4 Resultados e Análises

No presente capítulo são apresentados os resultados e as análises dos ensaios descritos no capítulo 3 para as amostras de solo, cinza volante, cinza de fundo e misturas solo-cinza estudadas. Como o objetivo desta dissertação é avaliar as cinzas de RSU quanto ao potencial de seu uso como um material aditivo e estabilizante para obras geotécnicas com carregamento estático (como por exemplo, solo de fundações, camadas de aterros sanitários e aterros sobre solos moles), as amostras de cinza de fundo e cinza volante foram caracterizadas a partir de ensaios geotécnicos, químicos e ambientais. Esses ensaios têm o objetivo de melhorar a compreensão do comportamento do material em estudo.

4.1. Ensaios de Caracterização Física

4.1.1. Densidade Real dos Grãos (Gs)

Os valores obtidos de Gs são apresentados na Tabela 4.1. O valor de Gs do solo foi obtido da tese de Ramirez (2012), além disso, este solo já foi objeto de pesquisas anteriores e os valores de Gs estão na mesma ordem de grandeza. Os valores de Cinza Volante e Cinza de Fundo foram obtidos da tese de Vizcarra (2010).

Tabela 4.1 – Resultados do ensaio de densidade real dos grãos para o solo, cinza volante e cinza de fundo.

Amostra	Teor de Cinza (%)	Densidade real dos Grãos (Gs)
Solo (SP)	0	2,720
Cinza Volante (CV)	100	2,412
Cinza de Fundo (CF)	100	2,434

Os resultados indicam que ao adicionar cinza volante ou de fundo, o Gs apresenta resultados coerentes com os valores dos compostos puros (solo puro, cinza volante e de fundo).

4.1.2. Limites de Atterberg

Os resultados de Limite de Liquidez (LL), limite de Plasticidade (LP) e Índice de Plasticidade (IP) do solo com adição de cinza volante e cinza de fundo são apresentados nas Tabelas 4.2 e 4.3.

Os resultados do solo (SP), aqui apresentados, foram obtidos do trabalho de Ramirez (2012).

Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de Limites de Atterberg para o solo e misturas solo-cinza volante. (Ramirez, 2012 e Quispe 2013)

Amostra	Teor de Cinza (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Solo (SP)	0	53	39	14
SP80CV20	20	40	28	12
SP70CV30	30	37	27	10
SP60CV40	40	33	24	9

Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de Limites de Atterberg para o solo e misturas solo-cinza de fundo. (Ramirez, 2012 e Quispe 2013)

Amostra	Teor de Cinza (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Solo (SP)	0	53	39	14
SP80CF20	20	45	32	13
SP70CF30	30	40	28	12
SP60CF40	40	34	24	10

Ressalta-se que não foi possível determinar os Limites de Atterberg para as cinzas puras, devido ao comportamento granular do material, que durante o ensaio não apresentou características plásticas para a sua realização (Vizcarra, 2010).

Nota-se que para os dois tipos de cinza, diminuem o limite de liquidez, limite de plasticidade e o índice de plasticidade com o aumento de teor de cinza.

4.1.3. Análise Granulométrica

No presente item apresentaremos as curvas granulométricas do solo, da cinza volante, da cinza de fundo e das misturas solo-cinza, onde todos os ensaios foram realizados com defloculante para a sedimentação. A Figura 4.1 apresenta a comparação entre as curvas granulométricas de solo, cinza volante e cinza de fundo. A Figura 4.2 apresenta a comparação entre solo, cinza volante e as misturas com 20%, 30% e 40% de teor de cinza volante. Finalmente, a Figura 4.3 apresenta a comparação entre solo, cinza de fundo e as misturas com 20%, 30% e 40% de teor de cinza volante. Finalmente, a Figura 4.3 apresenta a comparação entre solo, cinza de fundo e as misturas com 20%, 30% e 40% de teor de cinza de fundo e as misturas com 20%, 30% e 40% de teor de cinza de fundo e as misturas com 20%, 30% e 40% de teor de cinza volante. Finalmente, a Figura 4.3 apresenta a comparação entre solo, cinza de fundo e as misturas com 20%, 30% e 40% de teor de cinza volante. Finalmente, a Figura 4.3 apresenta a comparação entre solo, cinza de fundo e as misturas com 20%, 30% e 40% de teor de cinza de fundo. Os resultados para o solo foram retirados do trabalho de Ramirez (2012) e da cinza volante e cinza de fundo foram obtidas do trabalho de Vizcarra (2010). Ao final, apresenta-se a Tabela 4.4 com os resultados, em porcentagens, do ensaio de análise granulométrica para o solo, cinza volante, cinza de fundo e as misturas solo-cinza.



Figura 4.1 – Distribuição granulométrica do solo, cinza volante e cinza de fundo.



Figura 4.2 – Distribuição granulométrica do solo, cinza volante e misturas com 20%, 30% e 40% de teor de cinza volante.



Figura 4.3 – Distribuição granulométrica do solo, cinza de fundo e misturas com 20%, 30% e 40% de teor de cinza de fundo.

Amostra	Argila	Silte		Areia		Pedregulho
Amostra	(%)	(%)	Fina (%)	Média (%)	Grossa (%)	(%)
Solo	53	10	12	19	6	0
SP80CV20	29	21	16	18	11	5
SP70CV30	4	25	25	24	15	7
SP60CV40	18	24	16	14	13	15
Cinza Volante	8	38	35	18	1	0
SP80CF20	12	18	16	23	21	10
SP70CF30	25	12	10	20	18	15
SP60CF40	20	13	11	19	20	17
Cinza de Fundo	6	25	17	27	19	6

Tabela 4.4 – Resultados das análises granulométricas.

As misturas com 20% e 40% de teor cinza volante apresentam um comportamento desuniforme, mas para o teor de 30% de cinza volante melhorou a granulometria apresentando um comportamento bem graduado. Além disso, na Tabela 4.4 é notado que com o aumento de teor de cinza volante, aumenta-se a porcentagem de pedregulho, o que é notável na conformação de grãos da cinza volante pura.

Para as misturas com cinza de fundo, pode-se notar que fornece um comportamento melhor que do solo, mas com o aumento de teor de cinza também aumenta a quantidade de pedregulho na mistura e é maior que do que apresenta as misturas com cinza volante.

4.1.4. Classificação SUCS

Segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), o solo, a cinza volante, cinza de fundo e as misturas solo-cinza foram classificados e obtiveram os índices apresentados na Tabela 4.5.

Amostra	Índice
Solo	СН
SP80CV20	OL
SP70CV30	SW-SC
SP60CV40	SP-SC
Cinza Volante	SM
SP80CF20	SP-SC
SP70CF30	SP-SC
SP60CF40	SP-SC
Cinza de Fundo	SM

Tabela 4.5 – Índices para classificação SUCS.

Segundo Ramirez (2012) o solo é classificado como CH, correspondendo a uma argila arenosa de média plasticidade e segundo Vizcarra (2010) as cinzas (volante e de fundo) são classificadas como SM, que são areias siltosas que tem um melhor comportamento mecânico quando comparado ao solo. Além disso, Ramirez (2010) apresenta um resumo com a distribuição granulométrica obtida em pesquisas anteriores para o solo, que é apresentado na Tabela 4.6.

No caso das misturas solo-cinza, como foi observado na Figura 4.2, a mistura SP70CV30 apresenta um índice de SW-SC, que é uma areia bem graduada com argila. Já as outras misturas são classificadas como SP-SC, que são areias mal graduadas com argila, mas em todos os casos melhoram o comportamento do solo.

Autor	Prof. (m)	Gs	Ped. + Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	LL	LP	IP	SUCS	Atividade (IP/%argila)
	1,00 – 1,45	2,75	26,25	73	,75	71	35	36	МН	
Sertã (1986)	2,00 – 2,45	2,73	28,13	71	,87	75	49	26	МН	-
	3,00 – 3,45	2,74	45,63	54	,37	72	45	27	МН	
Marinho (1986)	3,60	2,75	35,00	3,00	62,00	65	38	27	МН	
Lins (1991)	2,00 - 2,40	2,74	34,00	4,00	62,00	78	32	46	МН	0,62
	3,00 - 3,40	2,74	34,00	4,00	62,00	73	34	39	МН	
	3,00	2,77	24,00	5,00	71,00	70	30	40	МН	
Dylac (1994)	6,00	2,76	31,00	6,00	63,00	82	43	39	МН	0,56
Beneveli (2002)	1,50	2,76	33,00	9,00	59,00	56	31	25	СН	0,42
Soares (2005)	1,00	2,74	41,00	5,50	53,50	54	28	26	СН	

Tabela 4.6 - Caracterização Física do solo coluvionar do Campo Experimental II da PUC-Rio (Ramirez, 2012 e Quispe, 2013)

4.2. Ensaios Químicos

4.2.1. Composição Química

Os resultados da composição química das amostras de solo estão apresentados na Tabela 4.7, onde as análises químicas de capacidade de troca catiônica (CTC) e de ataque sulfúrico do solo foram obtidas do trabalho de Duarte (2004, apud Soares, 2005).

A análise química total em porcentagem peso foi obtida de um estudo químico e mineralógico detalhado do campo experimental II da PUC-Rio de onde pertence o solo argiloso e foi realizado por Sertã (1986). O resultado é apresentado na Tabela 4.8.

Tabela 4.7 – Análises químicas de capacidade de troca catiônica (CTC) e de ataque sulfúrico (Duarte, 2004 apud Soares, 2005)

Complexo Sortivo (meq/100g)							
Ca ²⁺	Mg ²⁺	K⁺	Na⁺	Al ³⁺	H⁺	CT	С
0,00	0,4	0,11	0,15	1,3	3,3	5,3	3
Ataque por H ₂ SO ₄ (1:1) - NaOH (0,8%) g/Kg						pH (1	:2,5)
SiO ₂	AI_2O_3	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	KI	Kr	Água	KCI
170	204	103	11,1	1,49	1,13	4,3	4,0

Tabela 4.8 – Análises químicas total em porcentagem em peso (Sertã, 1986)

SiO ₂	AI_2O_3	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O
55,4%	22,0%	<0,05%	<0,10%	11,0%	1,30%	0,11%	0,01%

Analisando os resultados encontrados nas tabelas 4.7 e 4.8, pode-se concluir que a grande quantidade de Al_2O_3 e Fe_2O_3 encontrada no solo, indica que este sofreu um processo de laterização. Por outro lado, a pequena quantidade de CaO, MgO, K₂O e Na₂O encontradas, sugere se tratar de um material altamente intemperizado, devido à lixiviação intensa dos álcalis. A presença de cátions trocáveis deste solo sugere que este é um material de baixa atividade e é apresentado na Tabela 4.6. Os valores de pH indicam que o solo é ácido (Soares, 2005). A tabela 4.9 mostra o resultado da análise mineralógica feita por Sertã (1986) no material em estudo. Para a identificação da microestrutura do material, foram realizadas análises de microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura, sendo descritas a seguir.

Fração do solo	Mineral	Quantidade / observações
Pedregulho	Quartzo	grãos arestados de coloração transparentes a leitosos
	Granada alterada	alguns fragmentos
	Quartzo	grãos arestados
Arcio	Granada muito alterada	correspondem a aproximadamente
Areia	Agregados Ferruginosos	5% da amostra total
	Magnetita	pequenos traços
	Quartzo	presença
Silte	Caulinita	presença
	Goetita	presença
Araila	Caulinita	presença marcante
Argila	Goetita	alguns traços

Tabela 4.9 – Análises mineralógica (Sertã, 1986)

Vizcarra (2010) fez análises químicas para a cinza volante e para a cinza de fundo do RSU. A cinza volante é comparada com a análise feita por Fontes (2008) no mesmo tipo de cinza e da mesma usina, e também com análises de cinzas volantes de RSU de diversos países recompilados por Lam (2010, apud Vizcarra, 2010). Os resultados são apresentados na Tabela 4.10.

É notória a diferença tanto nos teores de Óxidos principais (SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃), quanto nos teores de CaO e SO₃, os quais têm influência nas reações de estabilização (Vizcarra, 2010).

		Concentração (%)		
Composto	Vizcarra (2010)	Fontes (2008)	Lam (2010)	
SiO ₂	21,2 - 12,9	44,26	6,35 - 27,52	
AI_2O_3	15,4 - 12,2	18,16	0,92 - 12,7	
Fe ₂ O ₃	5,3 - 7,7	9,27	0,63 - 5,04	
SO ₃	9,8 - 5,2	0,64	5,18 - 14,4	
CaO	32,3 - 45,3	15,39	16,6 - 45,42	
CI	6,6 - 4,7	-	-	
TiO ₂	3,3 - 4,7	3,25	0,85 - 3,12	
K ₂ O	2,6 - 4,1	2,61	2,03 - 8,9	
P ₂ O ₅	1,28 - 0	2,94	1,56 – 2,7	
ZnO	0,5 - 1,1	0,46	-	
Cr ₂ O ₃	0,1 - 0,2	0,16	-	
MnO	0,1 - 0	0,13	-	
SrO	0,1 - 0,2	0,04	-	
ZrO ₂	0,08 - 0,1	0,04	-	
CuO	0,08 - 0	0,06	-	
PbO	0,08 - 0	0,11	-	
MgO	-	2,23	1,38 – 3,16	
Na ₂ O	-	-	2,93 - 8,9	
V ₂ O ₅	0 - 0,25	-	-	

Tabela 4.10 - Composição química da cinza volante de RSU (Vizcarra, 2010)

A cinza de fundo é comparada com a análise feita por Arm (2003, apud Vizcarra, 2010) e Lam (2010, apud Vizcarra, 2010) para cinzas de RSU. Os resultados são apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Composição química da cinza de fundo de RSU (Vizcarra, 2010)

	Concentração (%)					
Composto	Vizcarra (2010)	Arm (2003)	Lam (2010)			
SiO ₂	27,0 - 37,7	46	5,44 – 49,38			
AI_2O_3	14,1 - 19,1	10	1,26 – 18			
Fe ₂ O ₃	10,0 - 6,6	9	1,21 – 13,3			
SO ₃	1,3 - 3,6	-	0,5 – 12,73			
CaO	20,1 - 31,8	15	13,86 – 50,39			
Cl	2,3 - 3,8	-	-			
TiO ₂	3,6 - 5,5	-	0,92 – 2,36			
K ₂ O	2,1 - 3,0	-	0,88 – 7,41			
P_2O_5	0 - 1,0	-	0,85 – 6,9			
ZnO	0,9 - 1,8	-	-			
Cr ₂ O ₃	0 - 0,19	-	-			
MnO	0,10 - 0,16	-	-			
SrO	0,05 - 0,14	-	-			
ZrO ₂	0,11 - 0,12	-	-			
CuO	0 - 0,344	-	-			
Ac	0 - 0,036	-	-			
Br	0 - 0,009	-	-			
Rb ₂ O	0 - 0,014	-	-			
MgO	0 - 1,722	2	1,6 – 3,3			
Na ₂ O	-	-	3,3 – 17,19			
V_2O_5	0 - 0,43	-	-			

Para a cinza de fundo de RSU, existe diferença tanto nos teores de Óxidos principais (SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃), quanto nos teores de CaO e SO₃, os quais têm influência nas reações de estabilização. Isto demonstra a variabilidade da composição química da cinza de fundo e da cinza volante (Vizcarra, 2010).

Para as misturas do solo-cinza os ensaios foram realizados no Laboratório de Química da PUC-Rio. Os resultados são apresentados na Tabela 4.12.

Há uma diminuição nos teores de Óxidos principais (SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃) quando se diminui a quantidade de solo dentro da mistura, mas há aumento dos teores de CaO com o aumento de cinza e não há ocorrência de SO₃ como na cinza volante pura presente no trabalho de Vizcarra (2010).

	Concentração (%)					
Composto	SP80CV20	SP70CV30	SP60CV40			
SiO ₂	35,92	32,18	31,62			
Al ₂ O ₃	41,29	39,34	37,20			
Fe ₂ O ₃	6,40	6,24	5,41			
SO ₃	-	-	-			
CaO	11,64	16,25	19,05			
CI	0,64	1,15	0,97			
TiO ₂	1,43	1,49	1,67			
K ₂ O	0,78	0,94	1,11			
P_2O_5	-	-	-			
ZnO	0,30	0,44	0,52			
Cr_2O_3	-	-	-			
MnO	0,04	0,05	0,06			
SrO	0,10	0,03	0,03			
ZrO ₂	0,04	0,04	0,04			
CuO	-	-	-			
PbO	-	-	-			
MgO	-	-	-			
Na ₂ O	-	-	-			
V_2O_5	0,10	0,13	0,19			

Tabela 4.12 – Composição química das misturas solo-cinza volante de RSU.

A análise para as misturas solo-cinza de fundo são apresentadas na Tabela 4.13.

Observa-se uma diminuição nos teores de Óxidos principais (SiO₂, Al₂O₃), ao igual que acontece com a cinza volante, quando diminui a quantidade de solo dentro da mistura, mas um aumento dos óxidos Fe₂O₃ e CaO com o aumento da cinza de fundo dentro da mistura e sem presença do óxido SO3 os quais têm influência nas reações de estabilização.

	Concentração (%)				
Composto	SP80CF20	SP70CF30	SP60CF40		
SiO ₂	38,78	38,60	36,04		
Al ₂ O ₃	45,39	44,82	42,78		
Fe ₂ O ₃	6,48	7,11	6,61		
SO ₃	-	-	-		
CaO	6,79	7,19	11,61		
CI	0,27	0,26	0,40		
TiO ₂	1,14	1,21	1,42		
K ₂ O	0,47	0,44	0,67		
P_2O_5	-	-	-		
ZnO	0,07	0,11	0,17		
Cr_2O_3	-	-	-		
MnO	0,03	0,04	0,05		
SrO	0,01	0,01	0,02		
ZrO ₂	0,03	0,04	0,03		
CuO	0,03	0,04	-		
PbO	-	-	-		
MgO	-	-	-		
Na ₂ O	-	-	-		
V ₂ O ₅	0,11	0,10	0,09		

Tabela 4.13 – Composição química das misturas solo-cinza de fundo de RSU.

4.2.2. Teor de Matéria Orgânica

Os resultados dos ensaios de determinação do teor de matéria orgânica do solo, cinza volante e cinza de fundo são apresentados na Tabela 4.14, estas foram obtidas mediante a técnica de oxidação com dicromato de potássio em meio sulfúrico, no Laboratório de Geotecnia/Quimica de Solos da COPPE/UFRJ. Os resultados das cinzas foram obtidos do trabalho de Vizcarra (2010).

Tabela 4.14 – Teor de matéria orgânica do solo, cinza volante e cinza de fundo. (Vizcarra, 2010 e Quispe, 2013)

Amostra	Carbono	Orgânico	Matéria Orgânica		
Amostra	(g/Kg)	(%)	(g/Kg)	(%)	
Solo	4,93	0,493	8,5	0,850	
Cinza Volante	4,52	0,452	7,80	0,780	
Cinza de Fundo	78,40	7,840	135,00	13,500	

Nota-se que o teor de matéria orgânica presente na cinza volante é baixo em comparação com a cinza de fundo que tem um teor alto, sabendo que um teor alto de carbono pode inibir a atividade pozolânica severamente como mostrado no

trabalho de 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 (Vizcarra, 2010).

Para as misturas solo-cinza foram feitas análises de teor por queima em uma Mufla a 440 °C (ABNT/NBR 13600/1996). Os resultados são apresentados na Tabela 4.15.

Amostra	Matéria Orgânica (%)
SP80CV20	4,183
SP70CV30	6,314
SP60CV40	5,450
SP80CF20	8,170
SP70CF30	7,247
SP60CF40	6,801

Tabela 4.15 – Teor de matéria orgânica das misturas solo-cinza.

Nota-se que as misturas solo-cinza volante apresentam um aumento de teor de matéria orgânica até 30% de cinza volante para depois cair. As misturas solocinza de fundo apresentam um valor máximo de teor de matéria orgânica com 20% de cinza e depois começa cair.

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 a água de constituição, por exemplo, além das substâncias orgânicas. Logo, observa-se um teor de matéria orgânica acima do esperado, de acordo com este procedimento, isto se nota nas misturas solo-cinza volante, cujos teores são maiores que com cinza volante pura, obtida pela técnica de oxidação com dicromato de potássio.

4.2.3. Ensaio de Lixiviação

Estes resultados, para cinza volante e cinza de fundo, foram obtidos do trabalho de Vizcarra (2010) segundo a norma NBR 10005:2004, e são apresentados nas Tabelas 4.16 e 4.17.

Tabela 4.16 -	 Resultados 	do ensaio	de lixiviação	 – Parâmetros 	Inorgânicos	na
Cinza Volante	(Vizcarra, 20	010).				

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

VMP: Valor máximo permitido segundo a norma NBR 10004:2004

Tabela 4.17 – Resultados do ensaio de lixiviação – Parâmetros Inorgânicos na Cinza de Fundo (Vizcarra, 2010).

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

VMP: Valor máximo permitido segundo a norma NBR 10004:2004

Os parâmetros inorgânicos apresentados nas Tabelas 4.16 e 4.17 como também os parâmetros orgânicos encontrados no extrato obtido no ensaio de lixiviação apresentaram concentrações menores que os limites máximos estabelecidos no anexo F da Norma NBR 10004:2004, logo os resíduos são classificados como **Não Perigosos.** (Vizcarra, 2010)

4.2.4. Ensaio de Solubilização

Estes resultados para cinza volante e cinza de fundo foram obtidos do trabalho de Vizcarra (2010) segundo a norma NBR 10006:2004, e são apresentados nas Tabelas 4.18 e 4.19.

Tabela 4.18 – Resultados do ensaio de solubilização – Parâmetros Inorgânicos na Cinza Volante (Vizcarra, 2010).

Parâmetros	Parâmetros Resultados analíticos (mg/L)		Método de Referência
Alumínio	0,31	0,2	SM21 3120 B
Arsênio	< 0,001	0,01	SM21 3120 B mod
Bário	0,41	0,7	SM21 3120 B
Cádmio	< 0,003	0,005	SM21 3120 B
Chumbo	< 0,002	0,01	SM21 3113 B
Cianetos	< 0,005	0,07	SM21 4500-CN C/4500-CN F
Cloretos	783	250	SM21 4500- Cl ⁻ D
Cobre	0,01	2	SM21 3120 B
Cromo Total	1,99	0,05	SM21 3120 B
Ferro	0,22	0,3	SM21 3120 B
Fluoretos	0,56	1,5	SM21 4500-F C
Manganês	< 0,002	0,1	SM21 3120 B
Mercúrio	< 0,0005	0,001	EPA 7470 A
Nitrato (como N)	2,10	10	SM21 4500- NO ⁻ ₃ F
Prata	< 0,003	0,05	SM21 3120 B
Selênio	< 0,002	0,01	SM21 3113 B
Sódio	85,2	200	SM21 3120 B
Sulfato (expresso como SO4)	650	250	SM21 4500- SO4 ⁻² E
Surfactantes	< 0,40	0,5	SM21 5540 C
Zinco	0,04	5	SM21 3120 B

VMP: Valor máximo permitido segundo a norma NBR 10004:2004

Parâmetros	Resultados analíticos (mg/L)	VMP	Método de Referência
Alumínio	0,08	0,2	SM21 3120 B
Arsênio	< 0,001	0,01	SM21 3120 B mod
Bário	0,19	0,7	SM21 3120 B
Cádmio	< 0,003	0,005	SM21 3120 B
Chumbo	< 0,002	0,01	SM21 3113 B
Cianetos	< 0,005	0,07	SM21 4500-CN C/4500-CN F
Cloretos	271	250	SM21 4500- Cl ⁻ D
Cobre	0,02	2	SM21 3120 B
Cromo Total	< 0,002	0,05	SM21 3120 B
Ferro	0,06	0,3	SM21 3120 B
Fluoretos	0,56	1,5	SM21 4500-F C
Manganês	< 0,002	0,1	SM21 3120 B
Mercúrio	< 0,0005	0,001	EPA 7470 A
Nitrato (como N)	3,80	10	SM21 4500- NO ⁻ ₃ F
Prata	< 0,003	0,05	SM21 3120 B
Selênio	< 0,002	0,01	SM21 3113 B
Sódio	236	200	SM21 3120 B
Sulfato (expresso como SO4)	290	250	SM21 4500- SO4 ⁻² E
Surfactantes	< 0,40	0,5	SM21 5540 C
Zinco	0,11	5	SM21 3120 B

Tabela 4.19 – Resultados do ensaio de solubilização – Parâmetros Inorgânicos na Cinza de Fundo (Vizcarra, 2010).

VMP: Valor máximo permitido segundo a norma NBR 10004:2004

Os parâmetros inorgânicos apresentados nas Tabelas 4.18 e 4.19 como também os parâmetros orgânicos encontrados no extrato obtido no ensaio de solubilização, tem concentrações menores que os limites máximos estabelecidos no anexo G da Norma NBR 10004:2004, exceto o Alumínio, Cloretos, Cromo Total e Sulfatos, para cinza volante e exceto Cloretos e Sulfatos para cinza de fundo, pelo que os resíduos são classificados como **Classe IIA- Resíduos Não-inertes** (Vizcarra, 2010).

Baseados nos resultados dos ensaios de solubilização e lixiviação, pode-se concluir que as misturas solo-cinza não são perigosas, sendo que ainda são não inertes.

4.3. Ensaios de Caracterização Mecânica

4.3.1. Ensaios de Compactação Proctor Normal

A Figura 4.4 apresenta a curva de compactação Proctor Normal do solo e as misturas do solo-cinza volante. A Tabela 4.20 apresenta um resumo dos valores de umidade ótima (w_{otm}) e de máxima densidade seca ($\gamma_{dmáx}$).



Densidade Seca vs. Teor de Umidade

Figura 4.4 - Curvas de compactação Proctor Normal do solo e misturas solo-cinza volante.

Tabela 4.20 – Resultados dos ensaios de compactação Proctor Normal para o solo e misturas de solo-cinza volante.

	SP	SP80CV20	SP70CV30	SP60CV40
Máxima Densidade Seca (gr/cm ³)	1,575	1,549	1,545	1,540
Ótimo Teor de Umidade (%)	24,0	24,7	24,8	24,6

Nota-se que ao aumentar o teor de cinza volante na mistura, a máxima densidade seca começa diminuir, concordando assim com a pesquisa feita por Nicholson (1993) sobre utilização de cinzas volantes de carvão para estabilizar solos tropicais e também com a pesquisa feita por Vizcarra (2010) para a mesma cinza volante de RSU da mesma usina. O teor ótimo de umidade, aumenta nas 3 misturas de solo-cinza volante, o que explica a queda da densidade seca.

A curva de compactação Proctor Normal do solo e as misturas do solo-cinza de fundo podem ser visualizadas na Figura 4.5. A Tabela 4.21 apresenta um resumo dos valores de umidade ótima (w_{otm}) e de máxima densidade seca ($\gamma_{dmáx}$).



Densidade Seca vs. Teor de Umidade

Figura 4.5 - Curvas de compactação Proctor Normal do solo e misturas solo-cinza de fundo.

Tabela 4.21 – Resultados dos ensaios de compactação Proctor Normal para o solo e misturas de solo-cinza de fundo.

	SP	SP80CF20	SP70CF30	SP60CF40
Máxima Densidade Seca (gr/cm ³)	1,575	1,544	1,540	1,529
Ótimo Teor de Umidade (%)	24,0	24,3	22,0	24,7

Nota-se que ao aumentar o teor de cinza de fundo na mistura, a máxima densidade seca começa diminuir, o qual concorda com os resultados obtidos por Farias (2005) para cinza pesada de carvão e também com a pesquisa feita por Vizcarra (2010) para a mesma cinza de fundo de RSU da mesma usina. Os teores ótimos de umidade das misturas aumentam com 20% e 40% de cinza, mas diminui com 30%.

Nota-se que os valores de máxima densidade seca para as misturas com cinza volante são maiores que com cinza de fundo. Isso acontece pela forma rugosa da superfície dos grãos da cinza pesada o que resulta em uma menor densidade real dos grãos, quando comparado às partículas do solo. (Vizcarra, 2010)

O solo já foi matéria de estudo de outras pesquisas, por exemplo, Beneveli (2002), na qual seu comportamento, submetido ao ensaio de Compactação Normal, concorda com o apresentado neste trabalho.

4.3.2. Ensaios Triaxiais CID

São apresentados neste item os resultados dos ensaios triaxiais CID, em compressão axial, realizados em amostras do solo (SP) e misturas com teores de cinza volante e cinza de fundo a 20%, 30% e 40% em relação ao peso do solo seco. Foram aplicadas tensões efetivas de 50, 200 e 400 kPa, em todos os casos. Foi analisado o tempo de cura (30 e 60 dias) para todas as misturas solo-cinza com a exceção que para as misturas com 30% de cinza (leve e de fundo) foi analisada só com 30 dias pela falta de tempo no acabamento desta dissertação. As trajetórias, envoltórias de resistência e os parâmetros de resistência ao cisalhamento são apresentados neste item. A metodologia utilizada nos ensaios está descrita no item 3.3.3.3.5.

Apresentam-se também as análises da influência do tipo de cinza, teores de cinza e influência do tempo de cura no comportamento das amostras durante o cisalhamento, tendo em conta que as análises foram feitas aos 15% de deformação axial para todos os ensaios.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112019/CA

São apresentadas algumas fotografias dos corpos de prova mais relevantes ao final do cisalhamento. Além das análises feitas para as trajetórias de tensões e envoltórias de resistência.

A maioria dos ensaios triaxiais CID de solo-cinza atingem uma resistência máxima para antes de 15% de deformação axial, mas o SP não apresenta resistência de pico para essa deformação, para tensões confinantes de 200 kPa e 400 kPa, então é necessário conhecer qual é a resistência máxima que pode atingir o SP e com qual deformação axial para comparar com os resultados dos ensaios triaxiais das misturas solo-cinza.



Figura 4.6 - Curvas tensão e deformação volumétrica versus deformação axial para o solo puro (S100), ensaios de compressão triaxial. (Ramirez, 2012)

No trabalho de Ramirez (2012) apresenta o resultado do ensaio triaxial CID do solo, que é o mesmo utilizado nesta pesquisa, para deformações maiores e atingindo uma máxima resistência. Os resultados são apresentados na Figura 4.6.

Destaca-se que o ensaio com SP foi feito neste trabalho e se observou o mesmo comportamento e os mesmos resultados para os parâmetros de resistência, sendo que este ensaio foi realizado para 15% de deformação axial.

4.3.2.1. Influência do tipo de cinza

O comportamento de tensão desviadora (σ_d) e variação volumétrica (ϵ_v) versus deformação axial (ϵ_a) dos ensaios com solo (SP) e misturas de solo com 20% de cinza volante (SP80CV20) e 20% de cinza de fundo (SP80CF20) ao zero dia de tempo de cura são apresentados e comparados na Figura 4.7.

Nota-se que para a tensão confinante de 50 kPa, a mistura de SP80CV20 apresenta melhor comportamento que o corpo de prova de SP e com o aumento da deformação axial, esta tende a se igualar com o comportamento da mistura de SP80CF20, apesar de que em todo o ensaio o comportamento das duas misturas são melhores do que com SP para esta tensão confinante. As misturas solo-cinza atingem uma resistência de pico entre 1% e 2% de deformação axial, mas para o SP só ocorre depois de 6% de deformação axial. As misturas solo-cinza apresentam um comportamento rígido diferente do SP.

O corpo de prova de SP para a tensão confinante de 50 kPa, sofre uma expansão igual à da mistura de SP80CF20, mas esta chega ao seu volume inicial quase ao fim do ensaio. A mistura de SP80CV20 apresenta uma expansão no início até 3% de deformação axial para depois se comprimir. A deformação volumétrica apresentada ao final do cisalhamento da mistura SP80CV20 é menor do que do SP.

Ainda para a tensão confinante de 50 kPa, a mistura SP80CV20 apresenta menor deformação volumétrica que a mistura SP80CF20 e que do SP, ao atingir a resistência de pico. O SP e a mistura de SP80CF20 atingem à resistência de pico encontrando-se em expansão.

Nota-se para a tensão confinante de 200 kPa, a mistura de SP80CF20 apresenta melhor comportamento que do que o corpo de prova de SP e da mistura

SP80CV20. O SP não apresenta uma resistência pico para 15% de deformação axial (que é a faixa de análise desta pesquisa), mas é menor que 500 kPa com 20% de deformação axial e é apresentada no trabalho de Ramirez (2012).



Figura 4.7 - Curvas tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para o SP, misturas SP80CV20 e SP80CF20 em ensaios de compressão triaxial.

Então, pode-se dizer que o comportamento das duas misturas é melhor do que o SP para esta tensão confinante. A mistura SP80CF20 atinge uma resistência

máxima para 12% de deformação axial, mas a mistura de SP80CV20 atinge a resistência máxima com uma deformação axial menor (6%) para depois se manter ao longo do ensaio. As misturas solo-cinza apresentam um comportamento rígido, diferente do SP.

Pode-se dizer que o SP e as misturas SP80CV20 e SP80CF20 apresentam o mesmo comportamento e se expandem durante todo o ensaio para a tensão confinante de 200 kPa.

A mistura SP80CV20 apresenta menor expansão do que a mistura SP80CF20 e o SP ao atingir a resistência máxima, mas todas chegam à aquela resistência com uma deformação volumétrica em expansão.

Finalmente, nota-se para a tensão confinante de 400 kPa que a mistura de SP80CF20 e SP80CV20 apresentam melhor comportamento do que o SP. As misturas solo-cinza e o SP não apresentam resistência de pico. Sabe-se pelo trabalho de Ramirez (2012), que o SP atinge uma resistência menor de 800 kPa para 20% de deformação axial, os quais são menores que os resultados obtidos pelas misturas solo-cinza.

O corpo de prova de SP para a tensão confinante de 400 kPa se expande da mesma forma que a mistura de SP80CV20 e SP80CF20, mas a expansão destas são maiores que do SP. A mistura de SP80CF20 apresenta maior expansão que da mistura de SP80CV20 e o SP até o final do ensaio.

O comportamento de tensão desviadora e variação volumétrica versus deformação axial dos ensaios com solo (SP) e misturas de solo com 30 % de cinza volante (SP70CV30) e 30% de cinza de fundo (SP70CF30) ao zero dia de tempo de cura são apresentados e comparados na Figura 4.8.

Nota-se para a tensão confinante de 50 kPa, a mistura de SP70CF30 apresenta melhor comportamento do que do corpo de prova de SP e com o aumento da deformação axial esta tende a se igualar com o comportamento da mistura de SP70CV30, mas em todo o ensaio o comportamento das duas misturas é melhor do que com SP para esta tensão confinante. Também a mistura SP70CF30 atinge uma resistência de pico entre 1% e 2% de deformação axial e a mistura SP70CV30 atinge uma resistência máxima a 3%, mas para o SP ocorre só depois de 6% de deformação axial. As misturas solo-cinza apresentam um comportamento rígido, diferente do SP.

O corpo de prova de SP para a tensão confinante de 50 kPa, se expande, mas as misturas de SP70CV30 e SP70CF30 têm quase o mesmo comportamento, expandem-se no início do cisalhamento e depois se comprimem. A mistura SP70CF30 recupera seu volume inicial a 2% de deformação axial e a mistura SP70CV30 ao 4%. A deformação volumétrica apresentada ao final do cisalhamento das misturas SP70CV30 e SP70CF30 é menor do que do SP.



Figura 4.8 - Curvas tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para o SP, misturas SP70CV30 e SP70CF30 em ensaios de compressão triaxial.

A mistura SP70CF30 apresenta a mesma deformação volumétrica do que a mistura SP70CV30 ao atingir a resistência de pico e elas chegam à resistência de pico com uma deformação volumétrica em expansão, maior do que ao início do cisalhamento. As misturas de solo-cinza para este caso tem um comportamento de contração.

Nota-se que para a tensão confinante de 200 kPa, a mistura de SP70CV30 apresenta melhor comportamento do que do corpo de prova de SP e da mistura SP70CF30. O SP não apresenta uma resistência máxima para 15% de deformação axial (que é a faixa de análise desta pesquisa), mas é menor do que 500 kPa com 20% de deformação axial e é apresentada no trabalho de Ramirez (2012). Então, pode-se dizer que o comportamento das duas misturas é melhor do que com SP para esta tensão confinante. A mistura SP70CV30 atinge uma resistência máxima para 9% de deformação axial igual à mistura SP70CF30, mas com menor valor. As misturas solo-cinza apresentam um comportamento rígido, diferente do SP.

O corpo de prova de SP para a tensão confinante de 200 kPa se expande igual às misturas SP70CV30 e SP70CF30, mas a expansão apresentada pelas misturas de solo-cinza são maiores do que o SP. A deformação volumétrica apresentada ao final do cisalhamento da mistura SP70CF30 é maior do que da mistura SP70CV30 e do SP.

A mistura SP70CF30 apresenta maior expansão do que a mistura SP70CV30 ao atingir a resistência máxima, mas todas chegam à resistência máxima com uma deformação volumétrica em expansão, maior do que ao início do cisalhamento. As misturas de solo-cinza para este caso tem um comportamento de expansão.

Finalmente, nota-se que para a tensão confinante de 400 kPa a mistura SP70CV30 apresenta um melhor comportamento que o SP e do que a mistura SP70CF30. A mistura SP70CV30 alcança sua resistência máxima com 12% de deformação axial, mas a mistura SP70CF30 tende a se igualar com a outra mistura sem apresentar resistência máxima e o SP não apresenta uma resistência máxima para a deformação axial de análise. Sabe-se pelo trabalho de Ramirez (2012) que o SP atinge uma resistência menor de 800 kPa, para 20% de deformação axial, que é menor do que os resultados obtidos pelas misturas solo-cinza.

O corpo de prova de SP para a tensão confinante de 400 kPa, se expande da mesma forma do que a mistura SP70CV30 e SP70CF30, mas a deformação volumétrica destas são maiores que do SP. A mistura de SP70CV30 apresenta maior expansão do que da mistura de SP70CF30 e do SP até o final do ensaio.

O comportamento de tensão desviadora e variação volumétrica versus deformação axial dos ensaios com solo (SP) e misturas de solo com 40 % de cinza volante (SP60CV40) e 40% de cinza de fundo (SP60CF40) ao zero dia de tempo de cura são apresentados e comparados na Figura 4.9.

Nota-se que para a tensão confinante de 50 kPa, as misturas de SP60CV40 e SP60CF40 apresentam um comportamento quase similar, embora com um pequeno aumento na resistência máxima da mistura SP60CV40, que nota-se ao longo da deformação axial, mas o comportamento das duas misturas é melhor do que com SP para esta tensão confinante. As misturas SP60CV40 e SP60CF40 atingem a resistência máxima a 3% de deformação axial e o SP atinge a resistência máxima a 6% de deformação axial. As misturas solo-cinza apresentam um comportamento rígido diferente do SP.

O corpo de prova de SP para a tensão confinante de 50 kPa, se expande, mas as misturas de SP60CV40 e SP60CF40 tem quase o mesmo comportamento se expandem no início do cisalhamento e depois se comprimem, só que a mistura SP60CF40 recupera seu volume inicial aos 5% de deformação axial e a mistura SP60CV40 aos 7%. A compressão apresentada ao final do cisalhamento da mistura SP60CF40 é maior do que a mistura SP60CV40.

As misturas SP60CV40 e SP60CF40 apresentam a mesma deformação volumétrica ao atingir a resistência máxima e o volume é menor que do SP nessa deformação axial. As misturas de solo-cinza para este caso tem um comportamento de contração.

Nota-se que para a tensão confinante de 200 kPa, a mistura de SP60CV40 apresenta melhor comportamento do que o corpo de prova de SP e mistura SP60CF40, mas a mistura de SP60CF40 alcança quase a mesma resistência máxima que a mistura SP60CV40 com 13% de deformação axial. O SP não apresenta uma resistência máxima para 15% de deformação axial, mas é menor do que 500 kPa com 20% de deformação axial que é apresentada no trabalho de Ramirez (2012). O comportamento das duas misturas é melhor que do SP para esta tensão confinante. A mistura SP60CV40 atinge uma resistência máxima para

110



9% de deformação axial. As misturas solo-cinza apresentam um comportamento rígido diferente do SP.

Figura 4.9 - Curvas tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para o SP, misturas SP60CV40 e SP60CF40 em ensaios de compressão triaxial.

O corpo de prova de SP para a tensão confinante de 200 kPa, se expande, igual às misturas SP60CV40 e SP60CF40, só que estas misturas solo-cinza sofrem uma expansão maior do que do SP. A deformação volumétrica apresentada ao

final do cisalhamento da mistura SP60CF40 é maior do que da mistura SP60CV40 e do SP.

A mistura SP60CF40 apresenta maior expansão do que a mistura SP60CV40 ao atingir a resistência máxima, mas todas atingem a resistência máxima com uma deformação volumétrica em expansão, maior do que ao início do cisalhamento.

Finalmente, nota-se para a tensão confinante de 400 kPa, a mistura de SP60CV40 apresenta um melhor comportamento que o SP e a mistura SP60CF40. A mistura SP60CV40 alcança sua resistência máxima com 10% de deformação axial, mas a mistura SP60CF40 tende a se igualar com a mistura de SP60CV40, no final do cisalhamento, sem apresentar resistência máxima. O SP não apresenta resistência máxima para a deformação de análise. A mistura SP60CF40 e o SP não apresentam resistência máxima e se sabe pelo trabalho de Ramirez (2012) que o SP atinge à uma resistência menor de 800 kPa, para 20% de deformação axial, os quais são menores que os resultados obtidos pelas misturas solo-cinza para esta tensão confinante.

O corpo de prova de SP para a tensão confinante de 400 kPa, se expande igual que à mistura de SP60CV40 e SP60CF40 e a expansão destas é maior que do SP. As misturas de SP60CV40 e SP60CF40 apresentam uma trajetória quase igual na deformação volumétrica versus deformação axial para 400 kPa de tensão confinante e sua expansão é maior do que do SP até o final do ensaio. A mistura SP60CV40 alcança sua resistência máxima com uma deformação volumétrica em expansão.

4.3.2.1.1. Envoltórias e Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento comparando a influência do tipo de cinza

Na Figura 4.10 se apresentam as envoltórias de resistência para o solo (SP) e as misturas SP80CV20 e SP80CF20 para zero dia de tempo de cura e são comparadas em suas trajetórias e parâmetros de resistência de Lambe e Mohr.

É notável a diferença que existe entre o solo (SP) e as misturas de solo com 20% de cinza volante e 20% de cinza de fundo, apresentando uma melhora ao longo da trajetória. Entre as misturas SP80CV20 e SP80CF20, pode-se dizer que o comportamento da mistura de SP80CV20 é melhor apresentando uma coesão maior e um ângulo de atrito menor.



Figura 4.10 – Comparação entre as envoltórias do SP, misturas SP80CV20 e SP80CF20.



Figura 4.11 – Comparação entre as envoltórias do SP, misturas SP70CV30 e SP70CF30.

Na Figura 4.11 se apresentam as envoltórias de resistência para o solo (SP) e as misturas SP70CV30 e SP70CF30 para zero dia de tempo de cura e são comparadas em suas trajetórias e parâmetros de resistência de Lambe e Mohr. Nota-se a diferença que existe entre o SP e as misturas de solo com 30% de cinza volante e 30% de cinza de fundo, apresentando uma melhora ao longo da trajetória. Entre as misturas de SP70CV30 e SP70CF30, pode-se dizer que quase não existe diferença e se pode considerar que o comportamento das duas misturas são as mesmas, mas a mistura de SP70CF30 apresenta uma pequena melhora comparando com a outra mistura e seus parâmetros de resistência.

Na Figura 4.12 se apresentam as envoltórias de resistência para o SP e as misturas SP60CV40 e SP60CF40 para zero dia de tempo de cura e são comparadas em suas trajetórias e parâmetros de resistência de Lambe e Mohr.



Figura 4.12 – Comparação entre as envoltórias do SP, misturas SP60CV40 e SP60CF40.

Nota-se a diferença que existe entre o SP e as misturas do solo com 40% de cinza volante e 40% de cinza de fundo, apresentando uma melhora ao longo da trajetória. Entre as misturas de SP60CV40 e SP60CF40, pode-se dizer que quase não existe diferença e se pode considerar que o comportamento das duas misturas são as mesmas, só que o ângulo de atrito da mistura de SP60CV40 é maior do que com a mistura SP60CF40.

A Tabela 4.22 apresenta os parâmetros de resistência do SP e das misturas do solo com cinza volante e cinza de fundo para os diferentes teores ensaiados sem tempo de cura.

Comparação de resultados					
Misturos do S		Parâmetros o	de Lambe	Parâmetros	s de Mohr
wisturas do S	010	a (kPa)	α (°)	c (kPa)	φ (°)
Solo Puro		19,0	24,0	21,2	26,4
SP80CV20)	45,0	26,3	51,8	29,6
SP80CF20)	23,0	28,4	27,4	32,8
SP70CV30)	35,5	28,0	41,9	32,1
SP70CF30)	41,5	27,1	48,3	30,8
SP60CV40)	28,0	29,5	34,0	34,4
SP60CF40)	30,0	28,6	35,8	33,0

Tabela 4.22 – Resumo de coesão e ângulo de atrito para o SP e as misturas solo-cinza sem tempo de cura

Nota-se que todas as misturas ensaiadas apresentam um comportamento melhor do que o SP pelo qual se pode dizer que a inserção da cinza no solo ajuda na melhora dos seus parâmetros de resistência. A mistura de SP80CV20 apresentou um melhor comportamento com uma coesão de 51,8 kPa, que é mais do que o dobro que a do SP e seu ângulo de atrito é 26,4° o qual não diferencia muito do SP. Finalmente, com o teor de 20% de cinza volante e de fundo existe uma diferença grande entre seus parâmetros de resistência, algo que tende a se igualar com o aumento dos teores de cinza.

Apresentam-se na Figura 4.13 as fotografias das amostras rompidas da mistura de SP80CV20 para cada nível de tensão o qual apresentou os melhores parâmetros de resistência comparando os tipos de cinza. Se perdeu o registro fotográfico do corpo de prova ensaiado com 200 kPa de tensão confinante.



Figura 4.13 – Corpos de prova de SP80CV20; (a) Amostra cisalhada a 50 kPa; (b) Amostra cisalhada a 400 kPa

4.3.2.2. Influência do Teor de Cinza

O comportamento de tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial dos ensaios com solo (SP) e misturas de solo com 20 %, 30% e 40% de cinza volante (SP80CV20, SP70CV30 e SP60CV40) sem tempo de cura é apresentado e comparado na Figura 4.14.



Figura 4.14 - Curvas tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para o SP, misturas SP80CV20, SP70CV30 e SP60CV40 em ensaios de compressão triaxial.

Nota-se que para a tensão confinante de 50 kPa, a mistura de SP80CV20 apresenta melhor comportamento do que o corpo de prova de SP e com o aumento da deformação axial esta tende a se igualar com o comportamento da mistura de SP70CV30 e SP60CV40, estas duas últimas misturas tem quase o mesmo comportamento ao longo de toda a deformação axial e o comportamento das três misturas é melhor do que com SP para esta tensão confinante. Também as misturas solo-cinza atingem a resistência máxima entre 1% e 3% de distorção, mas o SP atinge a resistência máxima após 6% de deformação axial. As misturas solo-cinza apresentam um comportamento rígido diferente do SP.

O corpo de prova de SP para a tensão confinante de 50 kPa, se expande e as misturas solo-cinza volante se expandem no início do ensaio tendo uma variação entre 3% e 6% de deformação axial para recuperar seu volume inicial. A mistura de SP70CV30 se comprime mais do que as outras misturas. A mistura de SP60CV40 se comprime menos em comparação às outras misturas. Então, pode-se dizer que não existe uma tendência de comportamento dos corpos de prova com o aumento do teor de cinza volante, mas só que se expande no início e acaba se comprimindo para deformações axiais maiores de 6%, para esta tensão confinante.

A mistura SP60CV40 apresenta maior deformação volumétrica de expansão do que as misturas de SP80CV20, SP70CV30, mas menor do que o SP ao atingir a resistência máxima.

Nota-se para a tensão confinante de 200 kPa, as três misturas (solo-cinza volante) apresentam quase a mesma trajetória, com uma pequena melhora da mistura de SP60CV40. O comportamento da mistura de SP80CV20 é muito mais rígido do que as outras duas misturas e do que o SP. O comportamento das três misturas é melhor do que o SP para esta tensão confinante. Também a mistura SP80CV20 atinge a resistência máxima para 6% de deformação axial, mas a mistura de SP70CV30 e SP60CV40 atinge a resistência máxima com uma deformação axial maior (10%).

Pode-se dizer que o SP e as misturas SP80CV20, SP70CV30 e SP60CV40 apresentam o mesmo comportamento e se expandem para a tensão confinante de 200 kPa. A diferença é pouca, mas a mistura de SP80CV20 apresenta uma deformação volumétrica menor do que o SP e as misturas de SP70CV30 e SP60CV40 até o final do ensaio. A mistura SP80CV20 apresenta menor deformação volumétrica de expansão do que as misturas SP70CV30, SP60CV40 e o SP ao atingir a resistência máxima.

Nota-se que para a tensão confinante de 400 kPa, a mistura de SP60CV40 apresenta um melhor comportamento quando comparado às misturas SP80CV20 e SP70CV30 e ao SP. A mistura de SP60CV40 apresenta um comportamento mais rígido do que as outras misturas e do que SP alcançando sua resistência máxima aos 10% de deformação axial.

As mistura de solo-cinza volante e o SP se expandem para a tensão confinante de 400 kPa, no entanto, a deformação volumétrica da mistura de SP70CV30 é maior que as outras misturas e do SP.

Nota-se que para teores de cinza volante de 20% e 30% as porcentagens de expansão e contração são maiores do que com 40% de cinza para todas as tensões confinantes. Então, pode-se concluir que a porcentagem de expansão ou compressão dos corpos de prova é inversamente proporcional ao teor de cinza que contem cada mistura de solo-cinza volante, como por exemplo, para teor de cinza volante de 40% a expansão ou compressão apresentada, para diferentes tensões confinantes, é menor que com teores de cinza volante de 20% e 30%.

O comportamento de tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial dos ensaios com solo (SP) e misturas de solo com 20 %, 30% e 40% de cinza de fundo (SP80CF20, SP70CF30 e SP60CF40) sem tempo de cura são apresentados e comparados na Figura 4.15.

Repara-se para a tensão confinante de 50 kPa, que a mistura de SP70CF30 apresenta melhor comportamento do que do corpo de prova de SP e com o aumento da deformação axial esta tende a se igualar com o comportamento da mistura SP80CF20 e SP60CF40, estas duas últimas misturas tem quase o mesmo comportamento. O comportamento das três misturas é melhor do que com o SP para esta tensão confinante. Também as misturas solo-cinza de fundo atingem uma resistência máxima entre 1% e 3% de deformação axial, no entanto, para o SP só ocorre depois de 6% de deformação axial. As misturas solo-cinza de fundo apresentam um comportamento rígido diferente do SP.



Figura 4.15 - Curvas tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para o SP, misturas SP80CF20, SP70CF30 e SP60CF40 em ensaios de compressão triaxial.

O corpo de prova de SP e a mistura de SP80CF20, para a tensão confinante de 50 kPa, se expande e as misturas SP70CF30, SP60SF40 se expandem no começo do ensaio, tendo uma variação entre 2% e 5% de deformação axial para recuperar seu volume inicial para depois, aos 8% de deformação axial começam ter o mesmo comportamento de compressão até o final do ensaio.

A mistura SP70CF30 apresenta maior deformação volumétrica do que as misturas SP80CF20, SP60CF40 ao atingir a resistência máxima. Todas atingem a resistência máxima com uma deformação volumétrica maior do que ao início do cisalhamento.

Para a tensão confinante de 200 kPa, as três misturas apresentam quase a mesma trajetória com uma pequena melhora das misturas de SP80CF20 e SP60CF40. O comportamento da mistura de SP60CF40 é muito mais rígido do que as outras duas misturas e do que do SP. O comportamento das três misturas são melhores do que do SP para esta tensão confinante. Também a mistura SP70CF30 atinge a resistência máxima para 10% de deformação axial e as misturas de SP80CF20 e SP60CF40 não apresentam uma resistência máxima para a faixa de análise.

Pode-se dizer que o SP e as misturas SP80CV20, SP70CV30 e SP60CV40 apresentam o mesmo comportamento e se expandem para a tensão confinante de 200 kPa. A mistura de SP80CF20 apresenta maior expansão do que do SP e as misturas de SP70CV30 e SP60CV40 ao final do ensaio.

Constata-se que a deformação volumétrica é variável com respeito aos teores de cinza de fundo para esta tensão confinante.

Para a tensão confinante de 400 kPa, a mistura de SP60CF40 apresenta um melhor comportamento em comparação às misturas SP80CF20, SP70CF30 e SP. A mistura de SP60CF20 apresenta um comportamento mais rígido do que as outras misturas e o SP. Nenhuma das três misturas solo-cinza de fundo apresentam resistência máxima dentro da faixa da análise.

As mistura de solo-cinza de fundo e o SP se expandem para a tensão confinante de 400 kPa, no entanto, a deformação volumétrica da mistura de SP80CF20 é maior do que as outras misturas e que do SP. Além disso, é notável que para maior teor de cinza de fundo dentro da mistura a expansão é menor.

É possível notar que para o teor de cinza de fundo de 40% seu valor de expansão é menor, mas a contração é maior ou igual do que com outras misturas de cinza para todas as tensões confinantes. Além disso, todas as misturas apresentam o mesmo comportamento de expandir-se mais para uma tensão confinante de 200 kPa. Conclui-se que quanto maior for o teor de cinza de fundo dentro da mistura a contração ou expansão, dependendo da tensão confinante, vai

minorar seu valor de deformação volumétrica e não vai ter muita diferença em comparação de seu volume inicial de cada corpo de prova.

4.3.2.2.1. Envoltórias e Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento comparando a influência do teor de cinza

A Figura 4.16 apresenta as envoltórias de resistência para o solo (SP) e as misturas SP80CV20, SP70CV30 e SP60CV40 sem de tempo de cura, as quais são comparadas em suas trajetórias e parâmetros de resistência de Lambe e Mohr.



Figura 4.16 – Comparação entre as envoltórias do SP, misturas SP80CV20, SP70CV30 e SP60CV40.

Repara-se a diferença que existe entre o solo (SP) e as misturas do solocinza volante, apresentando uma melhora das misturas ao longo da trajetória. Entre as misturas de SP80CV20, SP70CV30 e SP60CV40 pode-se dizer que à medida que se acrescenta o teor de cinza volante no solo, o parâmetro de coesão diminui e ângulo de atrito aumenta pelo qual se conclui, neste caso, que a mistura de SP80CV20 apresentou melhores parâmetros de resistência. Também para tensões confinantes altas, como 400 kPa, a diferença de comportamento entre as misturas é maior. A Figura 4.17 apresenta as envoltórias de resistência para o solo (SP) e as misturas SP80CF20, SP70CF30 e SP60CF40 sem tempo de cura, as quais são comparadas em suas trajetórias e parâmetros de resistência de Lambe e Mohr.



Figura 4.17 – Comparação entre as envoltórias do SP, misturas SP80CF20, SP70CF30 e SP60CF40.

Observa-se uma diferença que há entre o solo (SP) e as misturas do solocinza de fundo, apresentando uma melhora ao longo da trajetória. Entre as misturas de SP80CF20, SP70CF30 e SP60CF40 pode-se dizer que é variável a melhora com o teor de cinza, porque começa a aumentar o parâmetro de coesão até 30% de cinza de fundo, no entanto, com 40% começa cair e acontece o inverso com o ângulo de atrito. Neste caso, a mistura de SP70CF30 é a que tem melhor comportamento ao apresentar melhores parâmetros de resistência.

A Tabela 4.23 apresenta os parâmetros de resistência do solo (SP) e das misturas do solo com cinza volante e cinza de fundo para os diferentes teores ensaiados sem tempo de cura.

Nota-se que todas as misturas ensaiadas apresentam um comportamento melhor do que do solo (SP), pode-se dizer que a inserção da cinza, seja volante ou de fundo, ajuda no comportamento do solo e melhora seus parâmetros de resistência. Além disso, repara-se que ao aumentar o teor de cinza volante na mistura, o parâmetro de coesão começa cair, ocorrendo o contrário com o aumento de cinza de fundo que atinge a um valor máximo com o teor de 30% e depois decresce.

Comparação de resultados						
Misturas do Solo	Parâmetros	de Lambe	Parâmetros de Mohr			
	a (kPa)	α (°)	c (kPa)	φ (°)		
Solo	19,0	24,0	21,2	26,4		
SP80CV20	45,0	26,3	51,8	29,6		
SP70CV30	35,5	28,0	41,9	32,1		
SP60CV40	28,0	29,5	34,0	34,4		
SP80CF20	23,0	28,4	27,4	32,8		
SP70CF30	41,5	27,1	48,3	30,8		
SP60CF40	30,0	28,6	35,8	33,0		

Tabela 4.23 – Resumo de coesão e ângulo de atrito para o solo argiloso (SP) e as misturas solo-cinza sem tempo de cura.

Comparação de resultados

Com respeito ao ângulo de atrito, pode-se dizer que para a cinza volante se acrescenta quase 2 graus por cada 10% de cinza que é adicionado na mistura solocinza e para a cinza de fundo existe variações no resultado, onde seu valor decresce para um teor de 30% de cinza de fundo, no entanto, os valores estão entre 30 graus até 33 graus. Dentro de todas estas comparações, conclui-se que as misturas SP80CV20 e SP70CF30 são as que têm melhor comportamento em comparação com as outras misturas com diferente teor de cinza.

4.3.2.3. Influência do Tempo de Cura

Foram pesadas as amostras de corpos compactadas de misturas de solocinza depois de ser envolvidas em plástico e guardadas na câmara úmida para reter sua umidade. Pesaram-se os corpos envolvidos em plástico depois de 30 dias de tempo de cura para ser ensaiados e se notou que todos perderam umidade na faixa de 1% até 1,5% a menos do peso inicial. Foram pesados os corpos envolvidos em plástico depois de 60 dias de tempo de cura e se notou que todos perderam umidade na faixa de 1,5% até 2% a menos do peso inicial. Pode-se pensar que esta perda de umidade é devida a reação da cinza (volante ou de fundo) com a água e o solo.

O comportamento de tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial dos ensaios com solo (SP) e mistura de solo com 20 % de cinza

124





Figura 4.18 - Curvas tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para o SP, misturas SP80CV20 sem tempo de cura e com 30 e 60 dias em ensaios de compressão triaxial.

Observa-se que as mistura de SP80CV20 sem tempo de cura e T30d têm comportamentos semelhantes para as tensões confinantes de 50 kPa, e 200 kPa, entretanto, acontece uma diferença para tensão confinante de 400 kPa. Também se

pode ver que esta mistura sem tempo de cura e com 30 dias têm um melhor comportamento para tensões baixas como 50 kPa, no entanto, para tensões altas o comportamento melhora com 60 dias de tempo de cura

O comportamento sem tempo de cura e com 30 dias é muito mais rígido do que com 60 dias de tempo de cura. Em todo caso, os comportamentos com todos os tempos de cura são melhores do que do solo (SP).

Para a variação volumétrica, nota-se que para amostras sem tempo de cura e para tensões baixas (50 kPa), a amostra primeiro sofre uma pequena expansão para depois se comprimir até o final do ensaio, e com tensões confinantes altas, 200 kPa, e 400 kPa, começa a se expandir com o aumento destas tensões. Para 30 dias de tempo de cura, as amostras se expandem nos três ensaios e a deformação volumétrica é maior com o aumento de tensão confinante. Por último para 60 dias de tempo de cura, a amostra ensaiada com uma tensão baixa (50 kPa) se expande no começo do ensaio, mas depois se comprime, e com tensões altas os corpos de prova começam se expandir com o aumento da tensão confinante. No final do caso se pode ver que com tensões altas as amostras se expandem mais com 30 dias de tempo de cura e depois começa cair para 60 dias.

O comportamento de tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial dos ensaios com solo (SP) e mistura de solo com 30 % de cinza volante (SP70CV30) sem tempo de cura e com 30 dias de tempo de cura são apresentados e comparados na Figura 4.19. Não foram realizados os ensaios para 60 dias de tempo de cura por falta de tempo.

Repara-se que o comportamento para a mistura de SP70CV30 sem tempo de cura e com 30 dias é semelhante para todas as tensões ensaiadas, entretanto, para as amostras sem tempo de cura apresenta um comportamento mais rígido que com 30 dias e do SP nas tensões de 50 kPa, e 200 kPa. Em todos os casos o comportamento da mistura é melhor que do SP sem tempo de cura e com tempo de cura.

Para a variação volumétrica, nota-se que o SP, para a tensão de 50 kPa, sempre está se expandindo, entretanto, a mistura de SP70CV30 sem tempo de cura se expande até recuperar seu volume inicial com 4% de deformação axial e com 30 dias recupera seu volume inicial no final do ensaio. Para as tensões de 200 kPa as misturas sem tempo de cura e com 30 dias têm uma deformação volumétrica maior do que o corpo de prova de SP. Para a tensão de 400 kPa,

ocorre o mesmo que os corpos de prova da mistura solo-cinza volante, expandemse mais do que o SP, mas a deformação volumétrica é maior sem tempo de cura que com 30 dias de tempo de cura. Os ensaios com 30 dias de tempo de cura sempre estão em expansão.



Figura 4.19 - Curvas tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para o SP, misturas SP70CV30 sem tempo de cura e com 30 dias em ensaios de compressão triaxial.

O comportamento de tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial dos ensaios com solo (SP) e mistura de solo com 40 % de cinza volante (SP60CV40) sem tempo de cura e com 30 e 60 dias de tempo de cura são apresentados e comparados na Figura 4.20.



Figura 4.20 - Curvas tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para o SP, misturas SP60CV40 sem tempo de cura e com 30 e 60 dias em ensaios de compressão triaxial.

Para estes ensaios, observa-se a diferença que há na mistura de SP60CV40 com 30 dias de tempo de cura, apresentando um melhor comportamento para tensões altas como 200 kPa, e 400 kPa, no entanto, decresce um pouco para tensões baixas como 50 kPa. O comportamento da mistura de SP60CV40 para 60 dias de tempo de cura é mais rígido para 50 kPa e 400 kPa. Em todos os casos de tempo de cura, o comportamento da mistura solo-cinza volante é melhor que do SP, apresentando uma resistência pico de 1200 kPa, para uma tensão confinante de 400 KPa.

Para a variação volumétrica, nota-se que para a tensão de 50 kPa, o SP sempre está em expansão, mas a mistura se expande no começo do ensaio, recupera seu volume inicial e depois se comprime, além disso, para maior tempo de cura, expande-se em uma menor faixa de deformação axial e a compressão é maior. Para 200 kPa, o comportamento da mistura em diferentes tempo de cura é quase semelhante ao do SP. Por último, para a tensão confinante de 400 kPa, a mistura de solo-cinza volante sem tempo de cura se expande mais que os outros (30 e 60 dias) e do que o SP. Nota-se que os valores de expansão para esta mistura SP60CV40 em diferentes tempos de cura são menores que as outras misturas apresentando uma menor deformação volumétrica de -4%, onde os outros apresentavam uma maior deformação volumétrica de quase -10% para o ensaio todo.

O comportamento de tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial dos ensaios com solo (SP) e mistura de solo com 20 % de cinza de fundo (SP80CF20) sem tempo de cura e com 30 e 60 dias de tempo de cura são apresentados e comparados na Figura 4.21.

Nota-se que a mistura de SP80CF20 em seus diferentes tempos de cura apresenta quase o mesmo comportamento. Apenas para o tempo de cura de 60 dias apresenta uma pequena diferença entre os outros tempos de cura para a tensão confinante de 50 kPa, e ao final da tensão confinante de 400 kPa. A mistura de SP80CF20 sem tempo de cura, T30d e T60d apresentam uma resistência pico para a tensão confinante de 50 kPa, no entanto, não apresentam uma resistência de pico para as tensões confinantes maiores. Além disso, os resultados para a mistura de SP80CF20 sem tempo de cura e com 30 e 60 dias é melhor do que do SP.

Para a variação volumétrica, repara-se que a mistura SP80CF20 T0d para uma tensão confinante de 50 kPa, apenas se expande, embora, com tempos de

129

cura maiores, 30 e 60 dias, expande-se no começo do ensaio até uma deformação axial de 3%, onde recupera seu volume inicial e depois começa se comprimir, sendo que com 30 dias consegue se comprimir mais.



Figura 4.21 - Curvas tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para o SP, misturas SP80CF20 sem tempo de cura e com 30 e 60 dias em ensaios de compressão triaxial.

Para a tensão confinante de 200 kPa, a mistura de SP80CF20 T30d se expande mais do que com outros tempos de cura e do que o SP. Por fim, para a

tensão confinante de 400 kPa, expande-se mais a mistura de SP80CF20 sem tempo de cura. Pode-se notar que todas as misturas sem tempo de cura encontramse em expansão em todo o ensaio.

E conforme vai passando o tempo (30 e 60 dias) a deformação volumétrica vai minorando, para 30 dias de tempo de cura com uma tensão confinante de 200 kPa.

O comportamento de tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial dos ensaios com solo (SP) e mistura de solo com 30 % de cinza de fundo (SP70CF30) sem tempo de cura e com 30 dias de tempo de cura são apresentados e comparados na Figura 4.22. Não foram realizados os ensaios para 60 dias de tempo de cura por falta de tempo.

Constata-se a uma diferença muito alta entre os comportamentos da mistura SP70CF30 para 0 e 30 dias de tempo de cura, onde com o tempo de 30 dias apresenta um melhor comportamento para tensões altas como 200 kPa e 400 kPa, mas a diferença não é muita para tensões baixas como 50 kPa. Em todos os casos o comportamento da mistura de SP70CF30 sem tempo de cura e com T30d é melhor que do SP. O comportamento da mistura de SP70CF30 T30d é mais rígido que sem tempo de cura.

Para a variação volumétrica, observa-se a tensão confinante de 50 kPa, a mistura SP70CF30 sem tempo de cura e com T30d se expandem no começo do ensaio até recuperar seu volume inicial com uma deformação axial de 2% para a amostra sem tempo de cura e 6% para T30d, logo após começam a se comprimir. Para tensões maiores, 200 kPa e 400 kPa, todos os corpos de prova se expandem, sendo maior expansão para a mistura SP70CF30 sem tempo de cura com 200 kPa de tensão confinante. Nota-se que para mais tempo de cura a variação volumétrica é menor para a mistura de solo-cinza de fundo.

Enfim, observa-se que a deformação volumétrica com o aumento de teor de cinza de fundo é menor comparando as misturas de SP80CF20 e SP70CF30 em seus diferentes tempos de cura.



Figura 4.22 - Curvas tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para o SP, misturas SP70CF30 sem tempo de cura e com 30 dias em ensaios de compressão triaxial.

O comportamento de tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial dos ensaios com solo (SP) e mistura de solo com 40 % de cinza de fundo (SP60CF40) sem tempo de cura e com 30 e 60 dias de tempo de cura são apresentados e comparados na Figura 4.23.

Neste caso se observa que a mistura SP60CF40 T30d tem um melhor comportamento para as três tensões confinantes ensaiadas, além disso, observa-se

que a mistura com T60d chega atingir quase a mesma resistência de pico para tensões altas (200 kPa e 400 kPa) com uma deformação axial maior, entre 12% e 15%. Nota-se que a diferença não é tão significativa com o passar do tempo, embora haja uma pequena melhora no comportamento da mistura SP60CF40 T30d.



Figura 4.23 - Curvas tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para o SP, misturas SP60CF40 sem tempo de cura e com 30 e 60 dias em ensaios de compressão triaxial.

Para a variação volumétrica, observa-se que para a mistura SP60CF40 sem tempo de cura e T30d têm quase o mesmo comportamento para a tensão confinante de 50 kPa, onde se expande no início do ensaio até uma deformação axial de 5%, recupera seu volume inicial, e começa se comprimir até o fim do ensaio. Para as tensões confinantes maiores (200 kPa e 400 kPa) todos os ensaios em diferentes tempos de cura e para o SP se expandem, tendo como diferença, que para 200 kPa a mistura de SP60CF40 T60d, a expansão foi menor que do SP para a mesma tensão confinante. Além disso, nota-se que as misturas solo-cinza de fundo têm um comportamento de expansão para maior tempo de cura e para maiores tensões confinante.

Enfim, observa-se que a deformação volumétrica com o aumento de teor de cinza de fundo é menor em comparação com a mistura de SP80CF20 e SP70CF30 em seus diferentes tempos de cura mostrados nas Figuras 4.21 e 4.22. Chegando atingir uma expansão mínima de -6% para a mistura de SP60CF40 T30d.

4.3.2.3.1. Envoltórias e Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento comparando a influência do tempo de cura

A Figura 4.24 apresenta as envoltórias de resistência para o solo (SP) e a mistura SP80CV20 sem tempo de cura, 30 e 60 dias de tempo de cura, que são comparadas em suas trajetórias e parâmetros de resistência de Lambe e Mohr.

Observa-se a diferença que existe entre o solo (SP) e a misturas do solocinza volante, onde a mistura apresenta uma melhora notável ao longo da trajetória. Também, para a mistura em diferentes tempos de cura não há muita diferença, no entanto, pode-se notar que em comparação com o SP, seus parâmetros de resistência aumentaram mais que o dobro e o ângulo de atrito estão entre 29.5° e 30.5° que é 3 graus mais do que do SP.



Figura 4.24 – Comparação entre as envoltórias do SP, misturas SP80CV20 sem tempo de cura e com 30 e 60 dias.

A Figura 4.25 apresenta as envoltórias de resistência para o solo (SP) e a mistura SP70CV30 sem tempo de cura e com 30 dias de tempo de cura, que são comparadas em suas trajetórias e parâmetros de resistência de Lambe e Mohr.



Figura 4.25 – Comparação entre as envoltórias do SP, misturas SP70CV30 sem tempo de cura e com 30 dias.

Neste caso a mistura de SP70CV30 apresenta uma melhora com respeito ao SP, mas esta mistura não apresenta diferença entre as misturas sem tempo de cura

e com 30 dias pelo qual se pode dizer que o tempo de cura não afeta nos parâmetros de resistência da mistura. Esta mistura apresenta um parâmetro de coesão maior do que o dobro do SP, e menor do que da mistura de SP80CV20 o qual será visto em uma tabela comparativa no final deste item. Nota-se que os ângulos de atrito para as amostras sem tempo de cura e com 30 dias são os mesmos e são maiores em 5º ao do SP.

A Figura 4.26 apresenta as envoltórias de resistência para o solo (SP) e a mistura SP60CV40 sem tempo de cura e com 30 e 60 dias de tempo de cura, que são comparadas em suas trajetórias e parâmetros de resistência de Lambe e Mohr.



Figura 4.26 – Comparação entre as envoltórias do SP e mistura SP60CV40 sem tempo de cura e com 30 e 60 dias.

No caso da mistura SP60CV40, é notável que para as amostras com tempos de cura maiores (30 e 60 dias) o parâmetro de resistência de coesão aumenta e o ângulo de atrito se mantem na faixa de 32° a 34°. Em todos os casos o comportamento da mistura com diferentes tempos de cura é melhor que do SP, apresentando uma diferença alta para tensões de confinamento baixas (50 kPa), tendendo a igualar-se com as tensões de confinamento altas (200 kPa e 400 kPa). Nota-se que para a mistura SP60CV40 T60d houve um aumento na coesão mais que o triplo do SP e o ângulo de atrito foi maior que do SP em 5°.

A Figura 4.27 apresenta as envoltórias de resistência para o solo (SP) e a mistura SP80CF20 sem tempo de cura e com 30 e 60 dias de tempo de cura, que são comparadas em suas trajetórias e parâmetros de resistência de Lambe e Mohr.

Para a mistura SP80CF20, constata-se que não há muita diferença no seu comportamento para diferentes tempos de cura, no entanto, existe um aumento no parâmetro de coesão com o passar do tempo e a diferença é notável de 0 para 30 dias de tempo de cura. O ângulo de atrito se mantém em 32° e 32.5° para a mistura solo-cinza de fundo, com diferentes tempos de cura. Em todos os casos o comportamento do SP80CF20 sem tempo de cura e com T30d e T60d é melhor que do SP. O aumento da coesão da mistura SP80CF20 em comparação com SP80CV20 sem tempo de cura é notável, tendo esta última um melhor comportamento.



Figura 4.27 – Comparação entre as envoltórias do SP e mistura SP80CF20 sem tempo de cura e com 30 e 60 dias.

A Figura 4.28 apresenta as envoltórias de resistência para o solo (SP) e a mistura SP70CF30 sem tempo de cura e com 30 dias de tempo de cura, que são comparadas em suas trajetórias e parâmetros de resistência de Lambe e Mohr.



Figura 4.28 – Comparação entre as envoltórias do SP e mistura SP70CF30 sem tempo de cura e com 30 dias.

Nota-se que para a mistura SP70CF30 atinge uma maior coesão que com SP80CF20 para seus diferentes tempos de cura, além disso, a mistura de SP70CF30 apresenta a mesma coesão para amostras sem tempo de cura e T30d, com o passar do tempo, o ângulo de atrito aumenta. Em todos os casos a mistura SP70CF30 tem um melhor comportamento que do SP. Nota-se que a diferença do ângulo de atrito é de 10° em comparação com o obtido para o SP para tempo de cura de 30 dias.

A Figura 4.29 apresenta as envoltórias de resistência para o solo (SP) e a mistura SP60CF40 sem tempo de cura e com 30 e 60 dias de tempo de cura, que são comparadas em suas trajetórias e parâmetros de resistência de Lambe e Mohr.

Nota-se que para a mistura de SP60CF40 não existe muita diferença com relação aos tempos de cura. Os três tempos de cura apresentam quase o mesmo ângulo de atrito, que está entre 33° e 34°, mas existe uma diferença apenas no tempo de cura de 30 dias, onde a coesão é maior do que as outras amostras com outros tempos de cura. Em todos os casos a mistura sem tempo de cura e com 30 e 60 dias de tempo de cura têm um melhor comportamento que o SP. Nota-se que a diferença do ângulo de atrito é de 6° a 7° em comparação com o obtido para o SP. Por último, pode-se dizer que para esta mistura os parâmetros de resistência chegam a um pico com 30 dias de tempo de cura.



Figura 4.29 – Comparação entre as envoltórias do SP e mistura SP60CF40 sem tempo de cura e com 30 e 60 dias.

A Tabela 4.24 apresenta os parâmetros de resistência do solo (SP) e das misturas do solo com cinza volante e cinza de fundo para os diferentes teores ensaiados nos tempos de cura de 0, 30 e 60 dias.

Tabela 4.24 – Resumo de coesão e ângulo de atrito para o solo (SP) e as misturas solo-cinza sem tempo de cura e com 30 e 60 dias de tempo de cura.

Comparação de resultados				
Misturas do Solo	Parâmetros de Lambe		Parâmetros de Mohr	
	a (kPa)	α (°)	c (kPa)	φ (°)
Solo Puro	19,0	24,0	21,2	26,4
SP80CV20	45,0	26,3	51,8	29,6
SP80CV20 T30d	39,0	25,8	44,5	28,9
SP80CV20 T60d	36,0	27,7	42,3	31,6
SP70CV30	35,5	28,0	41,9	32,1
SP70CV30 T30d	37,0	28,0	43,7	32,1
SP60CV40	28,0	29,5	34,0	34,4
SP60CV40 T30d	55,0	28,8	65,9	33,4
SP60CV40 T60d	63,0	28,1	74,5	32,2
SP80CF20	23,0	28,4	27,4	32,8
SP80CF20 T30d	29,0	28,0	34,3	32,1
SP80CF20 T60d	31,0	28,3	36,8	32,6
SP70CF30	41,5	27,1	48,3	30,8
SP70CF30 T30d	39,5	29,8	48,2	35,0
SP60CF40	30,0	28,6	35,8	33,0
SP60CF40 T30d	43,0	29,0	51,7	33,6
SP60CF40 T60d	31,0	29,2	37,4	34,0

Ressalta-se que todas as misturas ensaiadas apresentam um comportamento melhor do que o solo (SP), pelo qual se pode dizer que a inserção da cinza, seja volante ou de fundo, ajuda a melhorar o comportamento do solo e melhora seus parâmetros de resistência. Para a cinza volante, o melhor comportamento foi da mistura SP60CV40 T60d, porque atingiu uma coesão de 74,5 kPa, e o ângulo de atrito ficou em 32,2° em comparação com as outras misturas de cinza volante para o mesmo tempo de cura, que tiveram resultados mais baixos para o parâmetro de coesão e maiores para o parâmetro de ângulo de atrito. Para a cinza de fundo, a mistura com melhor comportamento foi de SP60CF40 T30d porque atingiu uma coesão de 51,7 kPa, e o ângulo de atrito ficou em 33,6°, em comparação com as outras misturas de cinza de fundo, mas se observa que os resultados para este teor de cinza de fundo é muito variável com o tempo. Dentro dos resultados das misturas com cinza volante, é notável que para a mistura de SP80CV20 os valores de coesão começam a decrescer com o tempo e seu ângulo de atrito aumenta; o contrário ocorre com as outras 2 misturas (SP70CV30 e SP6CV40) as quais melhoram seus parâmetros de resistência com o tempo, mantendo o ângulo de atrito dentro de uma faixa de 32° e 34°. Para os resultados das misturas de cinza de fundo, existe um aumento na coesão para a mistura de SP80CF20 com relação ao tempo, mas seus valores são menores com relação à mistura de SP70CF30 e SP60CF40. Comparando os mesmos teores de cinza volante e cinza de fundo, nota-se que com cinza volante se conseguiram melhores resultados, com a diferença que para o teor de 30% de cada tipo de cinza ocorreu o contrário e apresentaram uma diferença na coesão de 5 kPa, a 7 kPa, e 3º no ângulo de atrito. Conclui-se que os dois tipos de cinza servem para estabilizar o solo coluvionar argiloso estudado, recomendando-se a cinza volante com um teor de 40%, como melhor material de adição para mistura ou 30% de cinza de fundo porque se bem não apresenta o maior valor de coesão como apresenta a mistura com 40% de cinza de fundo para 30 dias de tempo de cura, mas não apresenta uma queda significativa como é apresentado pela mistura com 40% de cinza de fundo para 60 dias de tempo de cura.

As Figuras 4.30 e 4.31 apresentam a variação dos parâmetros de coesão e ângulo de atrito respectivamente para as misturas solo-cinza de diferente tipo, teor e tempo de cura, para uma melhor visualização da variação dos parâmetros de resistência com diferentes variáveis.



Figura 4.30 – Variação da coesão para diferentes misturas solo-cinza e tempo de cura.



Figura 4.31 – Variação do ângulo de atrito para diferentes misturas solo-cinza e tempo de cura.

As Figuras 4.32 e 4.33 apresentam as fotografias das amostras rompidas das misturas de SP60CV40 T60d e SP70CF30 sem tempo de cura para cada nível de tensão o qual apresentou os melhores parâmetros de resistência.



Figura 4.32 – Corpos de prova de SP60CV40 T60d - (a) Amostra cisalhada a 50 kPa; (b) Amostra cisalhada a 200 kPa; (c) Amostra cisalhada a 400 kPa.



Figura 4.33 – Corpos de prova de SP70CF30 sem tempo de cura - (a) Amostra cisalhada a 50 kPa; (b) Amostra cisalhada a 200 kPa; (c) Amostra cisalhada a 400 kPa.