		
		wot (%)	MEAS máx. (g/cm ³)	$\epsilon_p^{inicial}$	$\epsilon_p^{10.000}$	$\epsilon_p^{100.000}$
S70/CF27/C3	7	16,39	1,591	0,471	2,278	2,358
	28	16,50	1,598	0,244	1,704	1,791
	90	16,84	1,551	0,343	2,144	2,332
S60/CF37/C3	7	17,41	1,448	0,373	2,404	2,594
	28	17,60	1,431	0,257	1,781	1,912
	90	17,34	1,441	0,083	0,672	0,749
S90/CV7/C3	7	11,21	1,901	0,207	1,249	1,325
	28	10,85	1,884	0,114	1,075	1,150
	90	11,34	1,918	0,170	0,857	0,987
S80/CV17/C3	7	12,69	1,819	0,131	1,197	1,266
	28	12,80	1,800	0,247	0,933	0,989
	90	12,81	1,776	0,084	0,703	0,800

Os gráficos com os resultados dos ensaios de deformação permanente para as misturas com cal nos diferentes tempos de cura estão indicados no ANEXO C. Optou-se por apresentar os gráficos até com 150.000 ciclos, pois após este ponto a taxa de acréscimo da deformação permanente foi menos expressiva do que para os ciclos iniciais, e com o uso da escala aritmética os resultados tendem a se tornar assintóticos. Considerando a grande quantidade de ciclos utilizada (500.000) a plotagem causa a ocultação dos resultados obtidos para os ciclos de carga iniciais. Todos os ensaios seguiram o mesmo

padrão. Essa representação se baseia em estudos de outros autores, como Guimarães (2009).

Alguns ensaios de Deformação Permanente, tal como nos ensaios de Módulo de Resiliência, tiveram problemas durante sua execução ou apresentaram resultados inesperados, gerando a necessidade de repetição dos mesmos.

Também foram ensaiados corpos de prova de solo puro, com as mesmas características dos demais na umidade ótima e massa específica aparente seca máxima, entretanto, os valores de deformação permanente apresentados para esta mistura foram consideravelmente mais altos do que para todas as demais misturas estudadas.

4.4.3.1. Influência do Tempo de Cura

Conhecida a relevância do tempo de cura para o comportamento mecânico de materiais cimentados, neste item visa-se apresentar detalhadamente a influência deste fator sobre a deformação permanente das misturas com cal estudadas, nas Figuras 4.47 a 4.50.

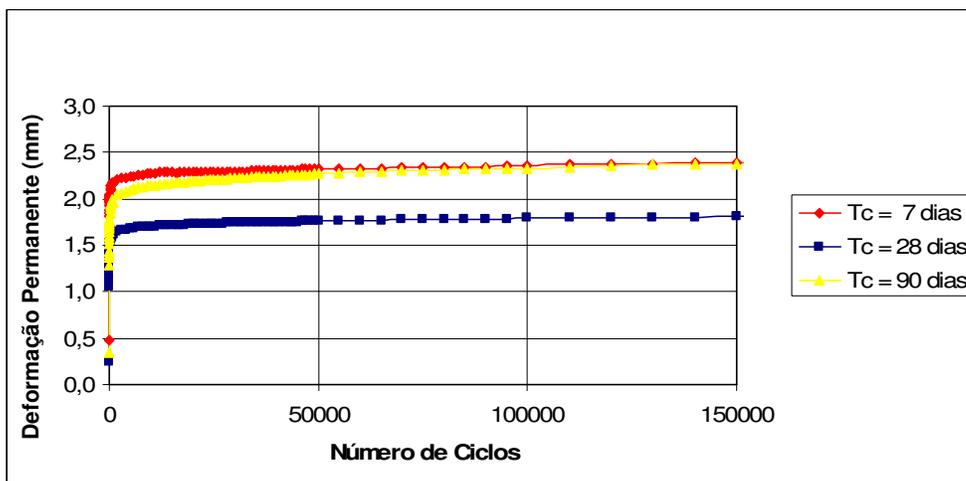


Figura 4.47 – Efeito de Tempo de Cura na Deformação Permanente da Mistura S70/CF27/C3

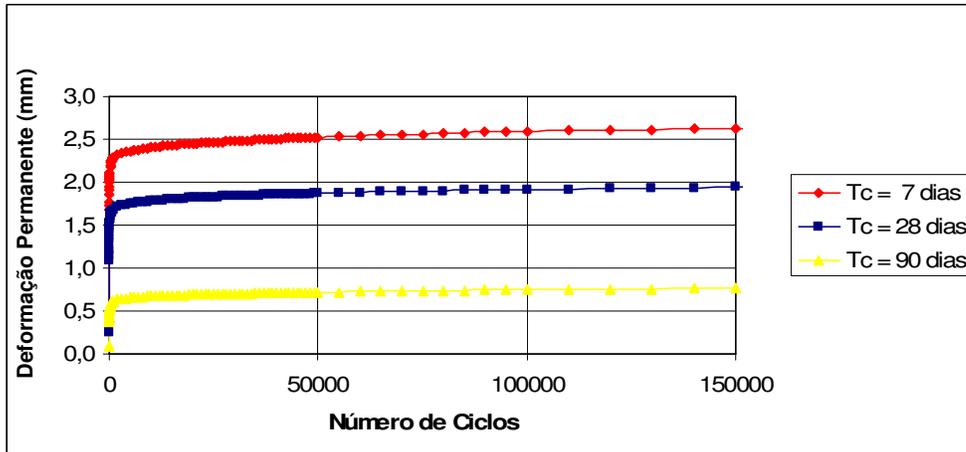


Figura 4.48 – Efeito do Tempo de Cura na Deformação Permanente da Mistura S60/CF37/C3

Nas duas misturas com a presença de cinza de fundo, S70/CF27/C3 e S60/CF37/C3, a redução nos valores de deformação permanente com o tempo de cura foi expressiva. Na S60/CF37/C3, a deformação permanente total no ensaio de 90 dias foi reduzida aproximadamente a valores quatro vezes menores em relação ao ensaio de 7 dias. Tais resultados apontam que a adição de cinza de fundo ao solo estudado diminui significativamente a deformação permanente, com o tempo de cura, e desta forma, pode aumentar a vida útil do pavimento. Entretanto, no ensaio com a mistura S70/CF27/C3 com 90 dias de cura houve uma interrupção na diminuição dos valores da deformação permanente. Este ensaio foi repetido para averiguar possíveis erros experimentais e no segundo ensaio foram obtidos resultados semelhantes. Desta forma, sugere-se que esta mistura seja estudada mais profundamente para que se verifique as causas para tal comportamento.

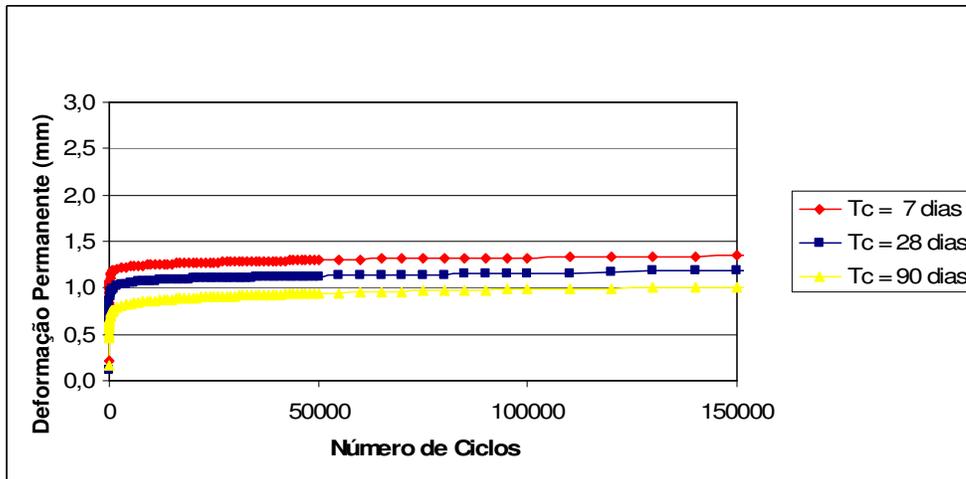


Figura 4.49 – Efeito do Tempo de Cura na Deformação Permanente da Mistura S90/CV7/C3

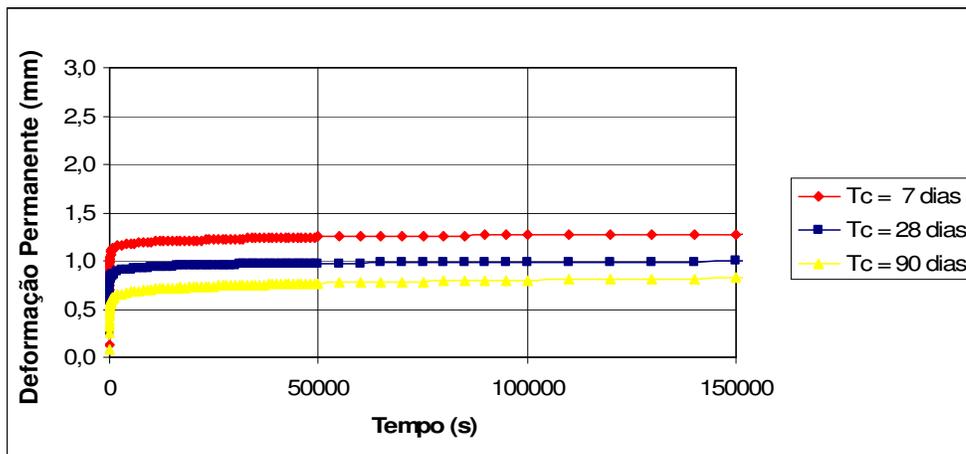


Figura 4.50 – Efeito do Tempo de Cura na Deformação Permanente na Mistura S80/CV17/C3

Já as misturas com cinza volante, S90/CV7/C3 e S80/CV17/C3, apresentaram valores de deformações permanentes relativamente menores que as misturas com cinza de fundo e talvez, por este motivo, a influência do tempo de cura, é menos significativa do que no caso anterior.

Resumindo: todas as misturas estudadas obtiveram melhores resultados para o ensaio de Deformação Permanente com a cura, o que pode ser justificado pela cimentação ocorrida entre as cinzas e a mistura solo - cal.

4.4.3.2. Influência do Tipo e Teor de Cinzas

A análise do desempenho dos diferentes tipos e teores de cinzas estudados consta como um dos objetivos específicos desta pesquisa, e tem apresentado nas Figuras 4.51 a 4.56 os resultados obtidos nesta pesquisa.

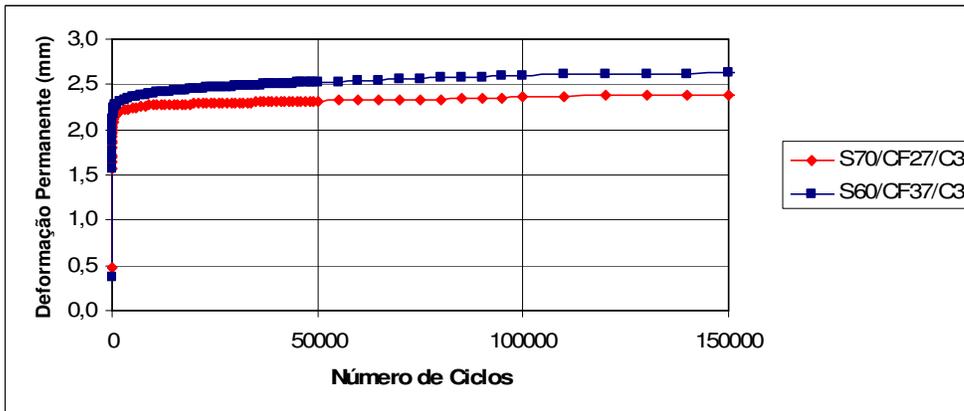


Figura 4.51 - Influência do Teor de Cinza de Fundo nas Misturas S70/CF27/C3 e S60/CF37/C3 na Deformação Permanente com cura de 7 dias

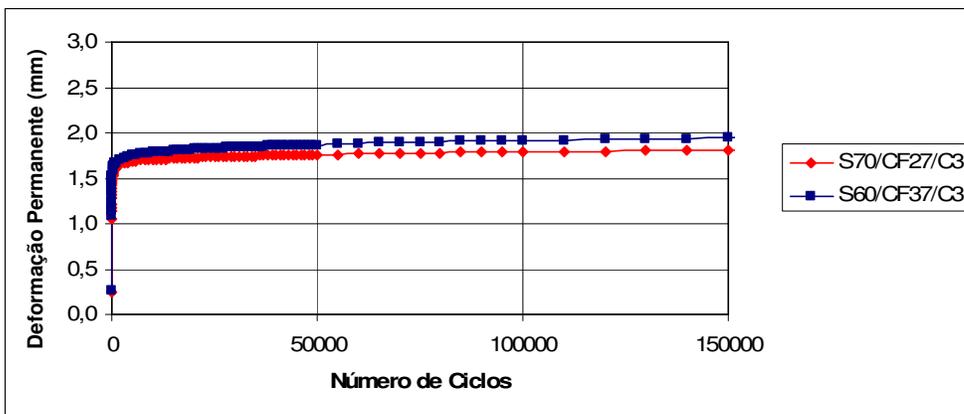


Figura 4.52 - Influência do Teor de Cinza de Fundo nas Misturas S70/CF27/C3 e S60/CF37/C3 na Deformação Permanente com cura de 28 dias

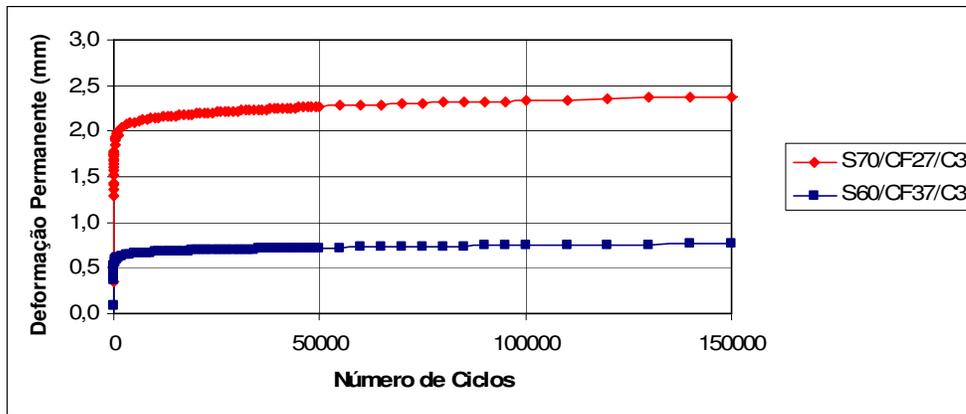


Figura 4.53 - Influência do Teor de Cinza de Fundo nas Misturas S70/CF27/C3 e S60/CF37/C3 na Deformação Permanente com cura de 90 dias

Nas misturas com cinza de fundo, S70/CF27/C3 e S60/CF37/C3, a mistura com menor teor de cinzas, obteve deformações permanentes levemente menores, nos ensaios com 7 e 28 dias de cura, e como tratado anteriormente a mistura S70/CF27/C3 apresentou comportamento inesperado que deve ser estudado mais detalhadamente.

Este fato confirma os resultados obtidos nos Ensaio de Módulo de Resiliência, no qual também não foi possível perceber nítida diferença de desempenho mecânico das misturas com os teores de cinza de fundo analisados. Mas também não houve piora do comportamento em relação ao do solo puro.

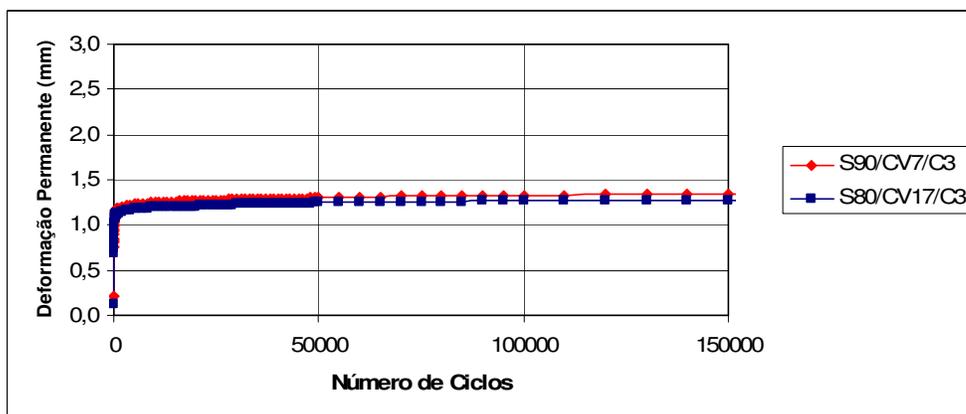


Figura 4.54 - Influência do Teor de Cinza Volante nas Misturas S90/CV7/C3 e S80/CV17/C3 na Deformação Permanente com cura de 7 dias

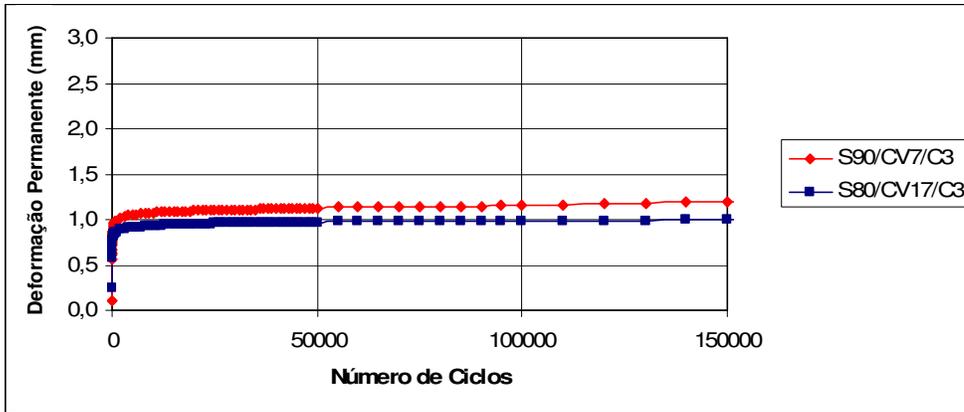


Figura 4.55 - Influência do Teor de Cinza Volante nas Misturas S90/CV7/C3 e S80/CV17/C3 na Deformação Permanente com cura de 28 dias

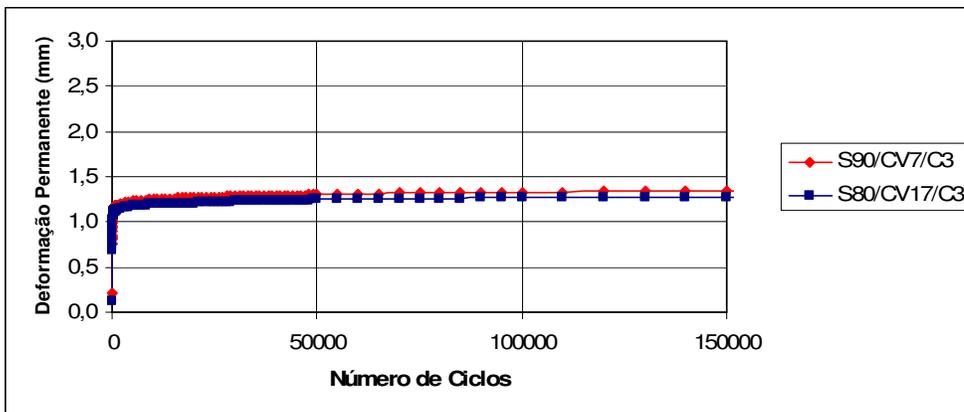


Figura 4.56 - Influência do Teor de Cinza Volante nas Misturas S90/CV7/C3 e S80/CV17/C3 na Deformação Permanente com cura de 90 dias

Nos ensaios com tempos de cura de 7 e 28 dias a mistura com maior teor de cinza volante, S80/CV17/C3, apresenta resultados discretamente melhores do que a outra, com deformações permanentes levemente inferiores.

Portanto, da mesma forma que as misturas com cinzas de fundo, as misturas com cinzas volantes apresentaram valores de deformação permanente muito similares entre si, mostrando que entre os teores de cinzas estudados, para a Deformação Permanente, todos os teores influenciarão na mesma medida no desempenho do pavimento. Cabe ressaltar porém que estes valores são relativamente baixos no geral, bem menores do que do solo puro, portanto já se tem um ganho.

Quanto ao tipo de cinzas, com base nos gráficos das Figuras 4.54 a 4.56, percebe-se que a cinza volante conduziu, mesmo com pequenos tempos de cura, a deformações permanentes menores do que as obtidas com a cinza de

fundo. Entretanto, as melhorias com a cura apresentadas pelas misturas com cinza de fundo são percentualmente mais representativas do que as apresentadas pelas misturas com cinza volante.

4.5. Dimensionamento do Pavimento Típico

Com finalidade de avaliar os efeitos da adição das cinzas ao Solo, além de verificar a competitividade das misturas como material de base para projetos de pavimentação foi utilizado o programa computacional SisPav (Franco, 2007). Foi assumida uma estrutura do pavimento mostrada na Figura 4.57 (onde e , é a espessura da camada e ν , o coeficiente de Poisson), bem como características do tráfego, Figura 4.58 e dados do clima da cidade de Rio de Janeiro, na Figura 4.59.

É importante ressaltar que para os cálculos da espessura da camada de base, foi utilizado o Modelo Composto do Módulo de Resiliência. E os parâmetros k_1 , k_2 e k_3 deste modelo, utilizados no SisPav foram obtidos por média aritmética dos resultados determinados pelo STATISTICA, para os ensaios de Módulo de Resiliência com 90 dias de cura. A média aritmética se fez necessária dado que foram realizados para cada material e/ou mistura 3 ensaios nos tempos de cura pré-determinados, com a finalidade de obter maior representatividade das características reais de cada material e/ou mistura. Os valores de k_1 , k_2 e k_3 usados como dados de entrada no SisPav encontram-se na Tabela 4.14.

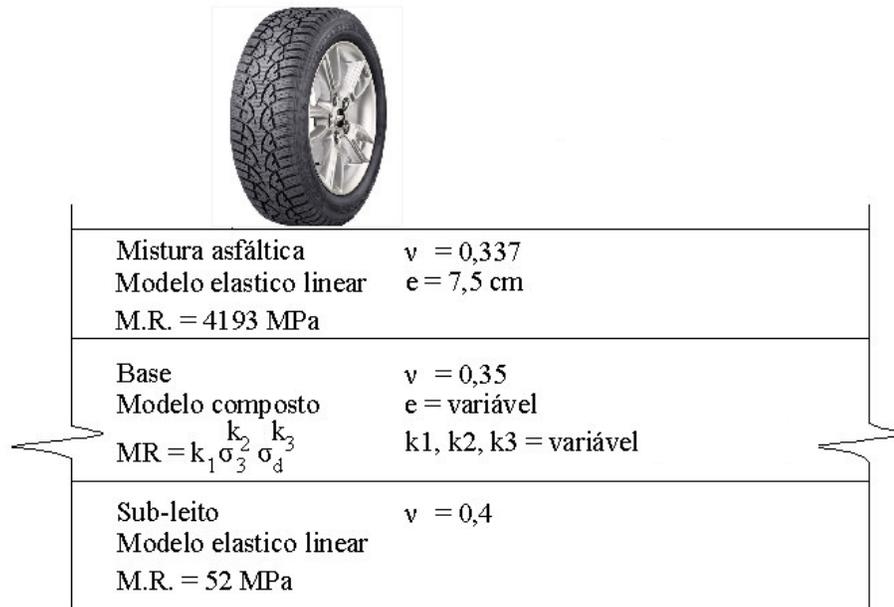


Figura 4.57 - Estrutura do Pavimento adotada no SisPav (Fonte: Vizcarra, 2010).

Eixo	Tipo	Configuração	Rodas	Volume (1º Ano)	Taxa (%aa)	Carga (kg)	Pressão (MPa)
1	5	Eixo duplo	4	25000	0.00	10000.00	0.8000
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							

Número N (DNIT 06): 8.224e+005

Alinhamento crítico (m): 0.00

Parâmetros gerais:

Vida de projeto (anos): 10

% veículos na faixa de projeto: 100

Variação lateral do tráfego (m): 0.30

Sx (m): 0.324 Sy (m): 1.200

Distribuição anual do tráfego (%):

Mês	Porcentagem (%)
Total	100.00
Jan	8.333
Fev	8.333
Mar	8.333
Abr	8.333
Mai	8.333

Figura 4.58 – Características do Tráfego adotado no SisPav para um dos períodos de projeto (Fonte: Vizcarra, 2010).

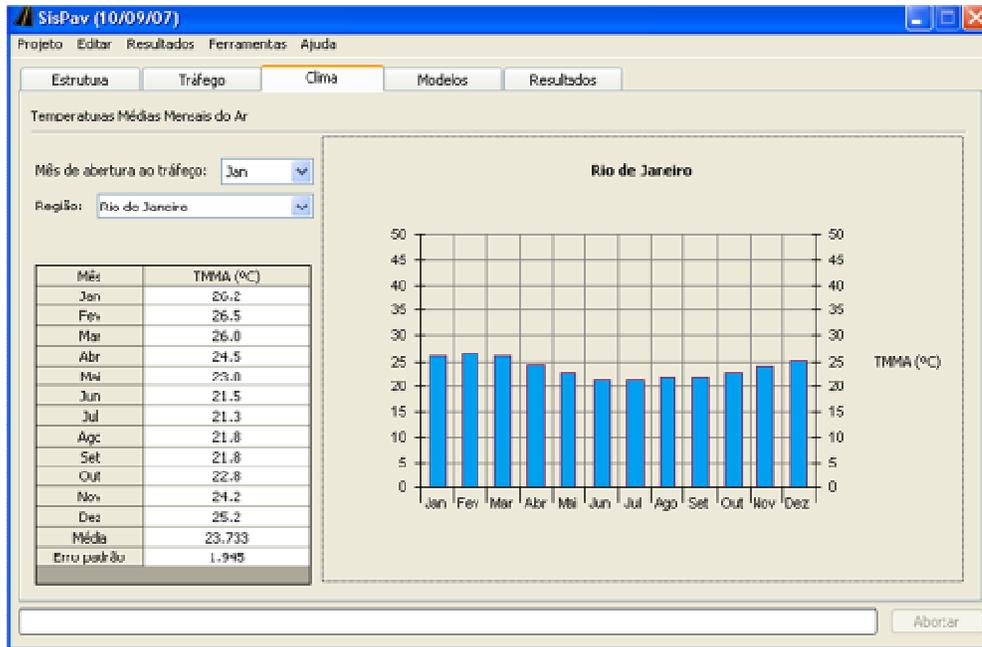


Figura 4.59 – Características do Clima adotadas no SisPav neste estudo.

Tabela 4.14 – Coeficientes do Modelo Composto utilizados no SisPav para representar os materiais do presente estudo.

Material/Mistura	Cura (dias)	Módulo de Resiliência		
		k1	k2	k3
S	0	224	0,50	-0,31
S70/CF27/C3	90	745	0,37	-0,06
S60/CF37/C3	90	767	0,39	-0,06
S90/CV7/C3	90	1142	0,32	-0,03
S80/CV17/C3	90	1502	0,45	0,11

Na Tabela 4.15 e Figura 4.61 são apresentados os resultados obtidos com o SisPav - as espessuras de camadas em função do período de projeto para cada tipo de mistura de solo – cinza - cal.

Tabela 4.15 – Espessura da Camada de Base em função da Vida Útil do Projeto para o solo ou mistura estudados.

Período de Projeto (anos)	Espessura da Camada (cm)				
	Solo Puro	S70/CF27/C3	S60/CF37/C3	S90/CV7/C3	S80/CV17/C3
6	*	10,00	10,00	10,00	10,00
7	*	10,00	10,00	10,00	10,00
8	*	10,00	10,00	10,00	10,00
9	*	11,25	11,87	10,00	10,00
10	*	12,19	14,12	10,00	10,00
11	*	13,75	15,55	10,00	10,00
12	*	15,25	17,64	10,00	10,00

*O limite máximo de espessura da camada, estabelecido pelo programa SisPav, de 60cm, foi atingido não sendo possível o cálculo para o material nas características selecionadas.

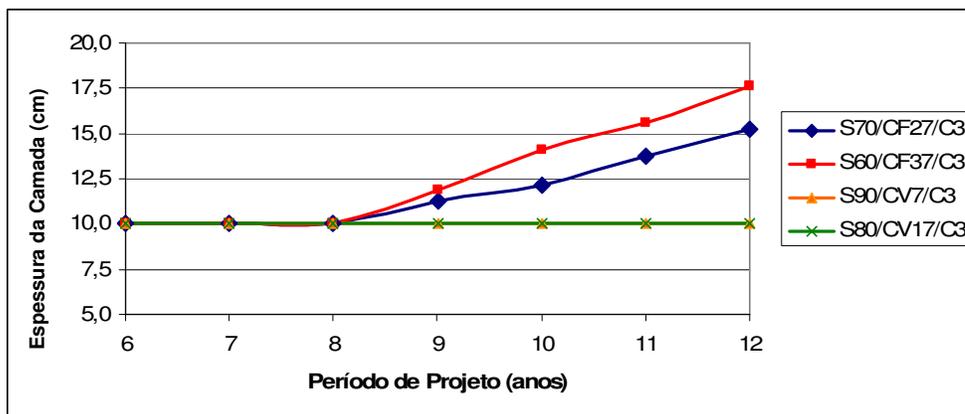


Figura 4.60 - Variação das espessuras da camada de base em função do período de projeto.

O Solo puro não seria adequado para uso na base deste pavimento proposto, para este tráfego analisado (relativamente baixo) nos tempos de vida analisados (6 a 12 anos): a sua utilização neste projeto, para todos os períodos de projeto estudados, deveria ter espessura maior do que o limite máximo de espessura da camada de base (60cm) estabelecido.

Considere-se que foi admitido nesta estrutura um subleito muito deformável (Tipo III da Norma PRO 269/94 – DNER) o que também influencia a análise.

Por outro lado, para os mesmos critérios de projeto, para as misturas S90/CV7/C3 e S80/CV17/C3, ambas com cinza volante e cal, as espessuras da camada de base atingiram o limite mínimo estabelecido pelo programa (10cm) em todos os períodos de projeto analisados.

Nas misturas com cinza de fundo, também houve melhora no comportamento mecânico do material sendo possível sua utilização como camadas de base para pavimentos de baixo volume de tráfego, com espessuras maiores do que o mínimo, mas bem comuns nas estruturas usuais. Como esperado, pelos resultados expostos anteriormente, a mistura S70/CF27/C3, obteve melhores resultados, apresentando menores espessuras necessárias para o suporte das cargas de tráfego admitidas nesta simulação.

Como no caso das deformações permanentes, os ensaios realizados com 500.000 ciclos (5×10^5), próximo ao tráfego adotado no projeto, mostrou acomodamento das deformações para espessura de 20cm, e as deformações acumuladas foram baixas, admite-se que estas estruturas atenderão também o critério de afundamento de trilha de roda, pelo menos na parcela correspondente a contribuição da camada de base constituída das misturas com cal.

Vale a pena também comentar que a quantidade pequena de cal favoreceu a que as misturas estudadas não ficassem rígidas demais. Caso isto acontecesse seria necessário analisar estas estruturas para fadiga nesta camada cimentada. Como a ordem de grandeza atingida pelos maiores módulos de resiliência na maior idade considerada ($MR = 760$ MPa) foi muito mais baixo do que o módulo de resiliência adotado para a mistura asfáltica do revestimento ($MR = 4193$ MPa) isto não foi necessário. Foram testadas e confirmadas misturas como combinações viáveis de solo melhorado com cal, materiais versáteis para uso em várias regiões do país que também disponham de solo saprolítico parecido. Naturalmente outros solos poderão apresentar comportamentos melhores ou piores, mas a probabilidade de sucesso no uso das cinzas, mesmo a de fundo, mostram-se elevadas.

Conclui-se que todas as misturas analisadas, com a presença de cal, são adequadas à utilização na camada de base deste pavimento típico, fazendo com que o Solo, antes inadequado a este projeto atinja o comportamento mecânico necessário para pavimentos de baixo volume de tráfego.

Outras estruturas podem ser analisadas no futuro, naturalmente.

Em pesquisas similares, como na de Vizcarra (2010) foram encontrados resultados semelhantes para cinzas de fundo resultantes da queima de usinas verdes.