

4. RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo serão apresentados os resultados e análises dos ensaios executados nesta pesquisa, para as amostras de solo, cinza volante, cinza de fundo e misturas estudadas. Esses ensaios têm como objetivo melhorar a compreensão do comportamento dos materiais em estudo, a fim de que sua utilização em obras geotécnicas com carregamento estático (como por exemplo, solo de fundações, camadas de aterros sanitários e aterros sobre solos moles) venha a ser validada.

4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

4.1.1 Solo Arenoso Puro

4.1.1.1 Índices Físicos

O solo arenoso em estudo caracteriza-se por ser uma areia média, limpa e de granulometria uniforme. Durante sua caracterização não foi observada a presença de matéria orgânica. Os índices físicos do solo puro são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Índices físicos do solo arenoso.

Índices Físicos	Solo Arenoso
Densidade real dos grãos (Gs)	2,65
Coefficiente de uniformidade (Cu)	1,76
Coefficiente de curvatura (Cc)	1,1
Diâmetro efetivo (D_{10})	0,33 mm
Diâmetro médio (D_{50})	0,55 mm
Índice de vazios mínimo (e_{min})	0,51
Índice de vazios máximo (e_{max})	0,74

4.1.1.2 Análise Granulométrica

O ensaio de análise granulométrica tem por finalidade a obtenção das frações constituintes do solo e sua classificação a partir destas. A Figura 4.1 apresenta a curva granulométrica obtida para o solo arenoso.

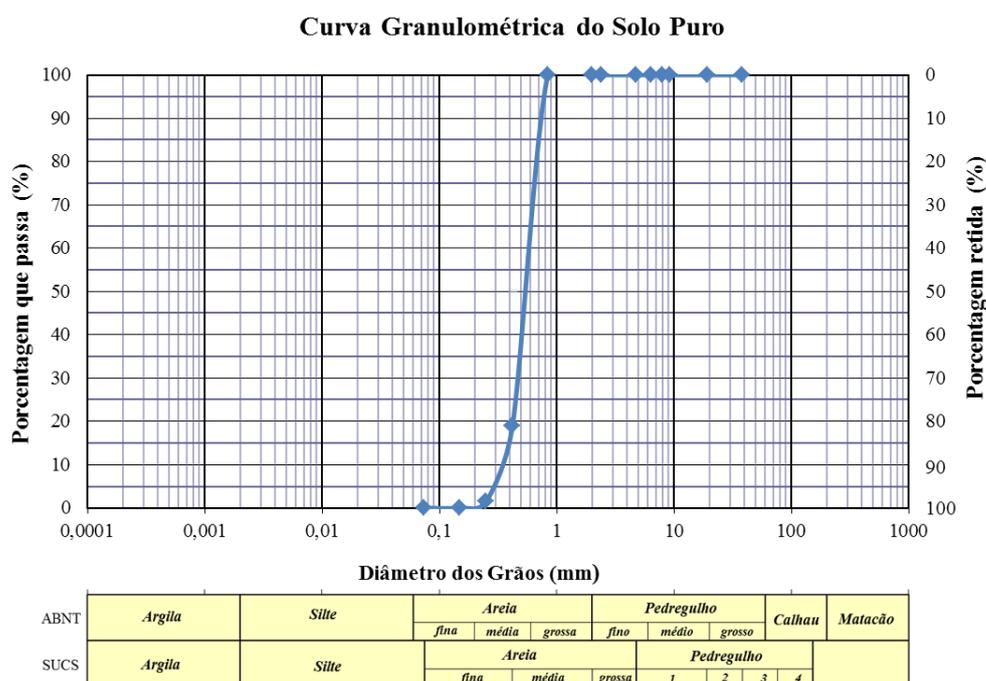


Figura 4.1 – Curva granulométrica do solo arenoso puro.

De acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), as areias com menos de 5% de finos, apresentando $C_u < 6$ e/ou $1 > C_c > 3$, como o material em questão, é classificado como SP, se tratando então de uma areia mal graduada.

4.1.2 Cinzas de RSU e Misturas em Estudo

4.1.2.1 Densidade Real dos Grãos (Gs)

O ensaio consiste na determinação do volume do material sólido de massa conhecida, de forma com que o volume de vazios seja excluído. Este ensaio foi realizado tanto para os materiais puros, como para as misturas em estudo. Os valores de Gs obtidos são apresentados na Tabela 4.2 e 4.3.

Tabela 4.2 – Resultados do ensaio de densidade real dos grãos para o solo, cinza volante e misturas.

Amostra	Teor de Cinza (%)	Teor de Cal (%)	Densidade real dos Grãos (Gs)
A	0	-	2,654
CV ₃₀ A ₇₀	30	-	2,637
CV ₄₀ A ₆₀	40	-	2,628
CV ₂₇ Cal ₃ A ₇₀	27	3	2,730
CV	100	-	2,596

Tabela 4.3 – Resultados do ensaio de densidade real dos grãos para o solo, cinza de fundo e misturas.

Amostra	Teor de Cinza (%)	Densidade real dos Grãos (Gs)
A	0	2,654
CF ₃₀ A ₇₀	30	2,649
CF ₄₀ A ₆₀	40	2,642
CF	100	2,638

Observa-se que o valor da densidade real dos grãos das cinzas puras se apresentam menores do que o solo puro, e as misturas se apresentam com valores entre os dos materiais puros, o que indica que ao se adicionar a cinza volante ou de fundo ao solo, poderá ser obtido um material mais leve. A mistura com cal se apresenta mais densa.

4.1.2.2 Análise Granulométrica

A Figura 4.2 apresenta as curvas granulométricas obtidas para o solo, cinza volante e cinza de fundo. A Figura 4.3 apresenta as curvas granulométricas do solo, cinza volante e misturas do solo com 30 e 40% de cinza volante. Ao se apresentar as curvas granulométricas em um mesmo gráfico, objetiva-se mostrar a influência da adição das cinzas de RSU na composição granulométrica do material.

Curvas Granulométricas dos Materiais Puros

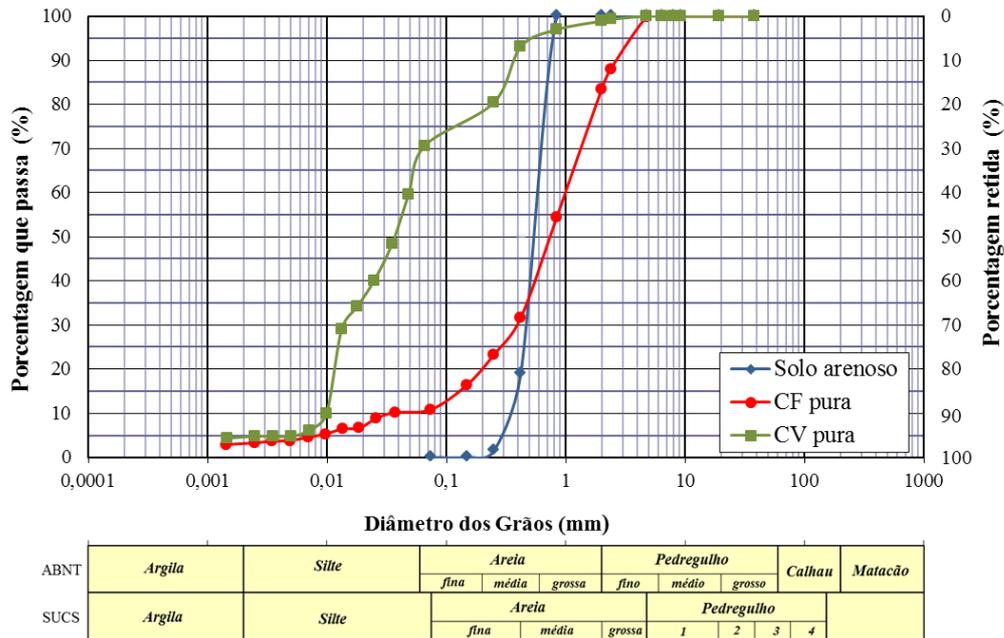


Figura 4.2 – Curvas granulométricas dos materiais puros.

Curvas Granulométricas - Cinza Volante e Misturas

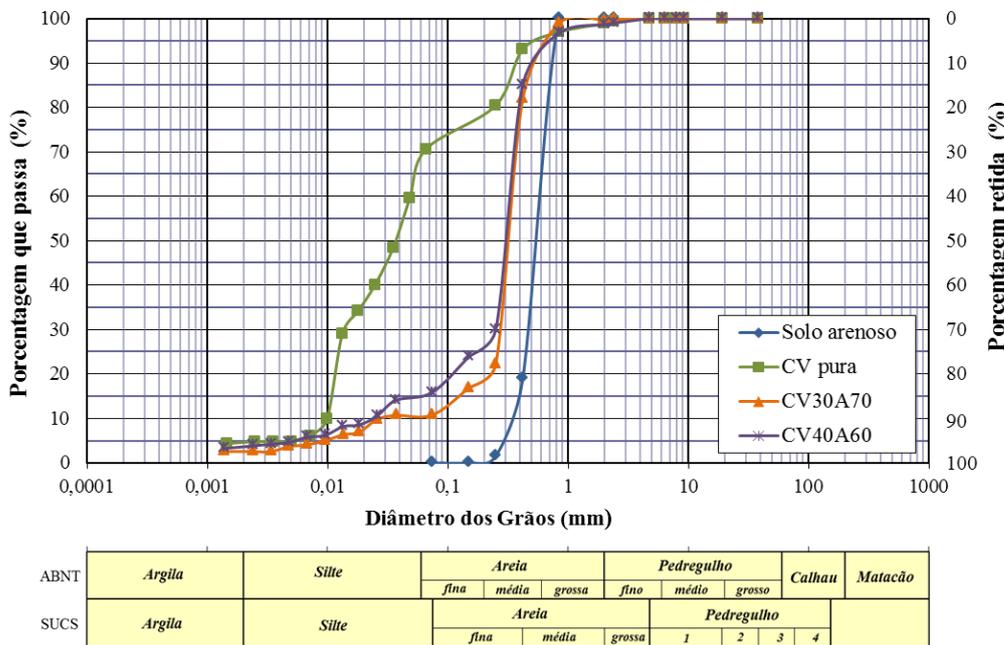


Figura 4.3 – Curvas granulométricas do solo, cinza volante e misturas do solo com 30% e 40% de cinza volante.

Observa-se que a cinza volante de RSU em estudo possui uma alta fração de material fino, correspondente à granulometria silte, e uma fração média de grãos referentes a uma areia média. Através das misturas, observa-se que o material

resultante adquire uma granulometria intermediária aos materiais puros, sendo mais bem graduado que a areia pura e mais uniforme que a cinza volante pura. Com a adição de 40% de cinza volante, observa-se uma maior quantidade de finos na mistura, e menor quantidade de fração areia média, quando comparado com a mistura de 30%, o que seria esperado, devido à maior porcentagem de cinza na mistura.

A Figura 4.4 apresenta a comparação entre as curvas granulométricas do solo, cinza de fundo e misturas do solo com 30 e 40% de cinza de fundo.

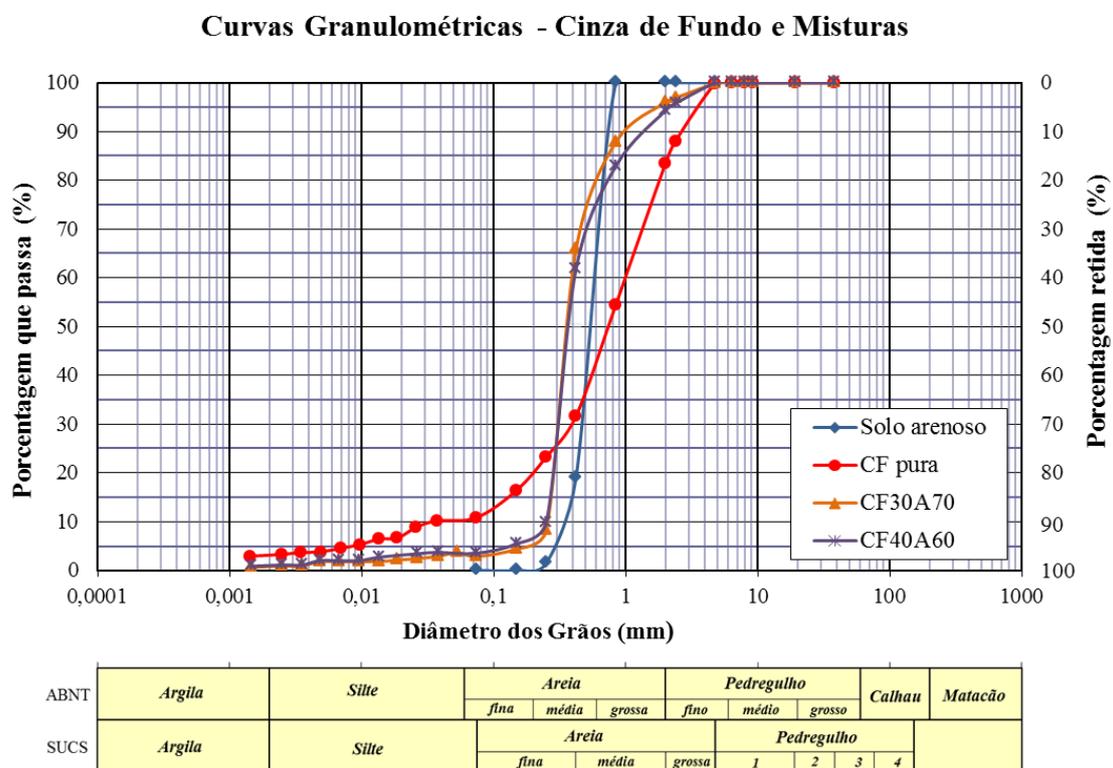


Figura 4.4 – Curvas granulométricas do solo, cinza de fundo e misturas do solo com 30% e 40% de cinza de fundo.

Em relação às cinzas de fundo de RSU, observa-se uma maior presença da fração areia grossa e média na cinza pura, e uma pequena quantidade de finos, composto por fração silte e argila. Ao se adicionar esta cinza ao solo, obteve-se um material semelhante à areia e à cinza pura, composto em sua maioria por fração areia e uma pequena quantidade de finos devido à inserção das cinzas.

A Tabela 4.4 apresenta os resultados dos ensaios de análise granulométrica, em porcentagens, para todos os materiais e misturas estudados.

Tabela 4.4 – Resultados das análises granulométricas.

Amostra	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)			Pedregulho (%)		
			Fina	Média	Grossa	Fina	Média	Grossa
Areia	-	-	-	70	30	-	-	-
Cinza Volante	4,6	62,5	5	22,6	4,2	1,1	-	-
CV30A70	2,5	12,1	4,9	69,7	10,5	0,3	-	-
CV40A60	3,6	14,9	8,4	63,1	8,6	1,4	-	-
Cinza de Fundo	3,1	9,3	7,5	21,5	42	16,5	0,1	-
CF30A70	0,8	3,1	2,5	68,8	20,8	4	-	-
CF40A60	1	3,8	2,9	63,1	23,5	5,7	-	-

Para as misturas com ambas as cinzas, pode-se esperar que ocorra alguma estabilização física do solo, de forma que haja uma melhoria em suas características, uma vez que sua textura e granulometria inicial foram alteradas e o material se tornou um pouco mais bem graduado que o solo puro.

Classificação SUCS dos Materiais

Com relação ao Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), os materiais obtiveram os índices conforme apresentado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Classificação SUCS dos materiais.

Amostra	Índice	Nome
Areia	SP	areia mal graduada
Cinza Volante	ML	silte com areia
CV30A70	SM	areia siltosa
CV40A60	SM	areia siltosa
Cinza de Fundo	SM	areia siltosa
CF30A70	SP	areia mal graduada
CF40A60	SP	areia mal graduada

Vizcarra (2010) também utilizou em seu trabalho as cinzas de RSU provenientes da USINAVERDE, obtendo a mesma classificação do presente trabalho para a cinza de fundo. O autor classificou a cinza volante como SM (areia siltosa). Dourado (2013) utilizou somente cinzas de fundo provenientes da Usinaverde, classificando-as como SM (areia siltosa).

De acordo com Ferreira *et al* (2003), as cinzas de RSU podem ser aplicadas em obras de pavimentação como substitutos à areia. De fato, como observado, as cinzas possuem grande proporção de fração areia, o que as tornariam adequadas a tal aplicação.

Estas mesmas classificações das cinzas para diferentes períodos de coletas, mostram que o material incinerado e as cinzas produzidas no processo possuem uma constância, o que favorece os estudos realizados para aplicabilidade destas cinzas.

4.1.2.3 Ensaio Químicos

Composição Química

Os ensaios de composição química foram realizados no laboratório do Departamento de Engenharia Química da PUC-Rio, para as amostras de cinzas pesada e volante, e mistura com cal. A Tabela 4.6 apresenta os resultados obtidos em termos de elementos químicos.

Tabela 4.6 – Elementos químicos presentes nas cinza volante e de fundo e mistura com cal.

Elemento Químico	Concentração (%)		
	CV	CF	CV ₂₇ Cal ₃ A ₇₀
Silício	14,386	61,486	38,960
Cálcio	54,489	18,795	37,369
Ferro	7,934	3,450	2,130
Alumínio	6,781	9,477	8,744
Titânio	4,211	1,130	1,769
Enxofre	4,095	-	5,125
Potássio	2,645	3,718	2,113
Zinco	2,234	0,356	0,698
Cloro	1,238	0,779	1,142
Manganês	0,466	-	-
Vanádio	0,341	-	-
Cromo	0,319	-	-
Chumbo	0,403	-	-
Outros	0,458	0,809	1,95

Através dos resultados obtidos, observa-se que os principais elementos encontrados em ambas as cinzas são o Si, Ca, Fe, Al, Cl, Na, K, S, Zn.

Forteza *et al* (2004) realizaram uma análise física e química detalhada das cinzas de fundo de RSU visando avaliar seu potencial de reuso. Segundo os autores, a cinza de fundo é principalmente composta pelos elementos Si, Fe, Ca, Al, Na e K, em forma de óxidos, e assim apresentam uma composição similar à materiais geológicos. Becquart *et al* (2008) também estudou a cinza de fundo de RSU, apresentando resultados semelhantes aos outros autores. Lam *et al* (2010) compilaram análises químicas de cinzas de fundo e volante de RSU provenientes de diferentes usinas incineradoras, realizadas por diversos autores. Os resultados apresentados mostraram como principais, os mesmos elementos encontrados na presente pesquisa.

Na Tabela 4.7, apresenta-se uma comparação dos resultados da composição química da cinza volante obtidos por Vizcarra (2010) e Fontes (2008), que utilizaram em seus trabalhos cinzas também provenientes da Usinaverde, e resultados apresentados por Lam *et al* (2010).

Tabela 4.7 – Comparação entre a composição química da cinza volante de RSU obtida em outros estudos.

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

Na Tabela 4.8, apresenta-se uma comparação dos resultados da composição química da cinza de fundo obtidos por Vizcarra (2010), Arm (2003 *apud* Vizcarra, 2010) e resultados apresentados por Lam *et al* (2010).

Tabela 4.8 – Comparação entre a composição química da cinza de fundo de RSU obtida em outros estudos.

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

Segundo Lam *et al* (2010), os compostos SiO₂, Al₂O₃, CaO, Fe₂O₃, Na₂O, K₂O são os óxidos comumente achados nas cinzas, sendo o CaO o composto mais abundante existente na cinza volante, constituindo mais de 46% desta, e o composto SiO₂ o mais abundante existente na cinza de fundo, constituindo mais de 49% desta.

Observa-se também nos resultados de Vizcarra (2010) que o CaO se encontra mais abundante na cinza volante. Já para os resultados obtidos por Fontes (2008), o composto SiO₂, se apresenta em maior porcentagem. Para a cinza de fundo todos os trabalhos obtiveram o SiO₂ como componente mais abundante.

Através da comparação dos resultados obtidos pelos diversos autores, nota-se uma diferença tanto nos teores de óxidos principais (SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃),

quanto nos teores de CaO e SO₃ presentes nas cinzas volante e de fundo, os quais têm influência nas reações de estabilização, demonstrando a existência uma variabilidade da composição química das cinzas.

Teor de Matéria Orgânica

Os resultados dos ensaios de determinação de matéria orgânica da cinza de fundo e volante são apresentados na Tabela 4.9. Estes foram obtidos mediante a técnica de oxidação com dicromato de potássio em meio sulfúrico, no Laboratório de Geotecnia/Química de Solos da COPPE/UF RJ, por Vizcarra (2010).

Tabela 4.9 – Teor de matéria orgânica da cinza de fundo e volante (Vizcarra, 2010).

Amostra	Carbono Orgânico		Matéria Orgânica	
	(g/kg)	(%)	(g/kg)	(%)
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 bem baixo, quando comparado com a cinza de fundo, que tem uma porcentagem significativamente maior. Winterkorn (1990) apresenta que uma das consequências da presença de um alto teor de carbono, é uma severa inibição da atividade pozolânica.

Ubaldo *et al* (2012) também utilizou as cinzas volantes de RSU provenientes da Usinaverde para estudo, obtendo em sua análise um baixo teor de matéria orgânica presente na cinza volante, afirmando que isto influencia favoravelmente o mecanismo de estabilização química.

Ensaio de Lixiviação e Solubilização

Para a classificação dos resíduos, foram utilizadas as listagens da Norma ABNT/NBR 10004/2004 – Anexo F (Lixiviação) e Anexo G (Solubilização). Os códigos constantes no anexo F identificam resíduos perigosos devido à sua toxicidade, conforme ensaio de lixiviação. A listagem do anexo G fornece os valores máximos permitidos para extratos solubilizados. Portanto, quando a

análise dos elementos químicos do extrato solubilizado apresenta algum valor superior ao da referida listagem, o resíduo é classificado como não inerte, caso contrário, este é classificado como resíduo inerte.

O ensaio de lixiviação foi realizado pelo laboratório TASQA Serviços Analíticos Ltda., segundo a Norma ABNT/NBR 10005/2004 (Vizcarra, 2010). Os resultados são apresentados nas Tabelas 4.10 e 4.11.

Tabela 4.10 – Resultados analíticos: Lixiviado – Parâmetros Inorgânicos (Vizcarra, 2010).

Parâmetros	LQ ⁽¹⁾	Resultados Analíticos (mg/l)		VMP ⁽²⁾
		CV	CF	
Arsênio	0,04	0,27	< LQ	1
Bário	0,005	0,52	0,68	70
Cádmio	0,003	0,05	0,06	0,5
Chumbo	0,03	< LQ	< LQ	1
Cromo Total	0,002	0,75	0,03	5
Fluoretos	0,07	2,01	1,3	150
Mercurio	0,0005	< LQ	< LQ	0,1
Prata	0,003	0,02	< LQ	5
Selênio	0,05	< LQ	< LQ	1

⁽¹⁾LQ: Limite de Quantificação

⁽²⁾VMP: Valores Máximos Permitidos segundo a norma NBR 10004/2004

Tabela 4.11 – Resultados analíticos: Lixiviado – Parâmetros Orgânicos (Vizcarra, 2010).

Parâmetros	LQ ⁽¹⁾	Resultados Analíticos (mg/l)		VMP ⁽²⁾
		CV	CF	
Aldrin e Dieldrin	0,001	< LQ	< LQ	0,003
Benzeno	0,004	< LQ	< LQ	0,5
Benzeno(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	< LQ	< 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

Continuação Tabela 4.11 – Resultados analíticos: Lixiviado – Parâmetros Orgânicos (Vizcarra, 2010).

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
Metiletilcetona	0,5	< LQ	< LQ	200
Metoxicloro	0,001	< LQ	< LQ	2
Nitrobenzeno	0,01			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
1,4,5-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

⁽¹⁾LQ: Limite de Quantificação

⁽²⁾VMP: Valores Máximos Permitidos segundo a norma NBR 10004/2004

O ensaio de solubilização foi realizado pelo laboratório TASQA Serviços Analíticos Ltda., segundo a Norma ABNT/NBR 10006:2004. Os resultados são apresentados nas Tabelas 4.12 e 4.13.

Tabela 4.12 – Resultados analíticos: Solubilizado – Parâmetros Inorgânicos (Vizcarra, 2010).

Parâmetros	LQ ⁽¹⁾	Resultados Analíticos (mg/L)		VMP ⁽²⁾
		CV	CF	
Alumínio	0,07	0,31	0,08	0,2
Arsênio	0,001	< LQ	< LQ	0,01
Bário	0,005	0,41	0,2	0,7
Cádmio	0,003	< LQ	< LQ	0,005
Chumbo	0,002	< LQ	< LQ	0,01
Cianetos	0,005	< LQ	< LQ	0,07
Cloretos	2	783	389	250
Cobre	0,003	0,01	0,06	2
Cromo Total	0,002	1,99	0,88	0,05

Continuação Tabela 4.12 – Resultados analíticos: Solubilizado – Parâmetros Inorgânicos
(Vizcarra, 2010).

Ferro	0,002	0,22	0,09	0,3
Fluoretos	0,07	0,56	0,76	1,5
Manganês	0,002	< LQ	< LQ	0,1
Mercúrio	0,0005	< LQ	< LQ	0,001
Nitrato (como N)	0,1	2,10	3,80	10
Prata	0,003	< LQ	< LQ	0,05
Selênio	0,002	< LQ	< LQ	0,01
Sódio	0,05	85,2	236	200
Sulfato (expresso como SO ₄)	1,00	650	290	250
Surfactantes	0,40	< LQ	< LQ	0,5
Zinco	0,006	0,04	0,11	5

⁽¹⁾LQ: Limite de Quantificação

⁽²⁾VMP: Valores Máximos Permitidos segundo a norma NBR 10004:2004

Tabela 4.13 – Resultados analíticos: Solubilizado – Parâmetros Orgânicos (Vizcarra, 2010).

Parâmetros	LQ ⁽¹⁾	Resultados Analíticos (mg/L)		VMP ⁽²⁾
		CV	CF	
Aldrin e Dieldrin	2,0 x 10 ⁻⁵	< LQ	< LQ	3,0 x 10 ⁻⁵
Clordano (isômeros)	0,0002	< LQ	< LQ	2,0 x 10 ⁻⁴
2, 4-D	0,01	< LQ	< LQ	0,03
DDT (isômeros)	0,001	< LQ	< LQ	2,0 x 10 ⁻³
Endrin	0,0002	< LQ	< LQ	6,0 x 10 ⁻⁴
Fenóis Totais	0,0042	0,014	0,021	0,01
Heptacloro e seu epóxido	2,0 x 10 ⁻⁵	< LQ	< LQ	3,0 x 10 ⁻⁵
Hexaclorobenzeno	0,001	< LQ	< LQ	1,0 x 10 ⁻³
Lindano (g BHC)	0,001	< LQ	< LQ	2,0 x 10 ⁻³
Metoxicloro	0,001	< LQ	< LQ	0,02
2,4,5-T	0,002	< LQ	< LQ	2,0 x 10 ⁻³
2,4,5-TP	0,01	< LQ	< LQ	0,03
Toxafeno	0,002	< LQ	< LQ	5,0 x 10 ⁻³

⁽¹⁾LQ: Limite de Quantificação

⁽²⁾VMP: Valores Máximos Permitidos segundo a norma NBR 10004/2004

Através dos resultados obtidos observa-se que todos os parâmetros analisados, para ambas as cinzas, apresentaram concentrações menores que os limites máximos permitidos estabelecidos no Anexo F da Norma ABNT/NBR

10004/2004, sendo estes então classificados como **Não Perigosos (Resíduo Classe II)**.

Para o ensaio de solubilização, a cinza volante apresentou os parâmetros Alumínio, Cloretos, Cromo Total, Sulfato (expresso como SO_4) e Fenóis Totais com concentrações acima dos valores máximos indicados no Anexo G da Norma ABNT/NBR 10004/2004. Dessa forma, a classificação para a amostra é **Resíduo Classe IIA – Não Inerte**.

Em relação à cinza de fundo, os parâmetros Cloretos, Sódio, Sulfato (expresso como SO_4) e Fenóis Totais apresentaram concentrações superiores aos valores máximos permitidos indicados no Anexo G, sendo então classificado como **Resíduo Classe IIA – Não Inerte**.

Devido ao fato das cinzas serem classificadas como não-inertes, seus estudos ambientais devem ser aprofundados e sua aplicação monitorada através de testes em campos experimentais, de modo a se avaliar seu impacto ao meio ambiente.

4.2 ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

4.2.1 Ensaios Triaxiais CID

Este item apresenta os resultados dos ensaios triaxiais CID, em compressão axial, realizados em amostras de solo arenoso e misturas deste com teores de cinza volante e cinza de fundo de 30% e 40%, calculados em relação ao peso seco do solo, e mistura solo-cinza-cal com 3% de cal adicionada em substituição ao peso da cinza na mistura com 30%. Foram aplicadas tensões efetivas variando de 50 a 300 kPa. Analisou-se o tempo de cura de 0, 60 e 90 dias para a mistura solo-cinza volante-cal, sendo que para os corpos de prova pré-moldados (Método 2 apresentado na Figura 3.16) analisou-se a cura somente com 60 dias, devido à falta de tempo para a realização de ensaios com curas mais longas.

As trajetórias, envoltórias de resistência e os parâmetros de resistência ao cisalhamento, assim como uma análise da influência do tipo de cinza, teores e tempo de cura no comportamento das amostras durante o cisalhamento, serão

apresentadas neste item.

4.2.1.1 Comportamento Tensão Desviadora e Variação Volumétrica versus Deformação Axial.

Na Figura 4.5 apresentam-se as curvas tensão desviadora (σ_d) e variação volumétrica (ϵ_v) versus deformação axial (ϵ_a), correspondentes aos ensaios do tipo CID, para a matriz de solo arenoso, em compressão axial nas tensões confinantes de 50, 150, 250 e 300 kPa.

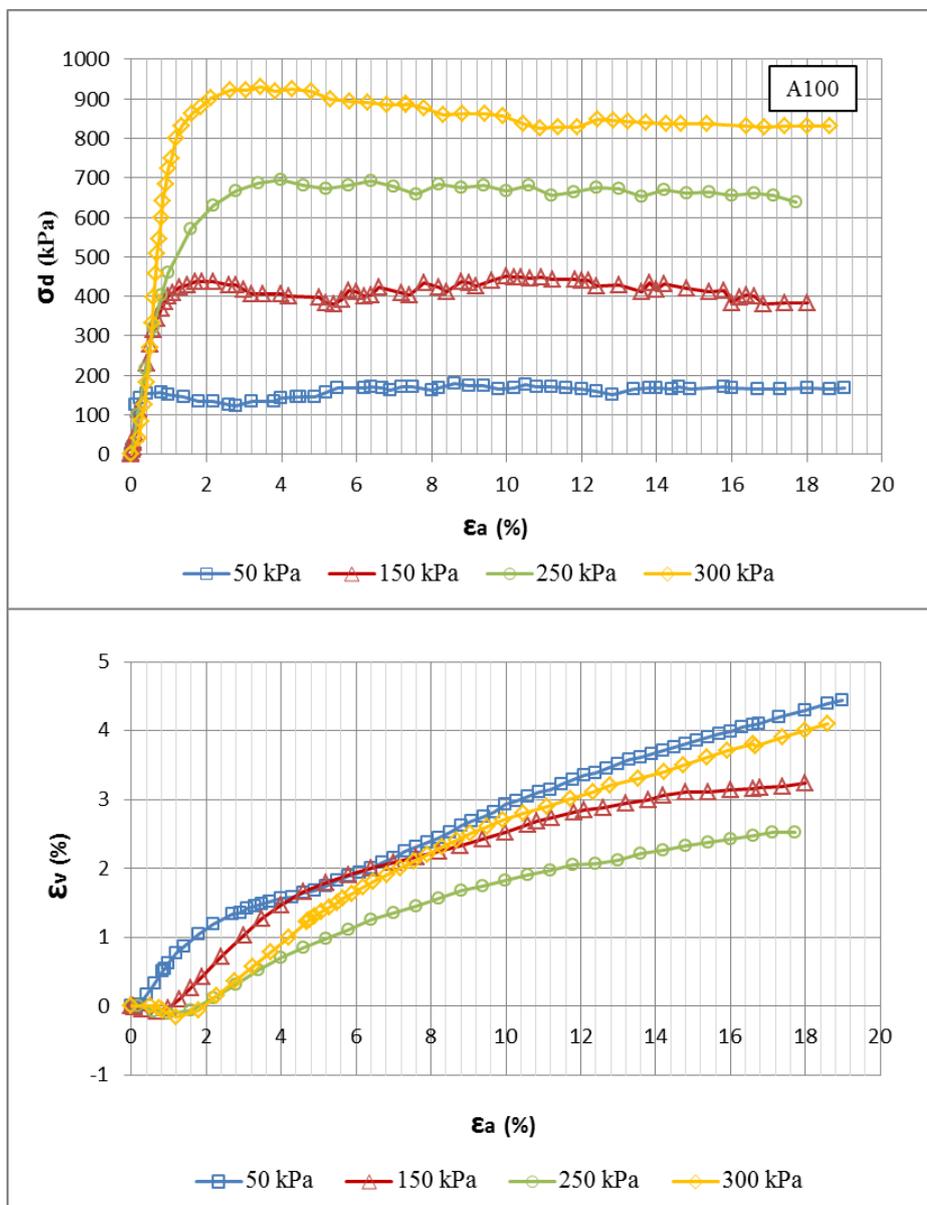


Figura 4.5 – Curvas tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para o solo arenoso em ensaios triaxiais.

Na Figura 4.6 apresentam-se as curvas tensão desviadora (σ_d) e variação volumétrica (ϵ_v) versus deformação axial (ϵ_a), correspondentes aos ensaios do tipo CID, para a mistura CV₃₀A₇₀, em compressão axial nas tensões confinantes de 50, 150 e 250 kPa.

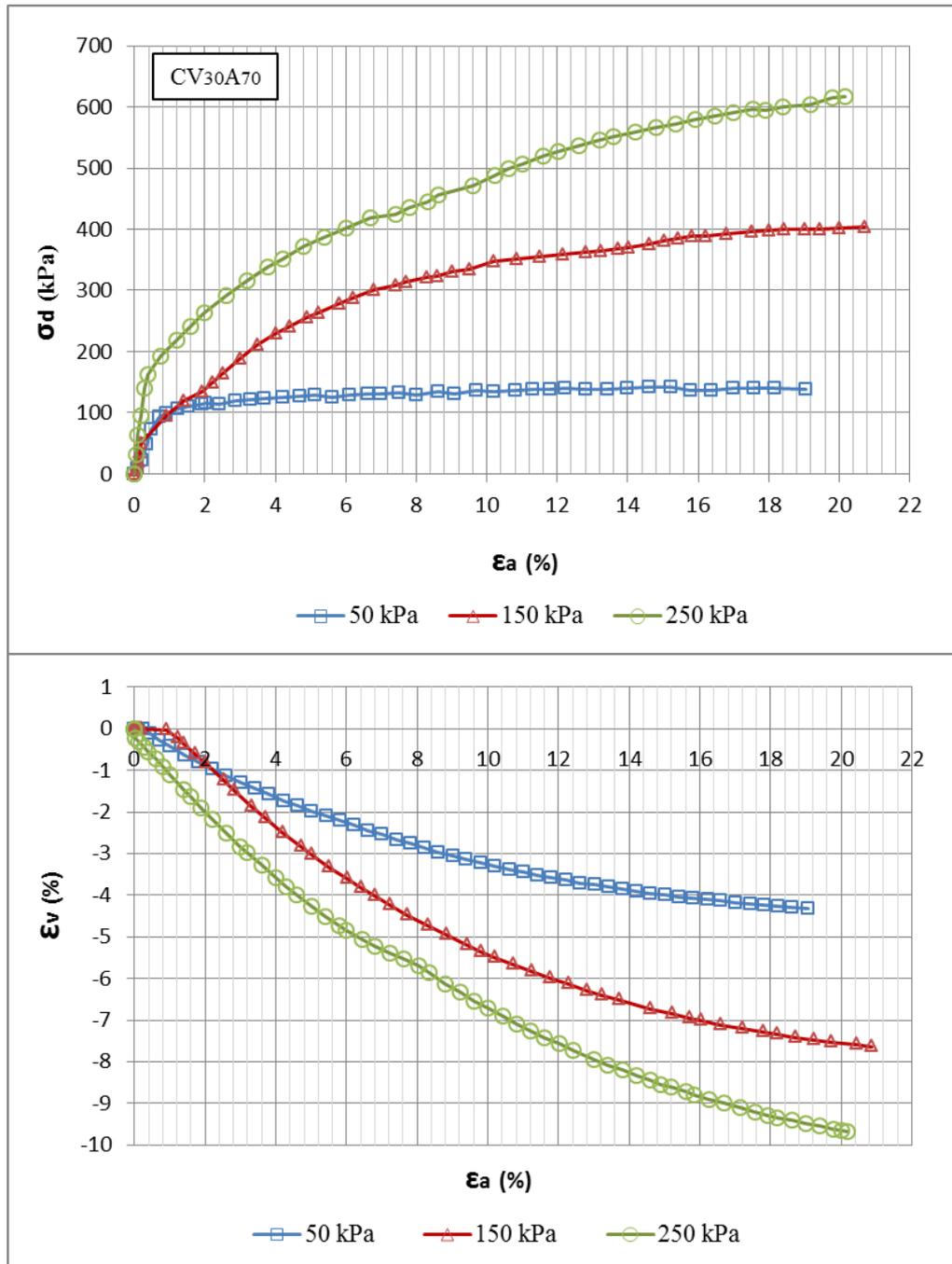


Figura 4.6 – Curvas tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para a mistura CV₃₀A₇₀ em ensaios triaxiais.

Na Figura 4.7 apresentam-se as curvas tensão desviadora (σ_d) e variação volumétrica (ϵ_v) versus deformação axial (ϵ_a), correspondentes aos ensaios do tipo

CID, para a mistura CV₄₀A₆₀, em compressão axial nas tensões confinantes de 50, 200 e 250 kPa.

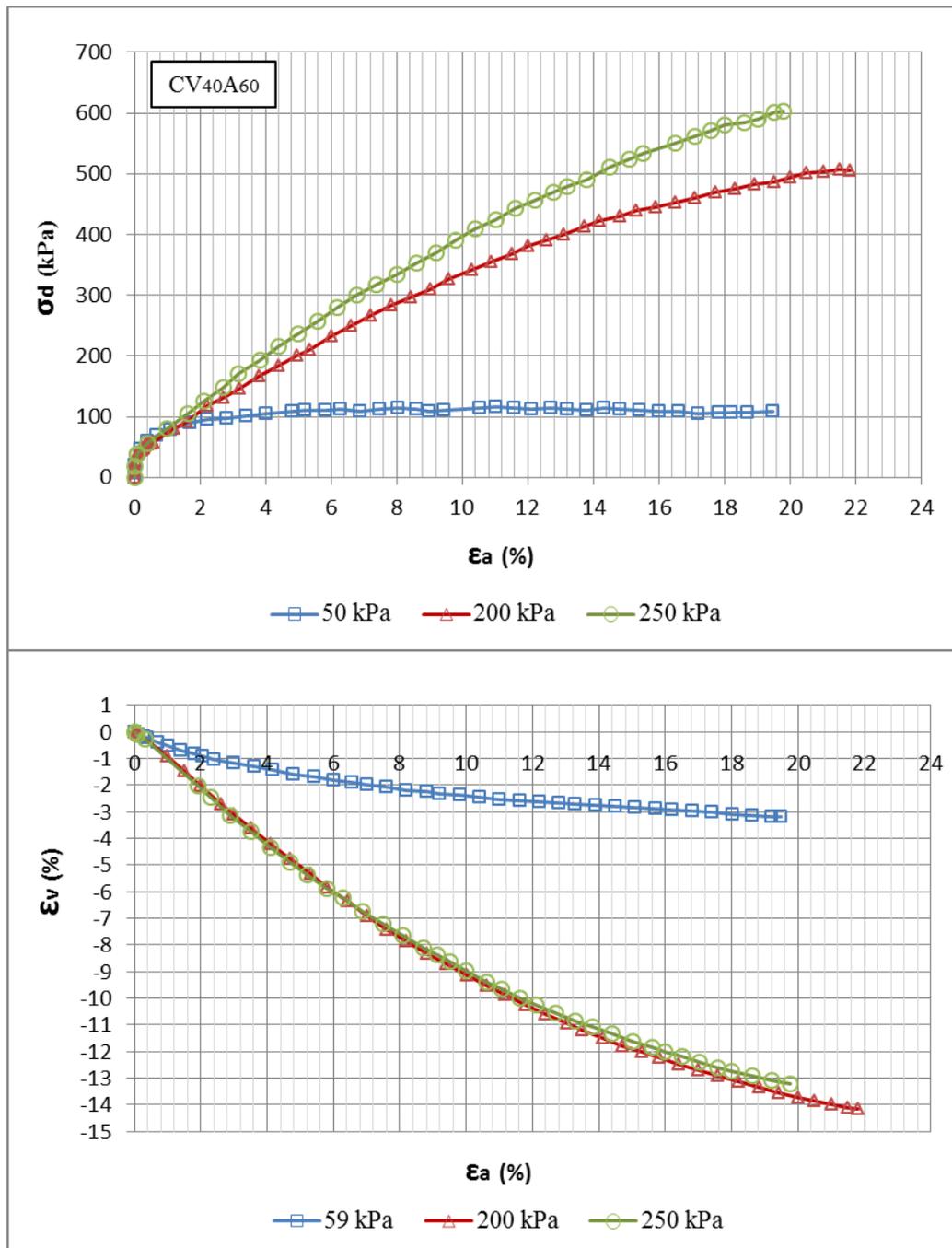


Figura 4.7 – Curvas tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para a mistura CV₄₀A₆₀ em ensaios triaxiais.

Na Figura 4.8 apresentam-se as curvas tensão desviadora (σ_d) e variação volumétrica (ϵ_v) versus deformação axial (ϵ_a), correspondentes aos ensaios do tipo CID, para a mistura CF₃₀A₇₀, em compressão axial nas tensões confinantes de 50, 150 e 250 kPa.

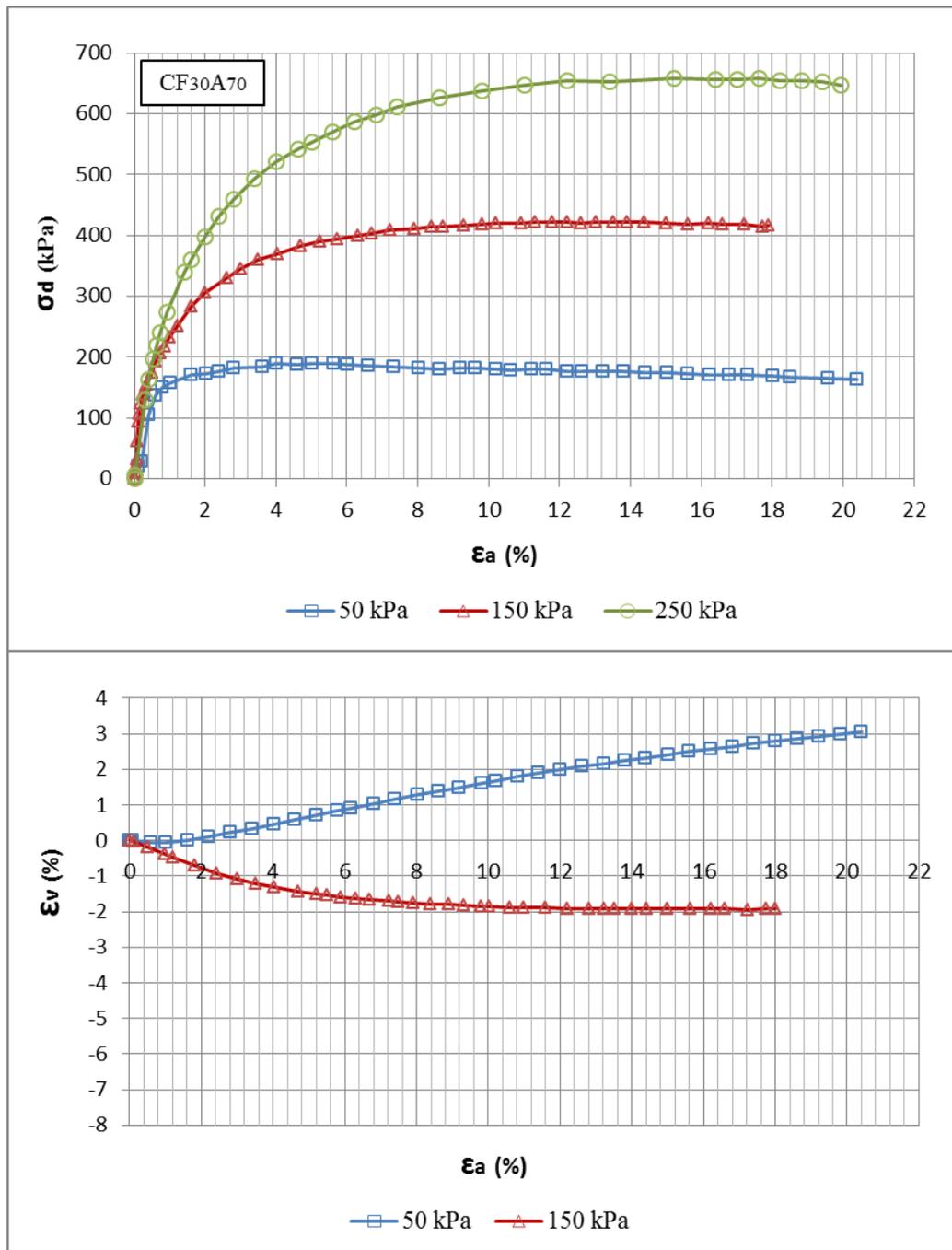


Figura 4.8 – Curvas tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para a mistura CF₃₀A₇₀ em ensaios triaxiais.

Devido a problemas nas leituras realizadas pelo LVDT conectado ao medidor de volume no equipamento triaxial, não foi possível plotar a curva *variação volumétrica* (ϵ_v) vs *deformação axial* (ϵ_a) para o ensaio com a mistura CF₃₀A₇₀ a 250 kPa. O mesmo ocorreu para a mistura CF₄₀A₆₀ a 50 kPa apresentada a seguir.

Na Figura 4.9 apresentam-se as curvas tensão desviadora (σ_d) e variação volumétrica (ϵ_v) versus deformação axial (ϵ_a), correspondentes aos ensaios do tipo CID, para a mistura CF₄₀A₆₀, em compressão axial nas tensões confinantes de 50, 150 e 250 kPa.

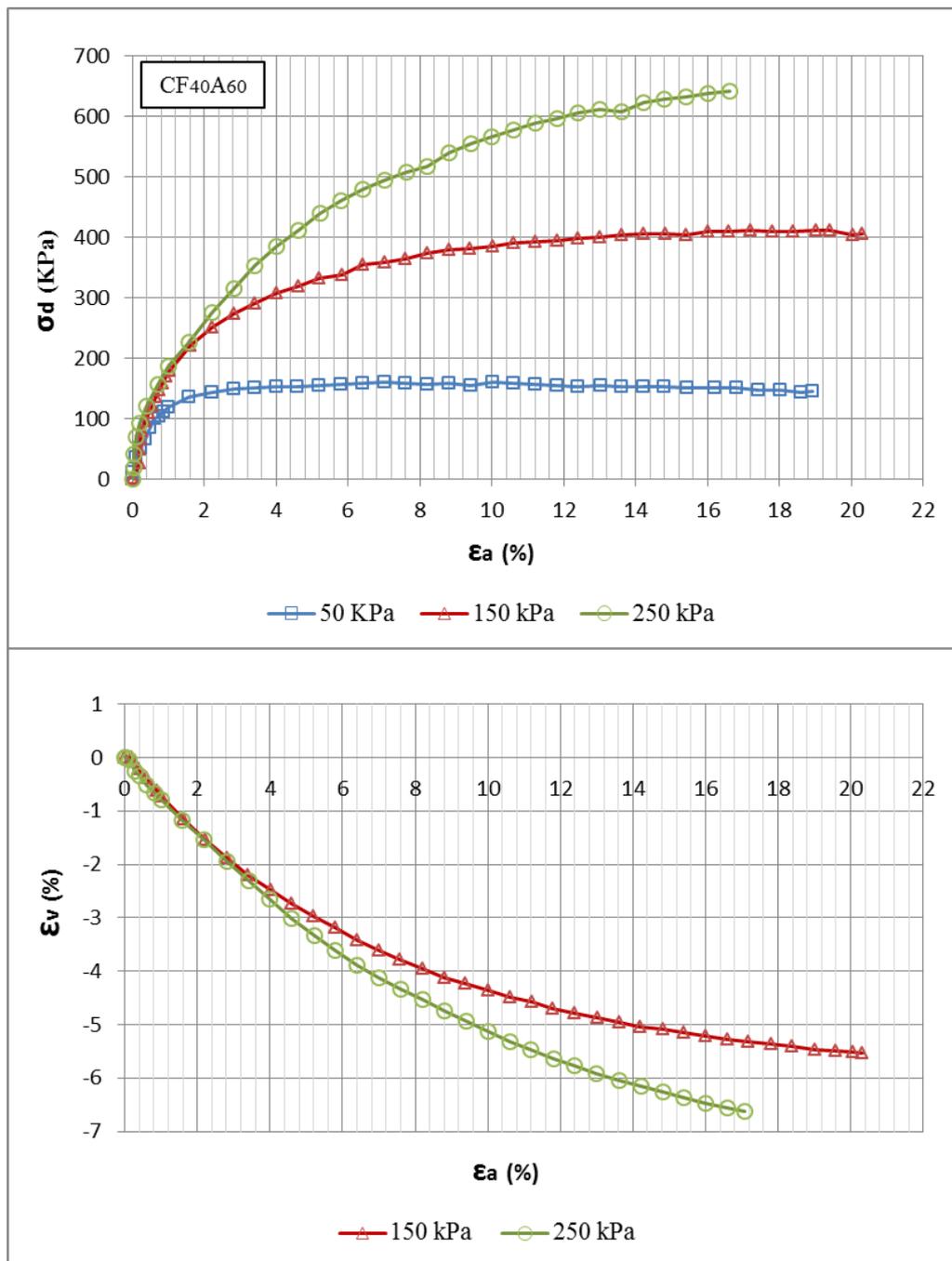


Figura 4.9 – Curvas tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para a mistura CF₄₀A₆₀ em ensaios triaxiais.

Na Figura 4.10 apresentam-se as curvas tensão desviadora (σ_d) e variação volumétrica (ϵ_v) versus deformação axial (ϵ_a), correspondentes aos ensaios do tipo

CID, para a mistura $CV_{27}Ca_3A_{70}$ com tempo de cura de 0 dias, em compressão axial nas tensões confinantes de 50, 150 e 250 kPa.

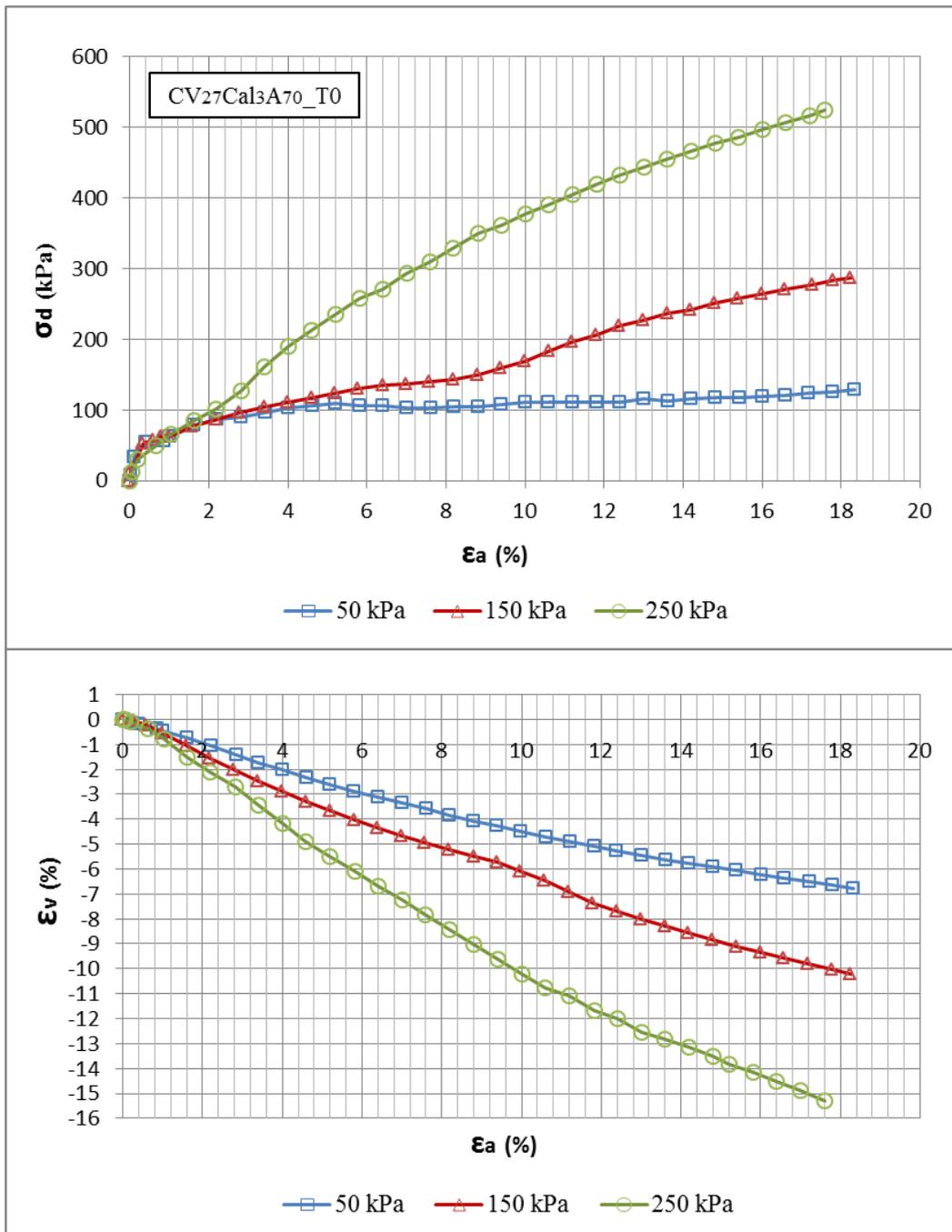


Figura 4.10 – Curvas tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para a mistura $CV_{27}Ca_3A_{70_T0}$ em ensaios triaxiais.

Na Figura 4.11 apresentam-se as curvas tensão desviadora (σ_d) e variação volumétrica (ϵ_v) versus deformação axial (ϵ_a), correspondentes aos ensaios do tipo CID, para a mistura $CV_{27}Ca_3A_{70}$ com tempo de cura de 60 dias, em compressão axial nas tensões confinantes de 50, 150 e 250 kPa.

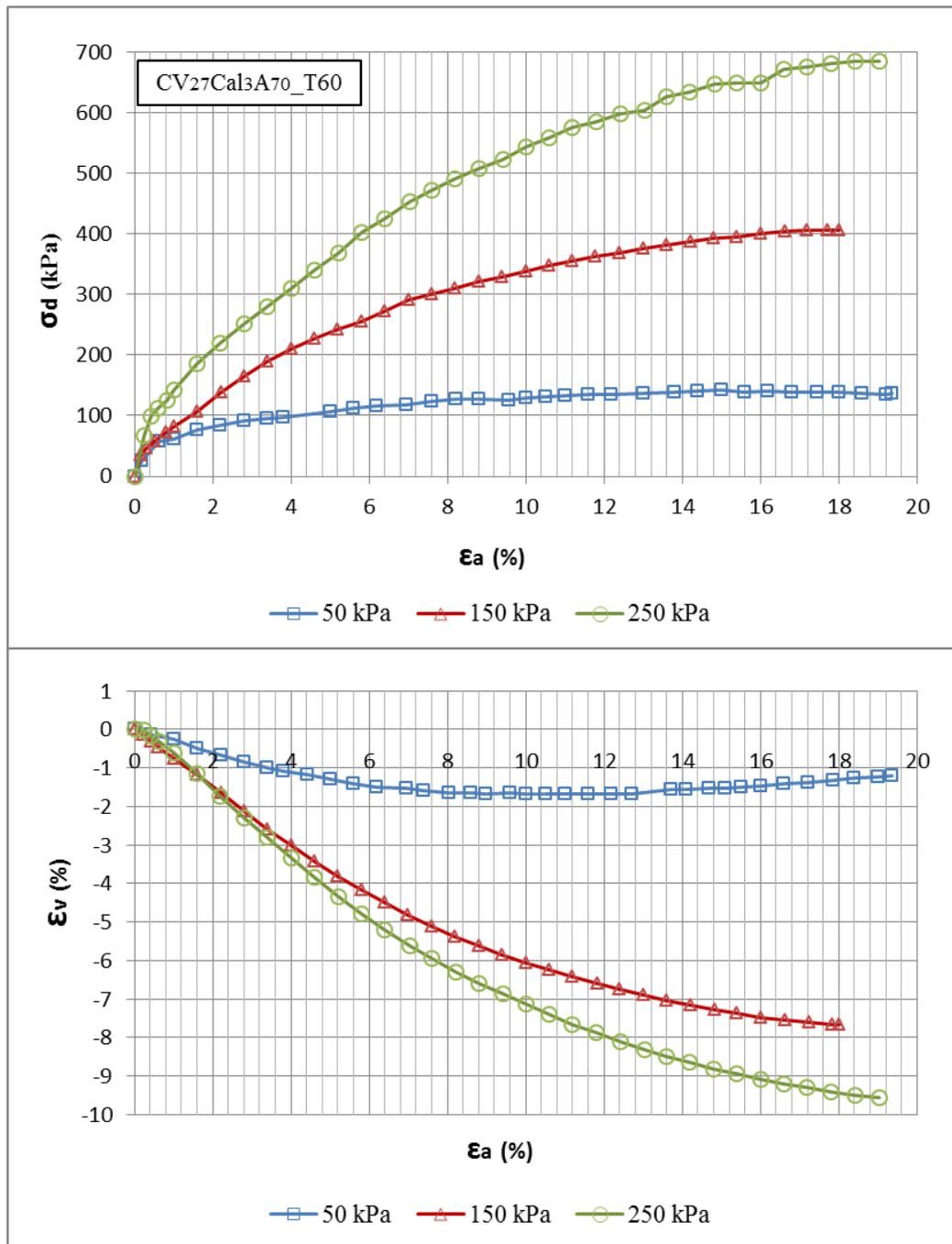


Figura 4.11 – Curvas tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para a mistura CV₂₇Cal₃A₇₀_T60 em ensaios triaxiais.

Na Figura 4.12 apresentam-se as curvas tensão desviadora (σ_d) e variação volumétrica (ϵ_v) versus deformação axial (ϵ_a), correspondentes aos ensaios do tipo CID, para a mistura CV₂₇Cal₃A₇₀ com tempo de cura de 90 dias, em compressão axial nas tensões confinantes de 50, 150 e 250 kPa.

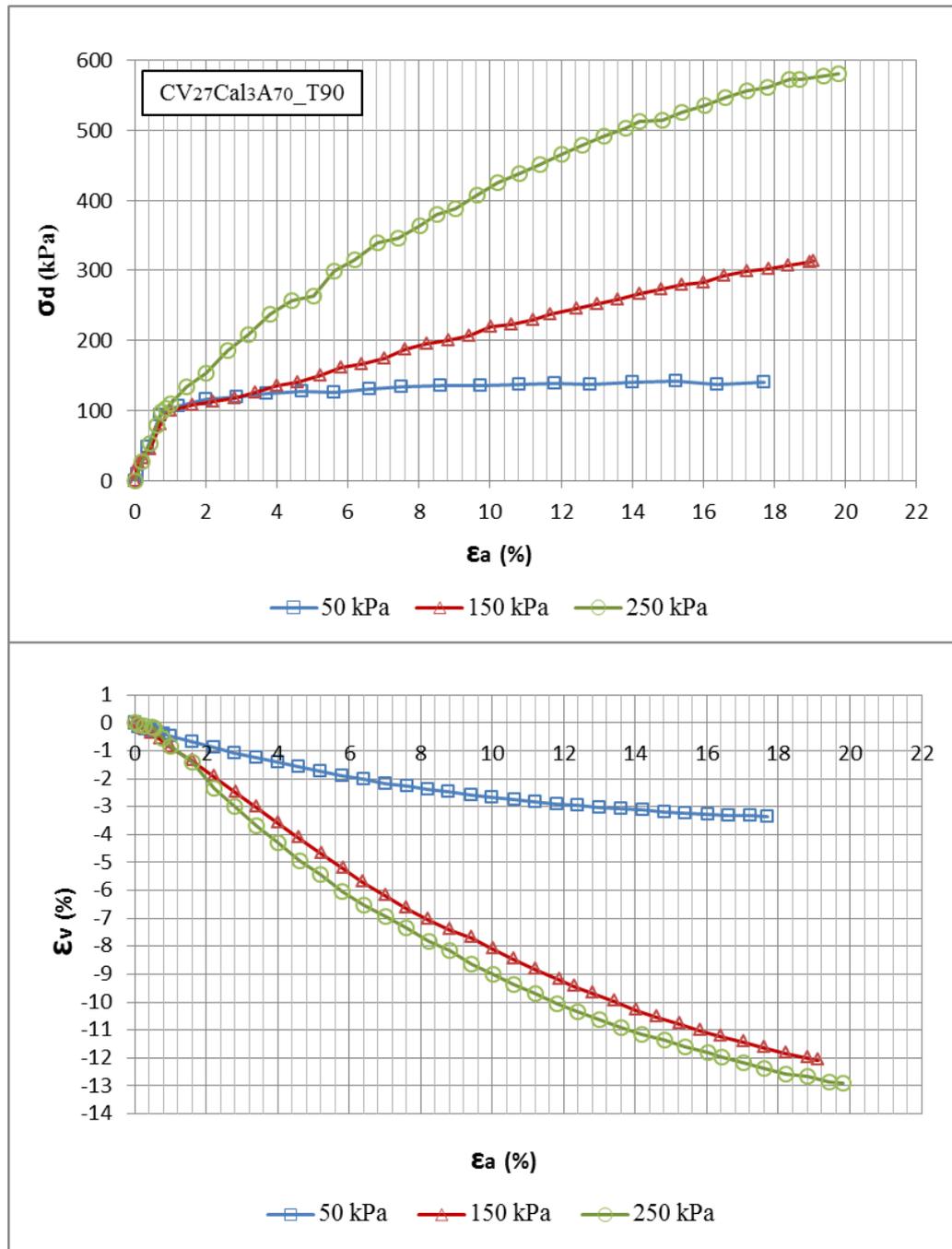


Figura 4.12 – Curvas tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para a mistura CV₂₇Cal₃A₇₀_T90 em ensaios triaxiais.

Na Figura 4.13 apresentam-se as curvas tensão desviadora (σ_d) e variação volumétrica (ϵ_v) versus deformação axial (ϵ_a), correspondentes aos ensaios do tipo CID, para a mistura CV₂₇Cal₃A₇₀_T60_PM, que foi realizado com o corpo de prova pré moldado (Método 2 apresentado na Figura 3.14) no tempo de cura de 60 dias, em compressão axial nas tensões confinantes de 50, 150 e 250 kPa.

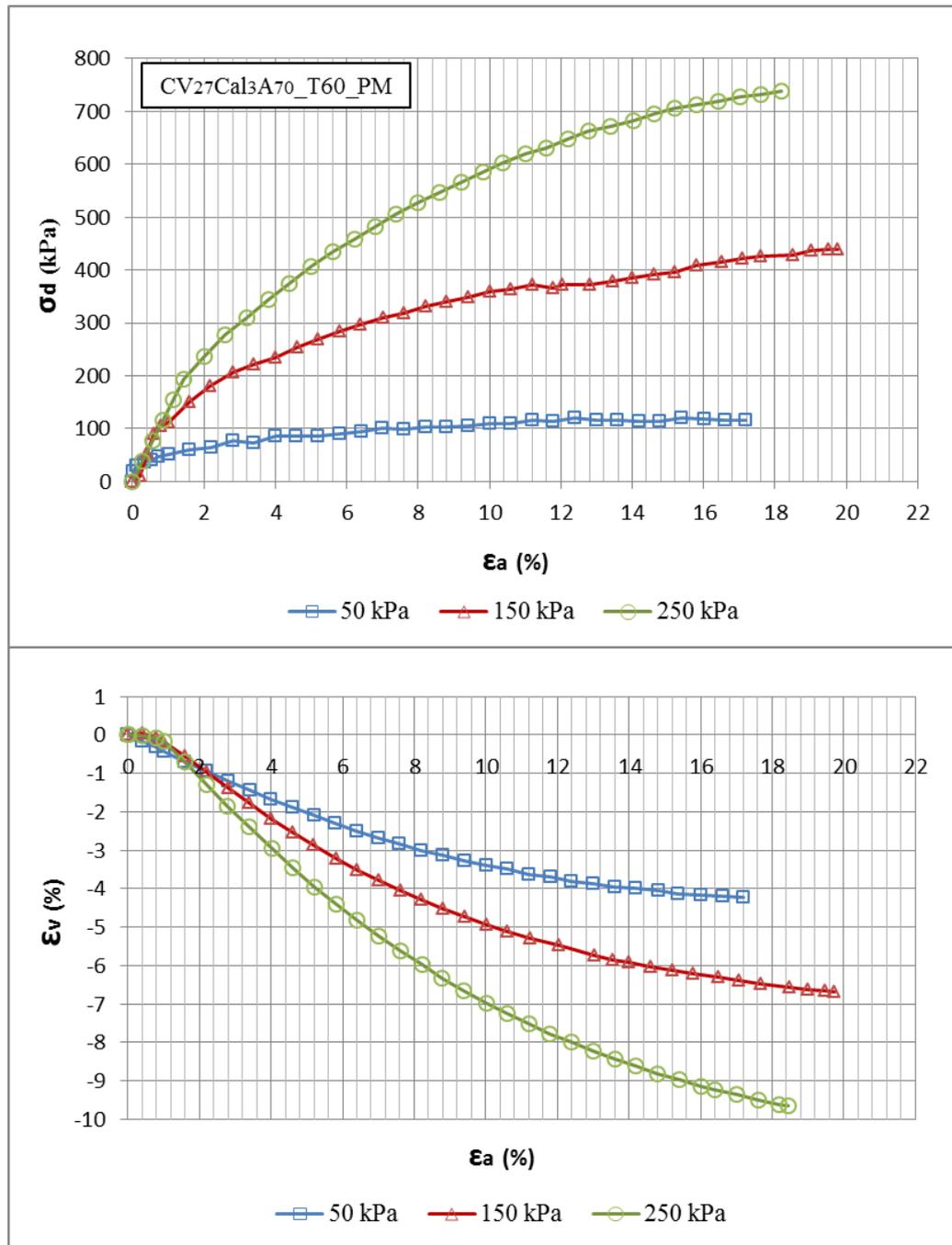


Figura 4.13 – Curvas tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para a mistura CV₂₇Ca₁₃A₇₀_T60_PM em ensaios triaxiais.

Ao se avaliar individualmente os resultados apresentados pelas misturas estudadas, pôde-se constatar que o comportamento da areia pura se apresenta semelhante ao de areais compactas, onde se observa um crescimento do valor de resistência a pequenas deformações, seguido pela ruptura definida por um pico. Ao se adicionar a cinza, observa-se que houve uma mudança de comportamento do material. As misturas, em geral, passam a apresentar curvas semelhantes ao de areais pouco compactas ou fofas, onde não se tem a presença de um pico de

ruptura e o crescimento do valor de resistência do material se dá a maiores deformações axiais.

Um dos motivos que poderia explicar tal mudança de comportamento é o fato de que apesar do cálculo da quantidade de material para compactação do corpo de prova ter seguido os mesmos critérios para todas as misturas, as massas específicas secas dos mesmos sofreram uma grande variação de valores, o que indica que a densidade relativa de 50% adotada, não foi de fato atingida na preparação das misturas. A Tabela 4.14 apresenta os valores calculados para a massa específica seca das misturas estudadas.

Tabela 4.14 – Variação dos valores de massa específica seca das misturas estudadas.

Mistura	Massa específica seca (g/cm ³)
Areia	1,63
CV30A70	1,28
CV40A60	1,21
CF30A70	1,36
CF40A60	1,30
CV27Ca13A70	1,31

Nota-se que os valores das massas específicas seca das misturas se apresentaram com valores próximos, enquanto que o solo puro apresenta um valor mais elevado.

4.2.1.2 Influência do tipo de cinza

O comportamento de tensão desviadora (σ_d) e variação volumétrica (ϵ_v) versus deformação axial (ϵ_a), correspondentes aos ensaios do tipo CID, para o solo arenoso puro (A₁₀₀) e misturas com 30% de cinza volante (CV₃₀A₇₀) e de cinza de fundo (CF₃₀A₇₀), são apresentados e comparados na Figura 4.14.

Nota-se que para a tensão confinante de 50 kPa, a mistura CF₃₀A₇₀ apresenta melhor comportamento que o solo arenoso puro e mistura com cinza volante para pequenas deformações, de aproximadamente 2 a 6%. Porém, com o aumento da deformação axial, o comportamento do solo e da mistura CF₃₀A₇₀ tendem a se igualar, possuindo uma mesma resistência residual. Já a mistura CV₃₀A₇₀ se

apresenta sempre inferior para este nível de tensão. Nenhuma das misturas apresenta uma resistência de pico bem definida, sendo a resistência alcançada em pequenas deformações aproximadamente iguais às alcançadas a maiores deformações axiais. Através do gráfico da deformação volumétrica *versus* deformação axial, nota-se que tanto a areia pura, quanto a mistura CF₃₀A₇₀, sofrem um aumento de volume contínuo durante o cisalhamento a 50 kPa, enquanto que a mistura CV₃₀A₇₀ sofre contração.

Para a tensão confinante de 150 kPa o solo arenoso apresenta uma resistência de pico a aproximadamente 2% de deformação axial, depois se mantendo constante com o aumento desta. A esta tensão, ambas as misturas apresentam um comportamento inferior ao solo puro, suportando uma menor carga. Porém, à deformação de aproximadamente 5%, o comportamento da mistura CF₃₀A₇₀ se iguala ao do solo puro. O mesmo ocorre para a mistura CV₃₀A₇₀, porém somente a maiores deformações, de aproximadamente 18%.

Para a tensão confinante de 250 kPa observa-se um comportamento semelhante ao descrito quando aplicada a tensão de 150 kPa. Porém nesta tensão o comportamento da mistura CF₃₀A₇₀ só se iguala ao solo puro a maiores deformações, de aproximadamente 14%. Em relação à mistura CV₃₀A₇₀, ainda observa-se um comportamento inferior.

Em relação à variação de volume, nota-se que a areia pura também sofre dilatação para as tensões confinantes de 150 e 250 kPa, enquanto a mistura com CV nesse caso sofre uma diminuição de volume mais acentuada. Para 150 kPa a mistura CF₃₀A₇₀ apresentou uma contração baixa, comparado aos outros resultados.

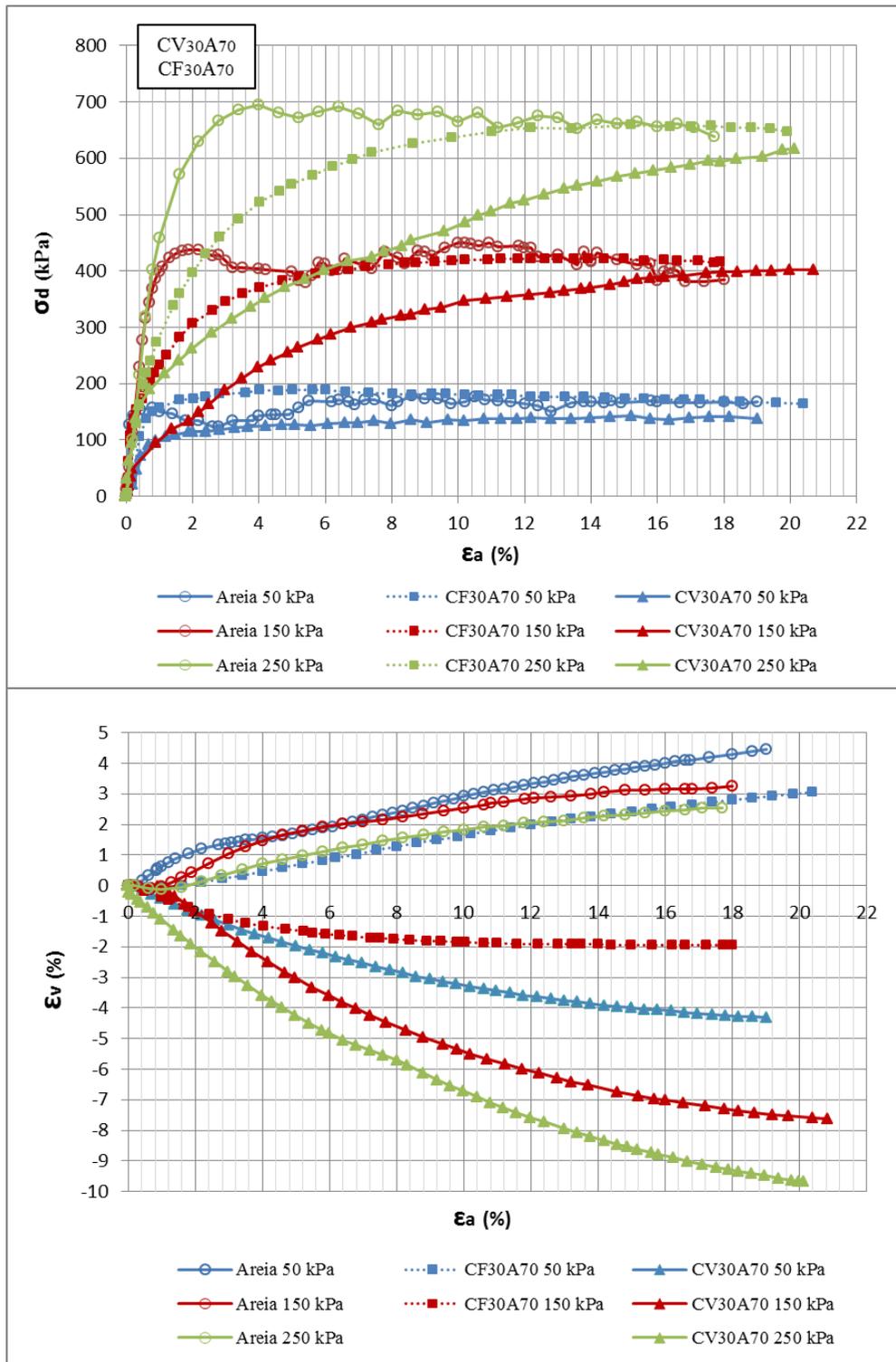


Figura 4.14 – Curvas tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial das amostras A₁₀₀ e misturas CF₃₀A₇₀ e CV₃₀A₇₀ em ensaios triaxiais.

Dessa forma, pode-se dizer que o comportamento da mistura CV₃₀A₇₀ se apresenta inferior tanto ao solo puro como à mistura com cinza de fundo na mesma proporção. A mistura CF₃₀A₇₀ se apresenta um pouco inferior ao solo puro a pequenas deformações axiais e se iguala a este a deformações axiais médias e

altas quando aplicadas altas tensões confinantes. Para baixa tensão a mistura se apresentou superior ao solo puro. Observa-se que a mistura CV₃₀A₇₀ também atinge a mesma resistência residual que os outros materiais, porém isto só ocorre quando se aplica uma maior tensão confinante e a maiores deformações axiais.

O comportamento de tensão desviadora (σ_d) e variação volumétrica (ε_v) versus deformação axial (ε_a), correspondentes aos ensaios do tipo CID, para o solo arenoso puro (A₁₀₀) e misturas com 40% de cinza volante (CV₄₀A₆₀) e de cinza de fundo (CF₄₀A₆₀), são apresentados e comparados na Figura 4.15.

Nota-se que para a tensão confinante de 50 kPa a mistura CF₄₀A₆₀ apresenta praticamente o mesmo comportamento que o solo arenoso puro. Nenhum dos materiais apresenta uma resistência de pico bem definida, sendo a resistência alcançada em pequenas deformações aproximadamente iguais às alcançadas a maiores deformações axiais. Já a mistura CV₄₀A₆₀ apresenta um comportamento semelhante aos outros materiais, porém atingindo uma resistência inferior aos mesmos. Para todas as misturas, a resistência máxima, e aproximadamente constante, é atingida a 2% de deformação axial. Através do gráfico da deformação volumétrica *versus* deformação axial, nota-se que o corpo de prova da areia pura sofre um aumento de volume contínuo durante o cisalhamento a 50 kPa, enquanto que a mistura CV₄₀A₆₀ sofre uma contração menos acentuada que a dilatação ocorrida com o solo arenoso puro. Não foi possível avaliar este comportamento para a mistura CF₄₀A₆₀ devido a problemas ocorridos na aquisição dos dados.

Para a tensão confinante de 150 kPa a mistura CF₄₀A₆₀ possui uma resistência inferior ao o solo arenoso puro para baixas e médias deformações, se igualando e tornando superior ao mesmo para uma deformação de 16%, e se mantendo constante com o aumento desta.

A mistura CV₄₀A₆₀ foi submetida a uma tensão de 200 kPa, e em comparação à CF₄₀A₆₀ submetida a tensão confinante de 150 kPa, esta possui uma menor resistência até 14% de deformação, ultrapassando ambos os materiais, areia pura e mistura CF₄₀A₆₀, neste ponto e se mantendo crescente. Observa-se a ocorrência de contração para ambas as misturas, porém a CV₄₀A₆₀ possui uma variação de volume bem mais expressiva do que a mistura com cinza de fundo, e ambas apresentam uma crescente deformação volumétrica com o aumento da deformação axial.

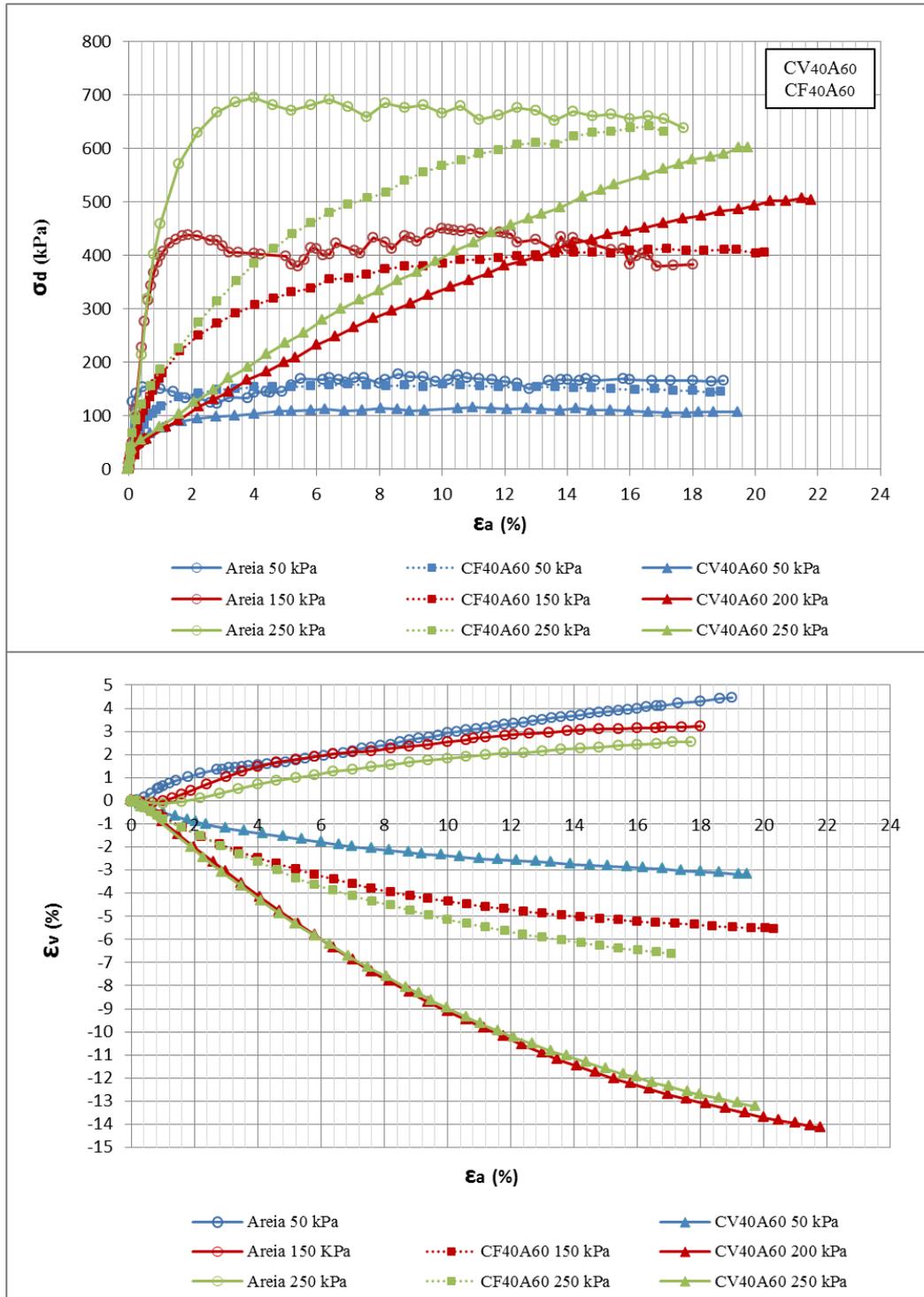


Figura 4.15 – Curvas tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial das amostras A_{100} e misturas $CF_{40}A_{60}$ e $CV_{40}A_{60}$ em ensaios triaxiais.

Para a tensão confinante de 250 kPa observa-se um comportamento semelhante ao descrito quando aplicada a tensão de 150 kPa. Porém nesta tensão o comportamento da mistura $CF_{40}A_{60}$ tende a se igualar ao solo puro para deformações mais elevadas, acima das atingidas no ensaio realizado. Para baixas e médias deformações, a resistência do solo se apresentou maior em comparação

com ambas as misturas. Em relação à mistura $CV_{40}A_{60}$, a resistência obtida se encontra significativamente inferior aos outros materiais para a faixa de deformação axial atingida no ensaio. Porém, a mistura apresenta o mesmo comportamento que quando submetido a 150 kPa, tendenciando ultrapassar ambos os materiais, areia pura e mistura $CF_{40}A_{60}$, para uma maior deformação axial. Também é observada a ocorrência de contração para ambas as misturas, sendo que a $CV_{40}A_{60}$ apresenta uma variação de volume bem mais expressiva.

Dessa forma, pode-se dizer que o comportamento resistente da mistura $CV_{40}A_{60}$ se apresenta inferior tanto ao solo puro como à mistura com cinza de fundo na mesma proporção para baixas e médias deformações axiais, apresentando uma maior resistência à maiores deformações, e que tende a aumentar e ultrapassar o valor dos outros materiais. A mistura $CF_{40}A_{60}$ se apresenta com um comportamento mais semelhante ao solo puro, sendo um pouco inferior a pequenas e médias deformações axiais e se igualando a este a deformações axiais mais altas quando aplicadas altas tensões confinantes. À baixa tensão a mistura se apresentou praticamente igual ao solo puro. Apesar da mistura com cinza volante ultrapassar a resistência do solo puro e mistura com cinza de fundo à maiores deformações, esta apresenta uma variação volumétrica significativamente maior que os outros materiais.

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

Na Figura 4.16 se apresentam as envoltórias e parâmetros de resistência ao cisalhamento para o solo arenoso puro e misturas $CV_{30}A_{70}$ e $CF_{30}A_{70}$. As envoltórias estão plotadas no espaço $p':q$.

Devido aos diferentes comportamentos apresentados pelos materiais à medida que a deformação axial aumenta, e devido à ausência de uma resistência de pico bem definida, as envoltórias de resistência foram feitas com a resistência apresentada pelos materiais a uma mesma deformação axial de 17%, visto que seus comportamentos tendem à similaridade a maiores deformações e foi possível chegar a este valor em todos os ensaios.

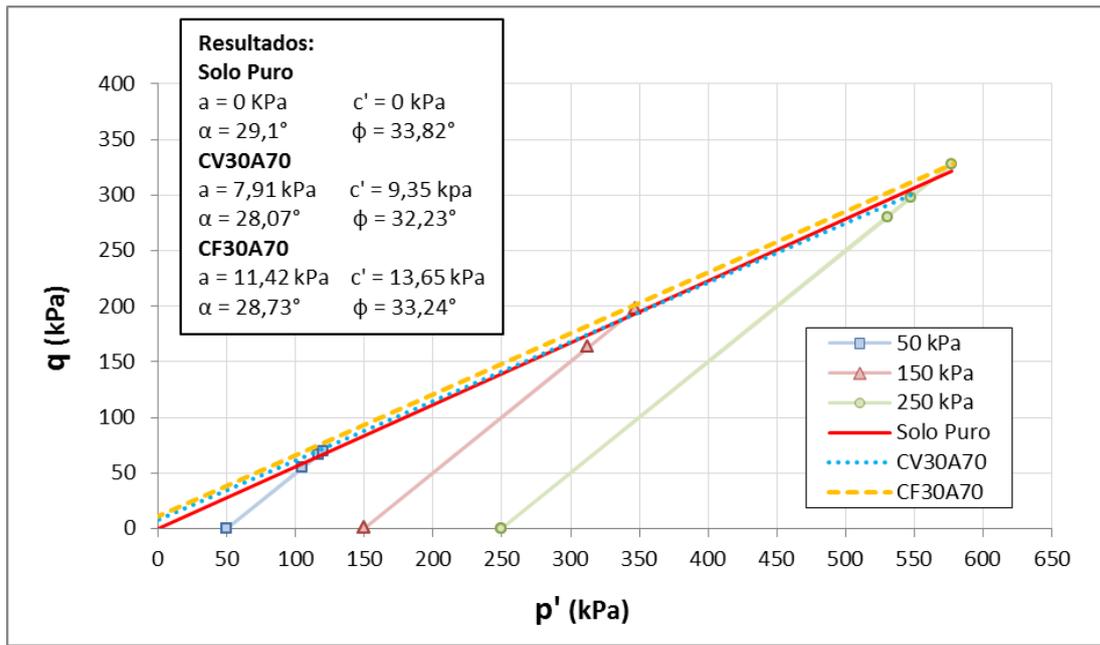


Figura 4.16 – Comparação entre as envoltórias de resistência do Solo Puro (A_{100}) e misturas CV_{30A70} e CF_{30A70} .

A partir das envoltórias apresentadas, nota-se que a inserção de 30% tanto de cinza de fundo, como da cinza volante, geraram um aumento na coesão do material, e mantiveram o ângulo de atrito muito próximo ao valor do solo puro.

Comparando-se as misturas com cinza volante e de fundo, observa-se que a mistura CF_{30A70} proporcionou um aumento maior da coesão, igual a 13,65 kPa, e uma queda do valor do ângulo de atrito somente em casas decimais, apresentando-se melhor do que a mistura com cinza volante na mesma proporção, que ocasionou uma queda maior no parâmetro e gerou uma coesão de 9,35 kPa.

Vale ressaltar que a coesão apresentada pelos materiais se trata de uma coesão aparente, e não real que ocorre em geral devido a atrações elétricas entre partículas. Esta coesão aparente constitui uma parcela da resistência que pode estar relacionada a possíveis bolhas de ar remanescentes no corpo de prova que, conseqüentemente, não estaria 100% saturado (parâmetro $B=1$), condição que de fato foi difícil de se atingir no ensaio, como apresentado anteriormente.

Desta maneira, pode-se dizer que tanto a mistura com 30% de cinza de fundo, como com cinza volante, apesar de apresentarem variações em seus comportamentos quando comparados com o solo puro, não causaram variações significativas nos parâmetros de resistência do mesmo, podendo ser aplicados em mistura com o solo.

Na Figura 4.17 se apresentam as envoltórias e parâmetros de resistência ao cisalhamento para o solo arenoso puro e misturas CV₄₀A₆₀ e CF₄₀A₆₀.

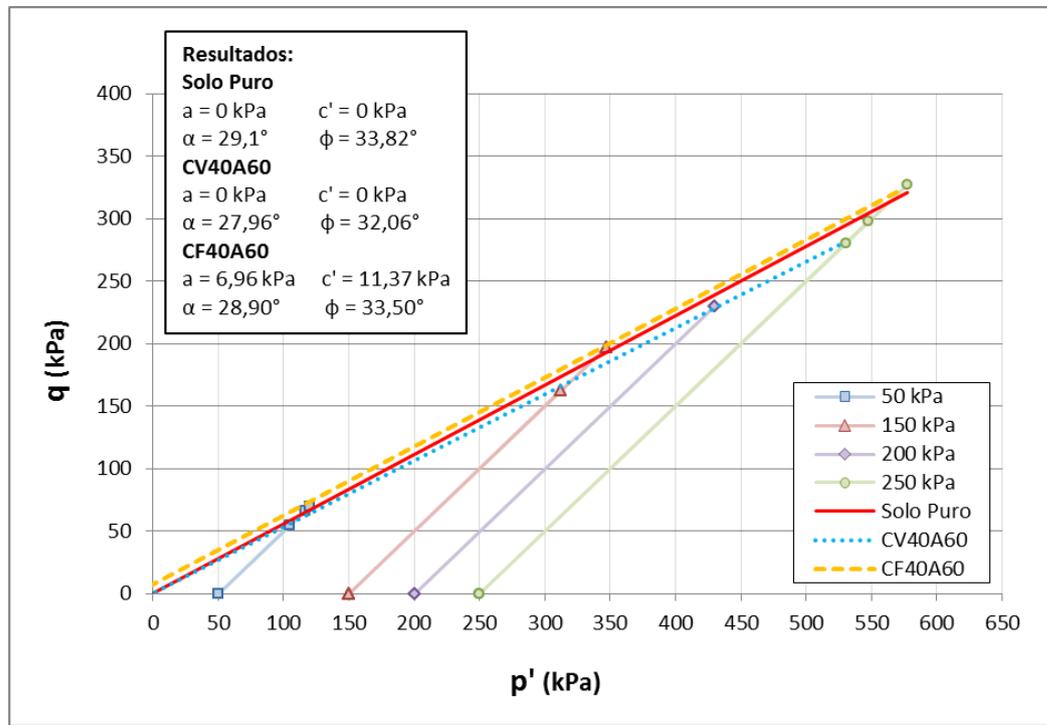


Figura 4.17 – Comparação entre as envoltórias de resistência do Solo Puro (A₁₀₀) e misturas CV₄₀A₆₀ e CF₄₀A₆₀.

Assim como para as misturas com 30%, nota-se que a inserção de 40% de cinza de fundo gerou um aumento na coesão do material, e manteve o ângulo de atrito muito próximo ao valor do solo puro, decrescendo somente de alguns décimos. A mistura CV₄₀A₆₀ neste caso apresentou coesão igual a zero e uma maior queda do ângulo de atrito quando comparada com o solo puro e mistura CF₄₀A₆₀. Portanto, observa-se que a mistura CF₄₀A₆₀ apresenta-se melhor do que a mistura com cinza volante na mesma proporção. Porém, a diferença entre ambas também não foi significativamente grande, de forma que a mistura com cinza volante também se mostra aplicável.

Desta forma, pode-se afirmar que tanto a mistura com 40% de cinza de fundo, como com cinza volante, poderiam ser aplicados em mistura com o solo, uma vez que em seus parâmetros de resistência não foram alterados significativamente em relação ao solo puro.

4.2.1.3 Influência do teor de cinza

O comportamento de tensão desviadora (σ_d) e variação volumétrica (ε_v) versus deformação axial (ε_a), correspondentes aos ensaios do tipo CID, para o solo arenoso puro (A_{100}) e misturas com 30% e 40% de cinza volante (CV_{30A70} , CV_{40A60}) são apresentados e comparados na Figura 4.18.

Nota-se que para a tensão confinante de 50 kPa, tanto a mistura com 30%, como a com 40% de cinza volante, apresentam um comportamento pior do que o solo arenoso puro. Entre 0 e 2% de deformação axial todos os materiais alcançam uma resistência que se mantém aproximadamente constante até atingir-se maiores deformações, sendo que nesta faixa, o solo puro apresenta uma maior resistência. Observa-se que a mistura CV_{30A70} atinge uma resistência maior que a mistura com 40% de cinza volante quando submetida a este nível de tensão. Através do gráfico da deformação volumétrica *versus* deformação axial, nota-se que a areia pura sofre um aumento contínuo de volume durante o cisalhamento, enquanto ambas as misturas com cinza volante sofrem uma diminuição semelhante de seu volume, sendo que a amostra CV_{30A70} apresenta uma deformação volumétrica um pouco maior que a CV_{40A70} .

Para a tensão confinante de 150 kPa, o solo arenoso apresenta uma resistência de pico à aproximadamente 2% de deformação axial, depois se mantendo constante com o aumento desta. A mistura CV_{40A60} , ensaiada à tensão confinante de 200 kPa, se apresenta inferior à mistura CV_{30A70} , ensaiada na 150 kPa, até uma deformação de aproximadamente 10,4%, onde as resistências das misturas se igualam e os valores de resistência da CV_{40A60} continuam a crescer e também ultrapassam o solo arenoso puro a 14% de deformação axial, se tornando superior a ambos os materiais. Inicialmente a mistura CV_{30A70} apresenta valores de resistência menores do que o solo puro, se igualando a este a partir de maiores deformações axiais, de aproximadamente 16%, e se mantendo constante e inferior à mistura CV_{40A60} . Enquanto o solo arenoso apresenta um aumento de volume contínuo durante o cisalhamento, ambas as misturas apresentam uma diminuição de volume, sendo que a mistura CV_{40A60} apresentou uma deformação volumétrica significativamente maior do que a mistura CV_{30A70} .

Para a tensão confinante de 250 kPa o solo puro apresentou valores de resistência sempre superiores a ambas as misturas com cinza volante, sendo que

neste caso a mistura com 30% se manteve todo o tempo também superior à mistura com 40%. Ambas as misturas igualam o valor da resistência em aproximadamente 20% de deformação axial, porém ainda com valor inferior ao solo puro.

Em relação à variação de volume, nota-se que a areia pura também sofre dilatação para a tensão confinante de 250 kPa, enquanto que ambas as misturas nesse caso também sofrem uma diminuição de volume mais acentuada, e a mistura com 40% apresenta deformação volumétrica maior que a mistura com 30% de cinza volante.

Assim, pode-se dizer que de forma geral, o comportamento do solo puro foi superior a ambas as misturas com cinza volante para baixos e médios valores de deformação axial, tanto para baixas como altas tensões confinantes. Neste caso, ensaios como o *ring shear*, que possibilitam a análise dos resultados a deformações axiais maiores, seriam importantes, uma vez que se observa a tendência das resistências residuais se igualarem ou ultrapassarem os valores do solo puro. Comparando-se ambas as misturas, de maneira geral observa-se que a mistura CV₄₀A₆₀ se apresenta inferior à mistura com 30% de cinza volante, uma vez que esta possui valores de resistência maiores para baixas e médias deformações, podendo se igualar à CV₄₀A₆₀ a maiores deformações axiais e apresenta menores deformações volumétricas durante o cisalhamento.

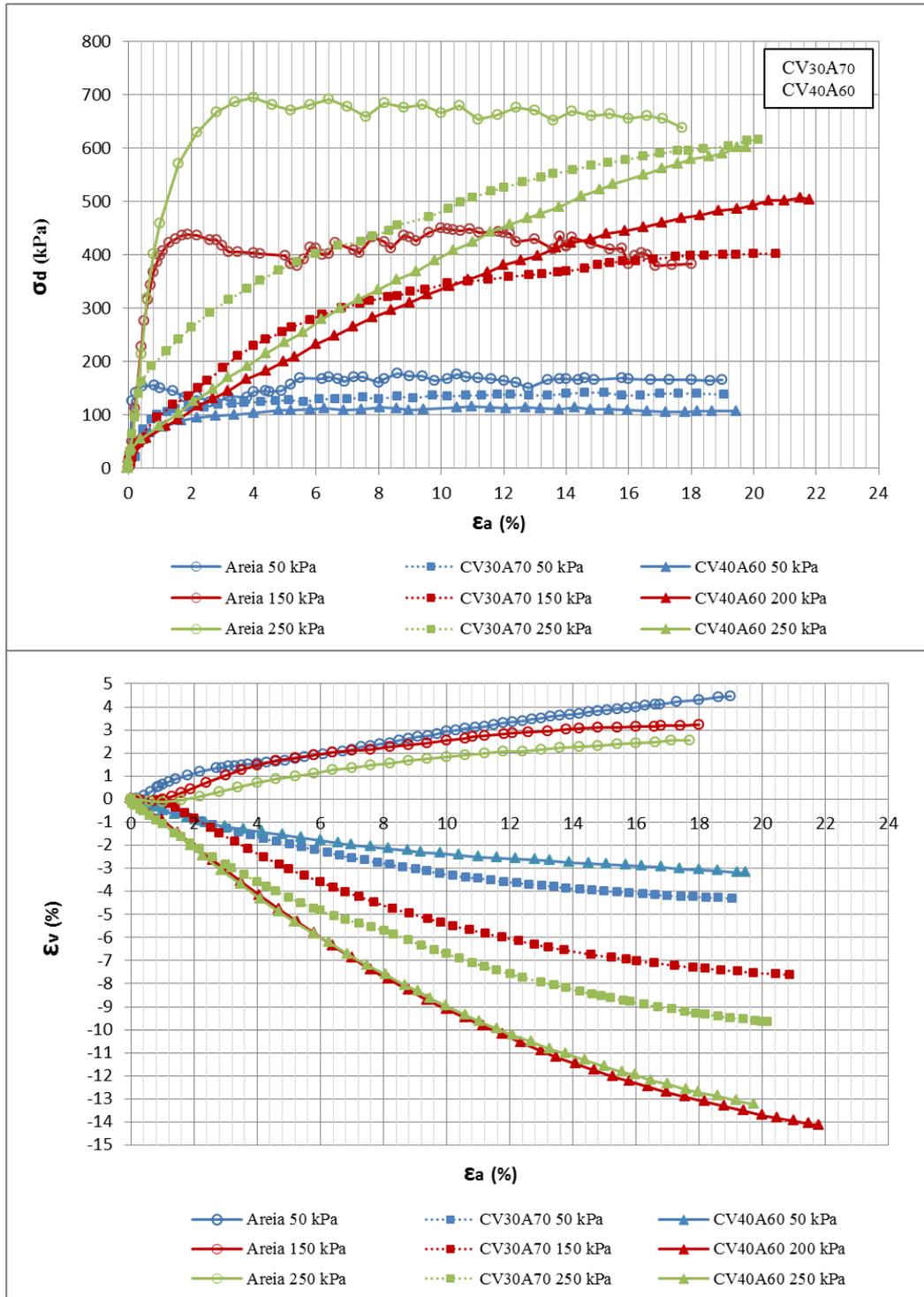


Figura 4.18 – Curvas tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial das amostras A_{100} e misturas $CV_{30}A_{70}$ e $CV_{40}A_{60}$ em ensaios triaxiais.

O comportamento de tensão desviadora (σ_d) e variação volumétrica (ϵ_v) versus deformação axial (ϵ_a), correspondentes aos ensaios do tipo CID, para o solo arenoso puro (A_{100}) e misturas com 30% e 40% de cinza de fundo ($CF_{30}A_{70}$, $CF_{40}A_{60}$) são apresentados e comparados na Figura 4.19.

Nota-se que para a tensão confinante de 50 kPa, tanto a mistura com 30%, como a com 40% de cinza de fundo, apresentam um comportamento muito similar ao solo arenoso puro, sendo a resistência apresentada pela mistura CF₄₀A₆₀ somente um pouco inferior aos outros materiais. Entre 0 e 2% de deformação axial todos os materiais alcançam uma resistência que se mantém aproximadamente constante até atingir-se maiores deformações. Entre 0 e 6% de deformação axial observa-se que a mistura CF₃₀A₇₀ apresenta uma maior resistência, mas não muito significativa. Através do gráfico da deformação volumétrica *versus* deformação axial, nota-se que tanto a areia pura como a mistura CF₃₀A₇₀ sofrem um aumento contínuo de volume durante o cisalhamento, sendo que a mistura com cinza apresenta uma deformação volumétrica menor que o solo puro. Não foi possível a determinação do comportamento da deformação volumétrica da mistura CF₄₀A₆₀ devido a problemas na aquisição dos dados.

Para a tensão confinante de 150 kPa, o solo arenoso apresenta uma resistência de pico a aproximadamente 2% de deformação axial, depois se mantendo constante com o aumento desta. A mistura CF₄₀A₆₀ se apresenta inferior à mistura CF₃₀A₇₀ até uma deformação de aproximadamente 16%, onde suas resistências se igualam e mantêm aproximadamente constante e iguais também ao solo puro. A mistura CF₃₀A₇₀ apresenta um comportamento mais semelhante ao solo puro nesta tensão que a mistura CF₄₀A₆₀, se igualando aos valores do solo a deformações axiais ainda baixas, de aproximadamente 5%, enquanto a mistura CF₄₀A₆₀ também a deformações de 16%. A este nível de tensão, ambas as misturas sofrem uma diminuição de volume do cisalhamento, sendo que a deformação volumétrica para a mistura com 40% de cinza é significativamente maior que para a mistura com 30%, que atinge um valor constante de deformação volumétrica a 6% de deformação axial. O solo puro apresenta uma expansão, e também valores de deformação volumétrica mais elevados que a mistura CF₃₀A₇₀.

Para a tensão confinante de 250 kPa o solo puro apresentou valores de resistência superiores a ambas as misturas com cinza de fundo para baixas e médias deformações axiais, e a mistura com 30% de cinza se apresentou superior à mistura com 40%. À maiores deformações ambas as misturas e o solo puro tendem igualar o comportamento e apresentar mesma resistência. Em relação à variação de volume, nota-se que a areia pura também sofre dilatação para a tensão confinante de 250 kPa, enquanto que ambas as misturas nesse caso também

sofrem uma diminuição de volume mais acentuada, sendo a deformação volumétrica apresentada pela mistura CF₃₀A₇₀ maior que a mistura com 40%, se igualando à mesma a deformações axiais de aproximadamente 16%.

Assim, pode-se dizer que o comportamento de ambas as misturas com cinza de fundo se apresenta semelhante entre si, sendo inferiores ao solo puro a pequenas deformações axiais e se igualando a este a deformações axiais médias e altas quando submetidos a tensões confinantes mais elevadas. A baixas tensões, a mistura com 30% se apresentou bem semelhante ao solo puro e um pouco superior à mistura com 40%. Em geral, a mistura com 40% apresentou maiores deformações volumétricas durante os diferentes carregamentos. Todos os materiais atingem uma resistência residual bastante semelhante.

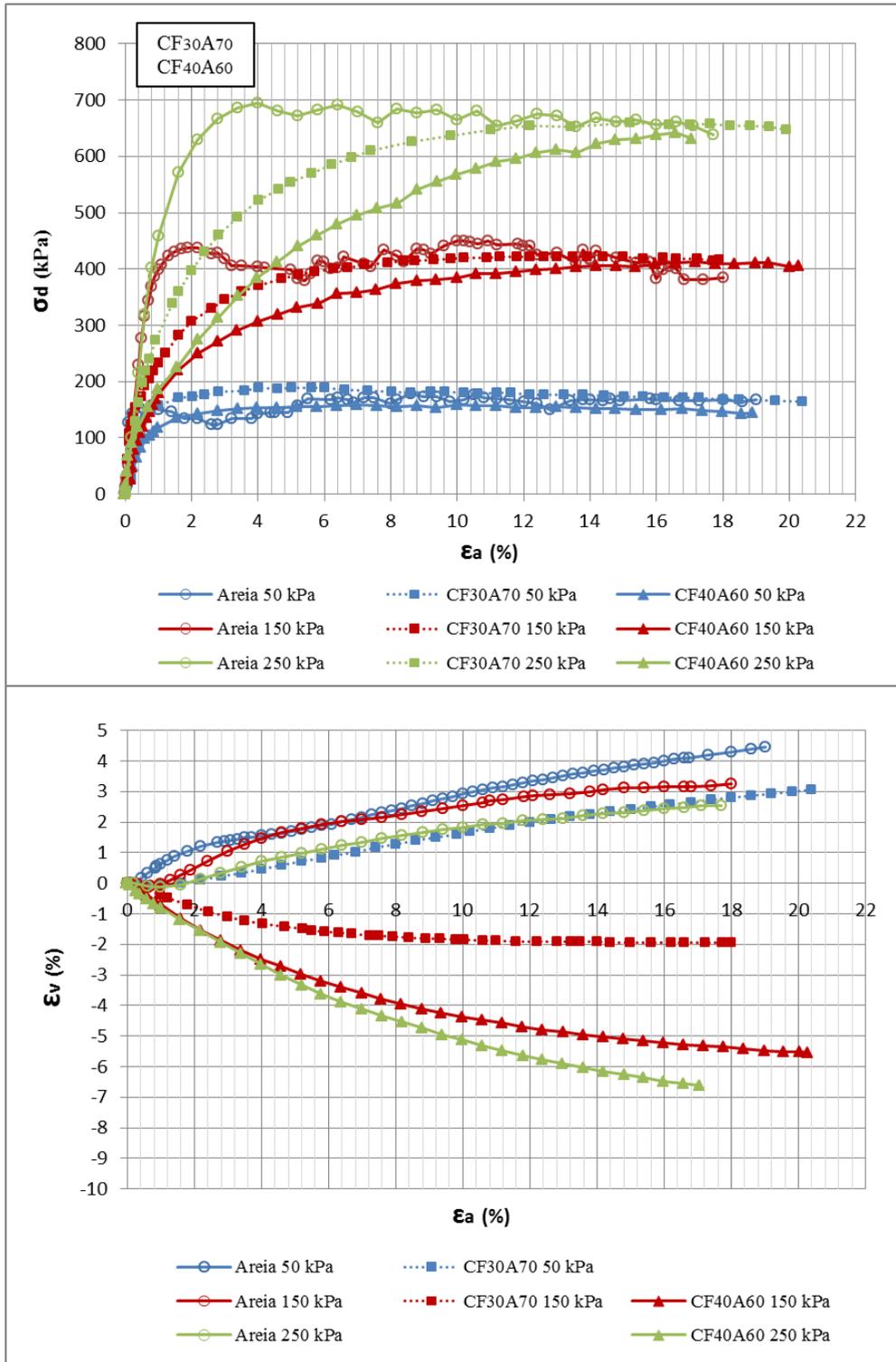


Figura 4.19 – Curvas tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial das amostras A₁₀₀ e misturas CF₃₀A₇₀ e CF₄₀A₆₀ em ensaios triaxiais.

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

Na Figura 4.20 se apresentam as envoltórias e parâmetros de resistência ao cisalhamento para o solo arenoso puro e misturas CV₃₀A₇₀ e CV₄₀A₆₀. As envoltórias estão plotadas no espaço $p':q$.

Assim como apresentado anteriormente, as envoltórias de resistência foram feitas baseadas na resistência apresentada pelos materiais a uma mesma deformação axial de 17%.

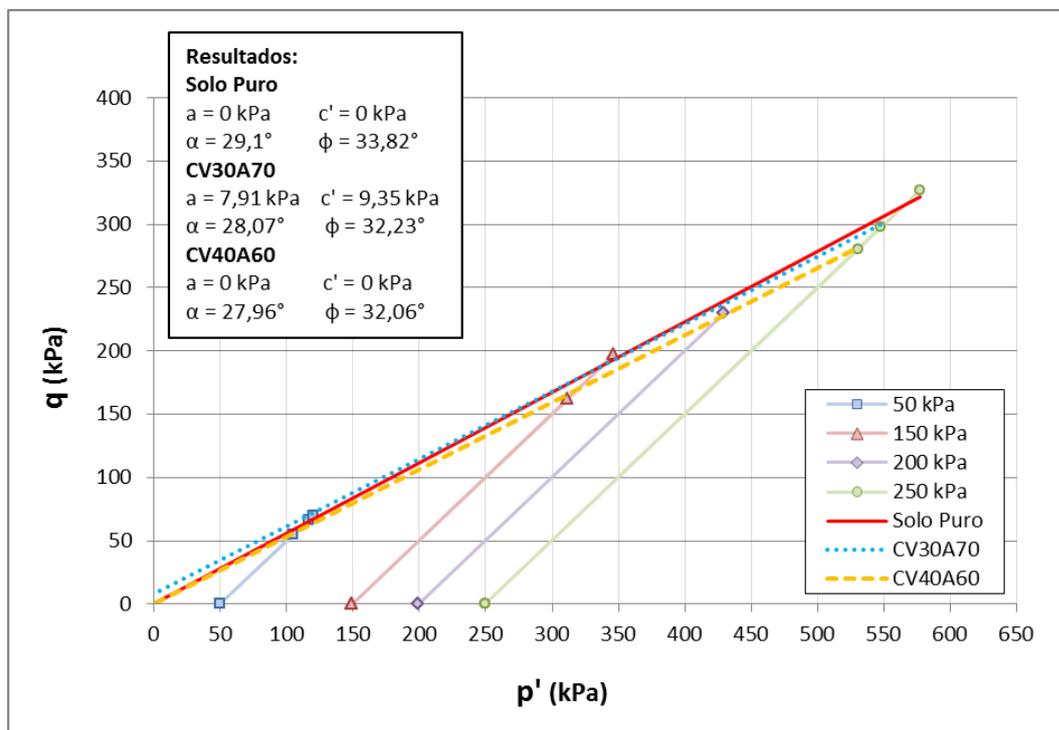


Figura 4.20 – Comparação entre as envoltórias de resistência do Solo Puro (A₁₀₀) e misturas CV₃₀A₇₀ e CV₄₀A₆₀.

A partir das envoltórias apresentadas, nota-se que as misturas tanto com 30% como 40% de cinza volante, mantiveram o ângulo de atrito bem próximo ao valor do solo puro, porém diminuindo este em mais ou menos 1,5 – 1,8°. Observa-se que a mistura CV₃₀A₇₀ apresenta um valor de ângulo de atrito um pouco superior à mistura com 40%, e ocasionou um aumento na coesão do material, que como apresentado anteriormente, se trata de uma coesão aparente.

Desta maneira, pode-se dizer que tanto a mistura com 30%, como 40% de cinza volante, não causaram variações muito significativas dos parâmetros de

resistência do solo, podendo serem utilizados em substituição ao mesmo. Ainda, a mistura CV₃₀A₇₀ se apresenta um pouco superior à mistura CV₄₀A₆₀.

Na Figura 4.21 se apresentam as envoltórias e parâmetros de resistência ao cisalhamento para o solo arenoso puro e misturas CF₃₀A₇₀ e CF₄₀A₆₀.

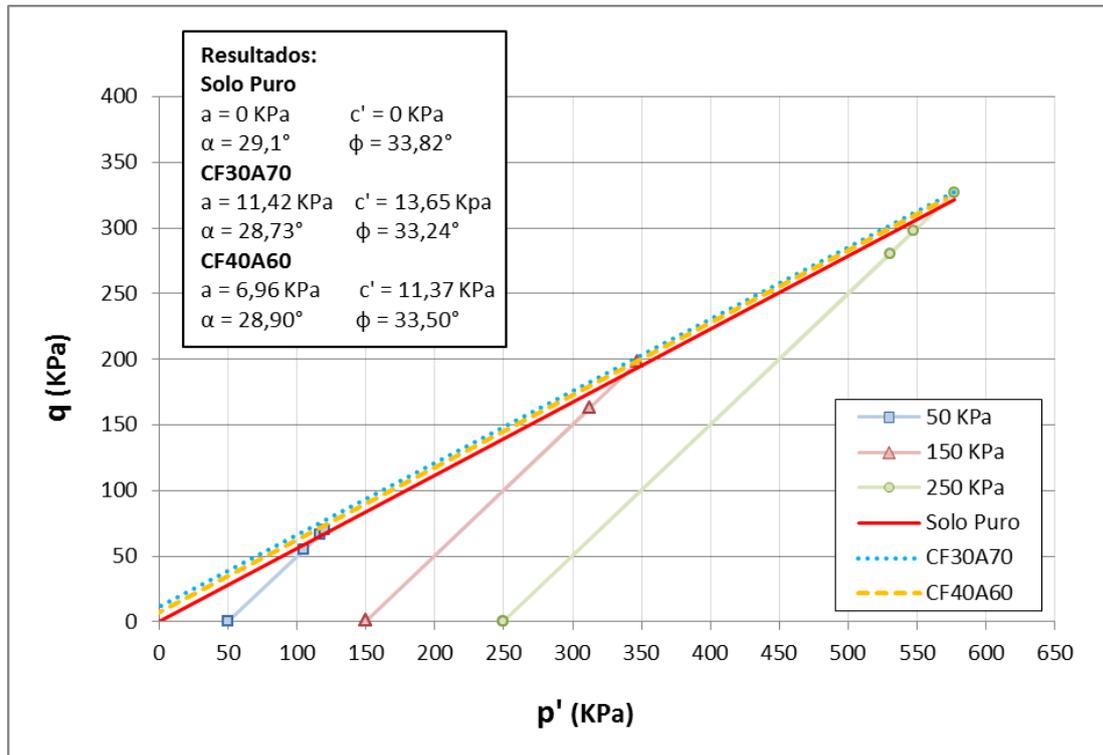


Figura 4.21 – Comparação entre as envoltórias de resistência do Solo Puro (A₁₀₀) e misturas CF₃₀A₇₀ e CF₄₀A₆₀.

Pode-se observar que as misturas, tanto com 30% como 40% de cinza de fundo, mantiveram o ângulo de atrito quase iguais ao solo puro, variando-se deste somente em alguns décimos. Observa-se que ambas as misturas apresentaram um aumento no valor da coesão, sendo que a mistura com 30% de CF apresentou um maior valor que a mistura com 40% de CF. A diferença entre o ângulo de atrito de ambas as misturas não se apresenta significativa. Vale ressaltar novamente que este valor de coesão se trata de uma coesão aparente, podendo-se então considerar ambas as misturas com parâmetros de resistência praticamente iguais.

Os resultados próximos obtidos para o solo arenoso puro e misturas com cinza de fundo em ambas as porcentagens, podem estar relacionados ao fato da granulometria destes materiais se apresentarem semelhantes. A inserção da cinza

de fundo ao solo arenoso proporcionou um material com uma granulometria intermediária entre cinza de fundo e areia, e que se mostra viável a ser utilizado.

Becquart *et al* (2008) estudou a cinza de fundo de RSU individualmente, realizando, dentre outros, ensaios triaxiais. Os autores afirmam que a cinza de fundo revela um comportamento mecânico similar a materiais densos convencionais (areias, materiais granulares não cimentados) e dependente da pressão média aplicada, característica do comportamento mecânico de meios granulares. Destaca-se que a cinza de fundo apresenta algumas características mecânicas como: elevada rigidez, baixo índice de compressibilidade, e elevado ângulo de atrito, que estaria relacionado principalmente ao embricamento dos grãos.

4.2.1.4 Influência do tempo de cura para as misturas com cal

O comportamento de tensão desviadora (σ_d) e variação volumétrica (ε_v) versus deformação axial (ε_a), correspondentes aos ensaios do tipo CID, para o solo arenoso puro (A_{100}) e misturas com cinza volante e cal ($CV_{27}Cal_3A_{70}$) nos tempos de cura de 0, 60 e 90 dias são apresentados e comparados na Figura 4.22.

Nota-se que para a tensão confinante de 50 kPa, a mistura $CV_{27}Cal_3A_{70_T0}$, com zero dias de cura, se apresenta com uma resistência inferior ao solo puro e misturas nos tempos de cura de 60 e 90 dias. O solo puro se apresenta superior a todas as misturas para este nível de tensão, e o comportamento do material a 60 e 90 dias de cura se apresenta praticamente o mesmo. Nenhum dos materiais apresenta uma resistência de pico bem definida, sendo a resistência alcançada em pequenas deformações aproximadamente iguais às alcançadas a maiores deformações axiais. Através do gráfico da deformação volumétrica *versus* deformação axial, nota-se que enquanto a areia sofre um aumento de volume durante o cisalhamento, todas as misturas sofrem uma diminuição deste. A mistura $CV_{27}Cal_3A_{70_T0}$ apresenta uma deformação volumétrica significativamente maior que as misturas à 60 e 90 dias de cura. A mistura $CV_{27}Cal_3A_{70_T60}$ apresenta uma deformação volumétrica muito pequena, que tende ao seu estado inicial quando deformações axiais maiores são atingidas.

Para a tensão confinante de 150 kPa as misturas com cura de 0 e 90 dias apresentam um comportamento significativamente inferior ao solo puro e mistura

CV₂₇Cal₃A₇₀_T60, e um comportamento semelhante entre si. A resistência nestes tempos de cura aumenta continuamente, mas mesmo a maiores deformações axiais não chegam a atingir o mesmo valor do solo ou mistura a 60 dias de cura. A mistura CV₂₇Cal₃A₇₀_T60 apresenta um pior comportamento quando comparado ao solo puro para deformações axiais baixas e médias, se igualando ao mesmo para a deformação de aproximadamente 16%. Neste nível de tensão confinante, o solo arenoso apresenta uma expansão, enquanto as misturas para todos os tempos de cura apresentam uma diminuição de volume semelhante. A mistura CV₂₇Cal₃A₇₀_T60 é a que apresenta menores níveis de deformação volumétrica durante o cisalhamento, enquanto a mistura com 0 dias de cura apresenta maiores deformações.

Para a tensão confinante de 250 kPa observa-se um comportamento semelhante ao descrito quando aplicada a tensão de 150 kPa. As misturas com 0 e 90 dias de cura apresentam comportamento semelhante e resistência significativamente inferior ao solo puro e mistura com 60 dias, mesmo a maiores deformações axiais. A mistura CV₂₇Cal₃A₇₀_T60 também apresenta um comportamento inferior ao solo puro, porém seus valores de resistência se mantêm crescente e se igualam ao solo para deformações axiais de aproximadamente 16%. Para este nível de tensão confinante, as deformações volumétricas dos materiais são mais acentuadas que a 150 kPa, porém o comportamento das misturas são similares às descritas para este nível de tensão.

Dessa forma, pode-se dizer que o comportamento da mistura CV₂₇Cal₃A₇₀_T60, com 60 dias de cura, se apresenta significativamente melhor que as misturas com cura de 0 e 90 dias. A pequenas e médias deformações o material possui uma menor resistência do que a apresentada pelo solo puro, porém a maiores deformações axiais este se iguala ou se mostra superior ao solo puro. Quando comparado com as misturas de 0 e 90 dias de cura, observa-se que a mistura com 60 dias sofre menores deformações volumétricas, principalmente quando submetido a baixas tensões confinantes.

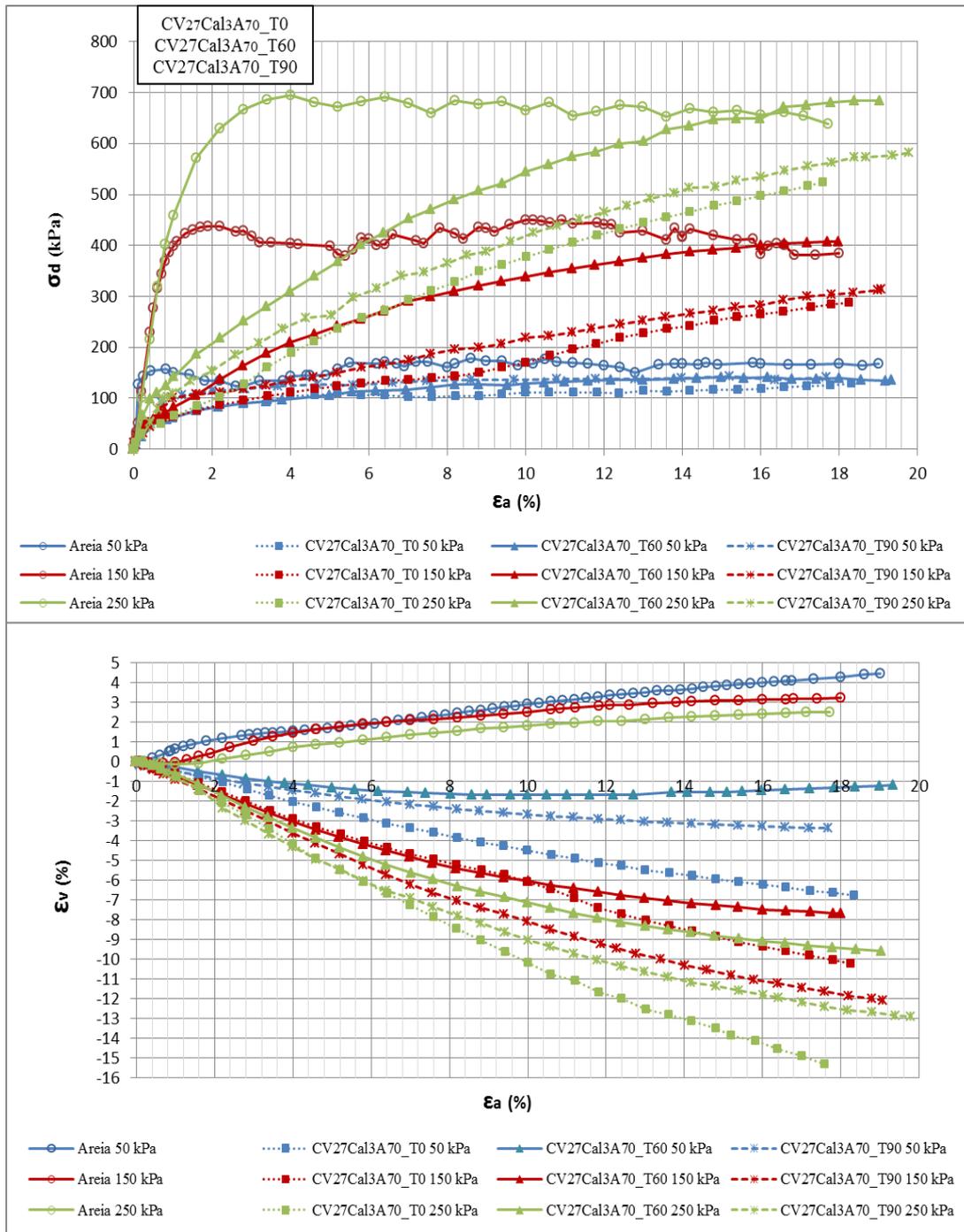


Figura 4.22 – Curvas tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial das amostras A_{100} e mistura $CV_{27}Cal_3A_{70}$ nos tempos de cura de 0, 60 e 90 dias, em ensaios triaxiais.

Envoltórias e Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento comparando a influência do tempo de cura para as misturas com cal.

Na Figura 4.23 se apresentam as envoltórias e parâmetros de resistência ao cisalhamento para o solo arenoso puro e mistura $CV_{27}Cal_3A_{70}$ a 0, 60 e 90 dias de cura. As envoltórias estão plotadas no espaço $p':q$.

Assim como apresentado anteriormente, as envoltórias de resistência foram feitas baseadas na resistência apresentada pelos materiais a uma mesma deformação axial de 17%.

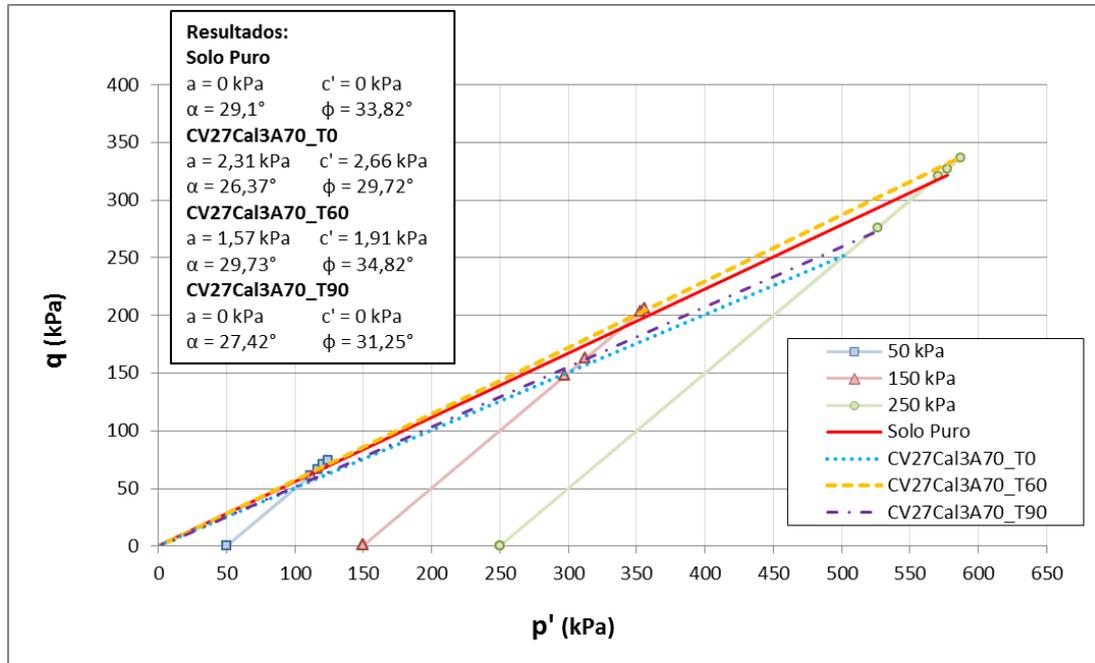


Figura 4.23 – Comparação entre as envoltórias de resistência do Solo Puro (A_{100}) e misturas $CV_{27}Cal_3A_{70}$ com tempos de cura de 0, 60 e 90 dias.

Pode-se observar que as misturas $CV_{27}Cal_3A_{70_T0}$ e $CV_{27}Cal_3A_{70_T90}$ apresentam suas envoltórias abaixo do solo puro, e parâmetros de resistência inferiores ao mesmo, sendo possível observar uma queda de aproximadamente 4° e $2,5^\circ$, respectivamente, no ângulo de atrito do material. A mistura a 0 dias de cura apresentou um acréscimo da coesão, igual a 2,66 kPa, já a mistura a 90 dias de cura apresenta a coesão nula, igual ao solo puro.

A mistura $CV_{27}Cal_3A_{70_T60}$ foi a que apresentou melhores resultados, com parâmetros de resistência sendo ainda superiores ao solo puro. A mistura apresentou o ganho de 1° no ângulo de atrito e um acréscimo de coesão, igual a 1,91 kPa.

Porém, ainda se faz necessária a realização de uma maior quantidade de ensaios, também com outros tempos de cura para que se possa ter um melhor conhecimento da influência deste no comportamento das misturas. Devido ao fato dos parâmetros de resistência não terem sofrido alterações significativas, pode-se dizer que não se tem como definir um tempo de cura ideal.

4.2.1.5 Influência do método de moldagem do corpo de prova para ensaio com cura.

Na Figura 4.24 apresenta-se o comportamento da tensão desviadora (σ_d) e variação volumétrica (ε_v) versus deformação axial (ε_a), correspondentes aos ensaios do tipo CID, para a mistura CV₂₇Cal₃A₇₀_T60 e CV₂₇Cal₃A₇₀_T60_PM, que foi realizado com o corpo de prova pré-moldado, a fim de se avaliar a influência do método de moldagem e cura dos corpos de prova.

Nota-se que para a tensão confinante de 50 kPa, o solo puro apresenta resistências superiores a ambas as misturas, mas a CV₂₇Cal₃A₇₀_T60_PM, realizada com corpo de prova pré-moldado, apresenta um comportamento pior do que a mistura no mesmo tempo de cura para o Método 1 de moldagem. Nenhum dos materiais apresenta uma resistência de pico bem definida, sendo a resistência alcançada em pequenas deformações aproximadamente iguais às alcançadas a maiores deformações axiais. Através do gráfico da deformação volumétrica *versus* deformação axial, nota-se que enquanto a areia sofre um aumento de volume durante o cisalhamento, todas as misturas sofrem uma diminuição deste, sendo que a mistura pré-moldada apresenta deformações volumétricas significativamente maiores que a mistura CV₂₇Cal₃A₇₀_T60. Esta, apresenta uma deformação volumétrica muito pequena, que tende ao seu estado inicial quando deformações axiais maiores são atingidas.

Para a tensão confinante de 150 kPa ambas as misturas apresentam um comportamento inferior ao solo puro para baixas e médias deformações axiais se igualando ao mesmo em uma deformação de aproximadamente 16%. Neste ponto, a mistura CV₂₇Cal₃A₇₀_T60 passa a manter sua resistência constante, enquanto a CV₂₇Cal₃A₇₀_T60_PM ultrapassa o solo mostrando uma tendência de crescimento. Neste nível de tensão não se observa uma diferença muito acentuada entre o comportamento das misturas com e sem corpo de prova pré-moldado para cura. Porém a mistura CV₂₇Cal₃A₇₀_T60_PM apresenta uma resistência um pouco maior. Ambas as misturas apresentaram uma contração durante o cisalhamento, sendo que se observa na mistura CV₂₇Cal₃A₇₀_T60 uma deformação volumétrica mais acentuada que a mistura com pré-molde para mesmos níveis de deformação axial.

Para a tensão confinante de 250 kPa observa-se que as misturas CV₂₇Cal₃A₇₀_T60 e CV₂₇Cal₃A₇₀_T60_PM apresentam comportamentos semelhantes entre si, porém com a mistura com corpo de prova pré-moldado apresentando uma resistência um pouco maior que a outra mistura e se igualando ao solo puro para deformações axiais de aproximadamente 13%, mostrando uma tendência de aumento com o crescimento da deformação axial. A mistura CV₂₇Cal₃A₇₀_T60 se iguala ao solo para deformações axiais de aproximadamente 16%, tendendo a ficar com valores de resistência constantes a partir daí. Para este nível de tensão confinante, as deformações volumétricas de ambas as misturas são praticamente iguais.

Dessa forma, pode-se dizer que o método de moldagem para cura de 60 dias do material não apresentou tanta influência nos resultados, como se esperava. Porém, em aspectos gerais, a mistura CV₂₇Cal₃A₇₀_T60_PM de fato apresenta maiores valores de resistência se igualando e ultrapassando valores do solo puro para menores deformações axiais que as apresentadas pela mistura CV₂₇Cal₃A₇₀_T60. Assim, ambos os métodos apresentaram resultados satisfatórios, contudo se faz necessária a realização de mais ensaios com este aspecto comparativo.

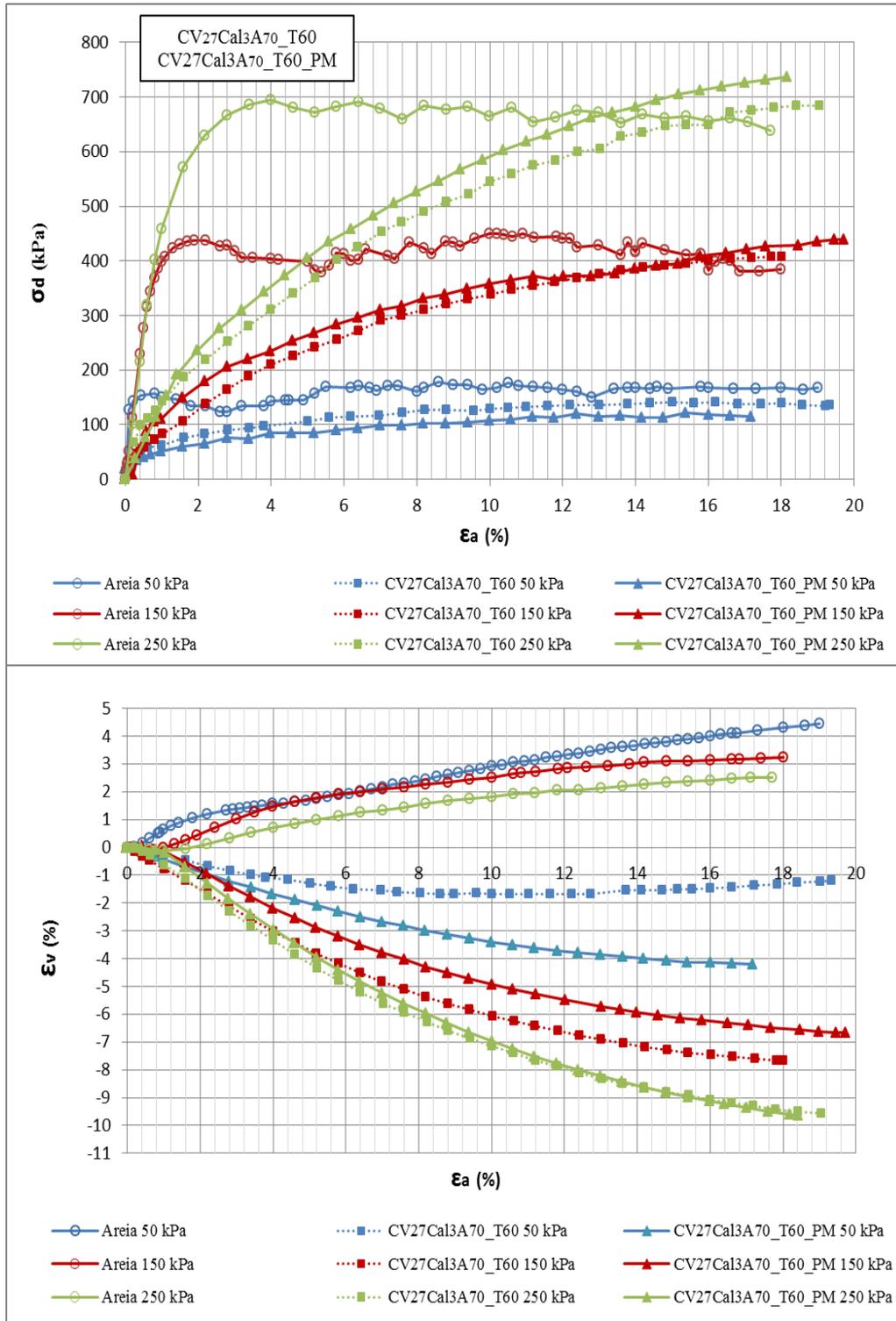


Figura 4.24 – Curvas tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial das amostras A₁₀₀ e misturas CV₂₇Cal₃A₇₀_T60 e CV₂₇Cal₃A₇₀_T60_PM, em ensaios triaxiais.

Envoltórias e Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento comparando a influência do método de moldagem para os ensaios com cura de 60 dias.

Na Figura 4.25 se apresentam as envoltórias e parâmetros de resistência ao cisalhamento para o solo arenoso puro e mistura CV₂₇Cal₃A₇₀ a 60 dias de cura comparando-se o método de moldagem do corpo de prova. As envoltórias estão plotadas no espaço $p':q$.

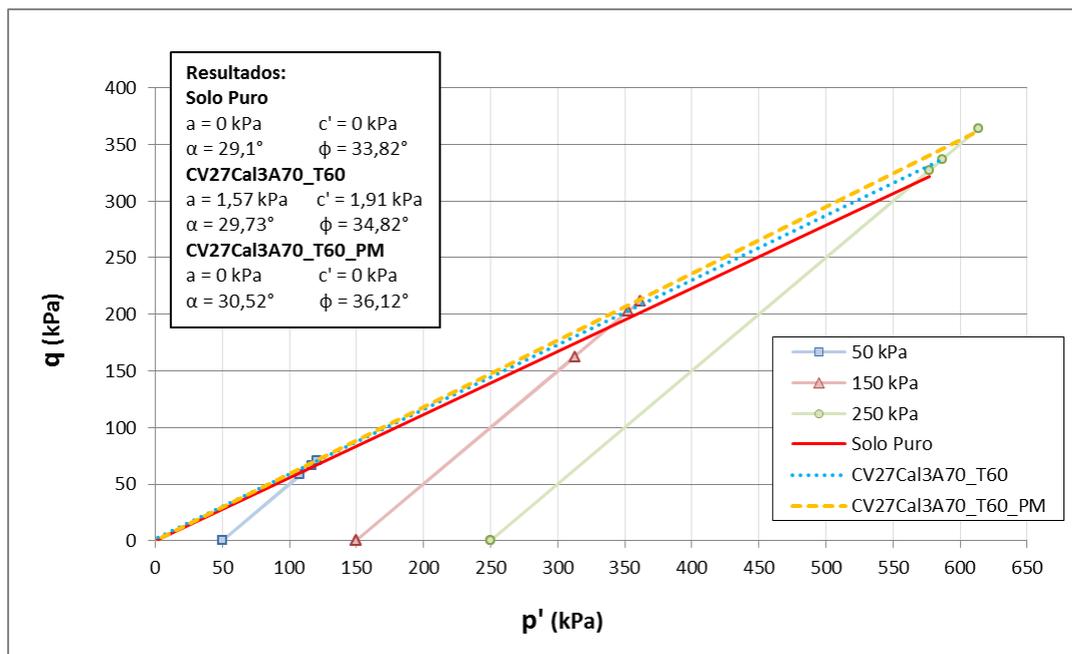


Figura 4.25 – Comparação entre as envoltórias de resistência do Solo Puro (A₁₀₀) e misturas CV₂₇Cal₃A₇₀_T60 e CV₂₇Cal₃A₇₀_T60_PM.

Pode-se observar que ambas as misturas com 60 dias de cura apresentaram um aumento nos valores dos parâmetros de resistência quando comparados ao solo puro. As misturas CV₂₇Cal₃A₇₀_T60 e CV₂₇Cal₃A₇₀_T60_PM mostram um ganho de 1° e 2,3°, respectivamente, no ângulo de atrito do material. Esta diferença de 1,3° no ângulo de atrito entre ambas as misturas curadas por 60 dias, pode estar relacionado ao método de moldagem, uma vez que o método com pré-moldagem mantém a estrutura do corpo de prova após as eventuais reações químicas ocorridas com o material.

Apesar dos resultados positivos obtidos, ainda se faz necessária a realização de mais ensaios em corpos de prova pré-moldados, para que se possa ter melhores conhecimentos da influencia deste sob o real ganho de resistência do material.

4.2.1.6 Comparação geral dos resultados.

A Tabela 4.15 apresenta um resumo e uma comparação geral dos valores de coesão e ângulo de atrito para o solo arenoso e todas as misturas (com e sem cura) estudadas.

Tabela 4.15 – Resumo dos valores de coesão e ângulo de atrito para o solo puro e misturas solo-cinza e solo-cinza-cal estudadas no presente trabalho.

Parâmetros de Resistência – Deformação axial de 17%

Misturas	Parâmetros de Lambe		Parâmetros de Mohr	
	a (kPa)	α (°)	c (kPa)	ϕ (°)
A	0	29,1	0	33,82
CV ₃₀ A ₇₀	7,91	28,07	9,35	32,23
CV ₄₀ A ₆₀	0	27,96	0	32,06
CF ₃₀ A ₇₀	11,42	28,73	13,65	33,24
CF ₄₀ A ₆₀	6,96	28,9	11,37	33,50
CV ₂₇ Cal ₃ A ₇₀ _T0	2,31	26,37	2,66	29,72
CV ₂₇ Cal ₃ A ₇₀ _T60	1,57	29,73	1,91	34,82
CV ₂₇ Cal ₃ A ₇₀ _T90	0	27,42	0	31,25
CV ₂₇ Cal ₃ A ₇₀ _T60_PM	0	30,52	0	36,12

De maneira geral, observa-se que a inserção da cinza, seja volante ou de fundo, se mostra aplicável, uma vez que os parâmetros de resistência do material não são consideravelmente alterados ou sofre uma melhoria, dando dessa forma uma destinação mais nobre ao rejeito.

Em relação à cinza volante, ambas as misturas com 30 e 40% apresentaram praticamente o mesmo valor de ângulo de atrito, diferenciando-se somente em alguns décimos. A diferença para o valor do mesmo parâmetro para o solo puro foi de aproximadamente menos 1,6°. A mistura com 30% ainda apresentou um ganho de coesão de 9,35 kPa. Dessa forma, a porcentagem ótima pode ser considerada de 40%, uma vez que há um uso de maior volume de resíduo.

Para as misturas com cinza de fundo, ambas as porcentagens de 30% e 40% apresentaram também praticamente o mesmo valor de ângulo de atrito, diferindo-se somente de alguns décimos entre si e em relação ao solo puro. As misturas CF₃₀A₇₀ e CF₄₀A₆₀ também apresentaram um aumento de coesão de 13,65 KPa e 11,37 KPa respectivamente. Dessa forma, a porcentagem ótima para a cinza de

fundo pode ser considerada de 40%, visto que se faz uso de um maior volume de resíduo.

Entre ambas as cinzas, volante e de fundo, as diferenças nos ângulos de atrito foram de aproximadamente 1 – 1,5°, e as misturas com cinza de fundo apresentaram valores de coesão maiores que os gerados pela inserção de cinza volante. Dessa forma, dentre todas as misturas sem cal, a CF₄₀A₆₀ foi a que apresentou um comportamento mais semelhante ao solo.

Dentre as misturas com cal e cura, a CV₂₇Cal₃A₇₀_T0 foi a que apresentou uma piora significativa, apresentando uma queda de 4° no ângulo de atrito, porém um pequeno aumento na coesão do material. A mistura CV₂₇Cal₃A₇₀_T90 apresentou uma queda de 2,6° no ângulo de atrito quando comparado ao solo puro, e nenhum acréscimo da coesão. A mistura que se mostrou com melhores resultados foi a CV₂₇Cal₃A₇₀_T60, com 60 dias de cura, apresentando valores tanto de ângulo de atrito como coesão maiores que o solo puro.

Comparando-se os métodos de moldagem do corpo de prova, a mistura com pré-moldagem CV₂₇Cal₃A₇₀_T60_PM, apresentou um acréscimo de 2,3° no ângulo de atrito em comparação com o solo, porém não apresentou coesão.

Dessa forma, a mistura que se apresenta com melhores resultados quando se comparam todas as misturas estudadas, é a mistura CV₂₇Cal₃A₇₀_T60_PM. Porém ainda se faz necessária a execução de mais ensaios com este material para outros tempos de cura.

O resultado mais satisfatório encontrado para a mistura solo-cinza-cal pode estar relacionado às características pozolânicas da cinza volante. A mistura cinza-cal proporciona uma estabilização química ao solo granular, de forma a melhorar sua resistência por meio da adição de pequenas quantidades de ligantes nos pontos de contato dos grãos.

Mateos (1961, *apud* Thomé, 1999) observou em sua pesquisa que os valores da massa específica aparente seca para a mistura areia-cinza volante-cal sofreram um aumento, que levaria conseqüentemente, a um aumento também na resistência da mistura, pois há um contato mais próximo e/ou aumento de contatos entre as partículas da cal e cinza.

4.3 COMPARAÇÃO ENTRE SOLO ARENOSO E ARGILOSO EM MISTURA COM CINZAS VOLANTE E DE FUNDO DE RSU E CAL.

Alguns dos fatores que afetem a estabilização de solos com cinza e cal são: tipo de solo, tipo de cinza, tipo de cal, efeito de diferentes proporções de cal e cinza, períodos de cura, efeito da energia de compactação e efeito da temperatura de cura.

Quispe (2013) avaliou o comportamento de um solo argiloso estabilizado com cinzas de RSU também provenientes da Usinaverde. Foram realizados ensaios de caracterização física, química e mecânica. Através de ensaios triaxiais estáticos, analisou-se a influência dos dois tipos de cinzas, do teor utilizado (20, 30 e 40%) e do tempo de cura (0, 30 e 60 dias) nos parâmetros de resistência do material.

Neste item se apresenta uma comparação entre a influência da inclusão das cinzas em mistura com um solo argiloso (Quispe, 2013) e um solo arenoso, nos parâmetros de resistência dos mesmos.

Segundo Quispe (2013), o solo utilizado pelo autor se trata de uma argila arenosa de média plasticidade e em sua composição química há uma grande quantidade de Al_2O_3 e Fe_2O_3 e uma pequena quantidade de CaO , MgO , K_2O e Na_2O .

A Tabela 4.16 apresenta uma comparação dos resultados obtidos por Quispe (2013) e os obtidos na presente pesquisa.

Tabela 4.16 – Comparação entre a influência da inserção de cinzas volante e de fundo de RSU nos parâmetros de resistência de um solo argiloso e arenoso.

Misturas	Quispe (2013)		Misturas	Presente Pesquisa	
	c (KPa)	ϕ (°)		c (KPa)	ϕ (°)
Solo Puro	21,22	26,4	A ₁₀₀	0	33,82
SP ₇₀ CV ₃₀	41,9	32,1	CV ₃₀ A ₇₀	9,35	32,23
SP ₆₀ CV ₄₀	34	34,4	CV ₄₀ A ₆₀	0	32,06
SP ₇₀ CF ₃₀	48,3	30,8	CF ₃₀ A ₇₀	13,65	33,24
SP ₆₀ CF ₄₀	35,78	33	CF ₄₀ A ₆₀	11,37	33,50
SP ₇₀ CV ₃₀ _T60	43,7	32,1	CV ₂₇ Cal ₃ A ₇₀ _T60	1,91	34,82

Através dos resultados obtidos por Quispe (2013), observa-se que todas as misturas solo-cinza apresentaram uma melhoria significativa nos parâmetros de resistência, quando comparados com o solo puro, sendo que as misturas solo-cinza volante apresentam os melhores resultados. De acordo com o autor as misturas com 40% de cinza volante e 30% de cinza de fundo apresentaram as melhores características de resistência e poderiam ser utilizadas como estabilizante no solo estudado. Para a mistura com cura de 60 dias, observam-se parâmetros quase iguais à mesma mistura sem cura.

Como apresentado anteriormente, as misturas estudadas na presente pesquisa apresentaram os valores de seus parâmetros de resistência bastante semelhante ao solo puro, e quando utilizada a mesma cinza, com porcentagens diferentes entre si, observa-se também valores próximos, podendo-se então definir a porcentagem de 40% como um teor ótimo para ambas as misturas.

Observa-se que a coesão do solo argiloso é expressivamente mais elevada que a do solo arenoso, porém apresenta um ângulo de atrito menor. Quando se insere tanto as cinzas de fundo, como volante ao mesmo, este passa a apresentar valores de ângulo de atrito semelhantes ao solo arenoso puro e misturas deste com as cinzas. Este aspecto pode estar relacionado ao fato de ambas as cinzas apresentarem uma granulometria arenosa, e tornar o solo argilo-arenoso mais semelhante a uma areia.

Devido à composição física e química do solo argiloso, as cinzas funcionam como agentes estabilizantes proporcionando tanto uma estabilização física, como química, diferentemente do solo arenoso, que sofre somente uma estabilização física com alteração de sua granulometria, visto que sua composição é basicamente formada por minerais de quartzo.

A princípio, solos sem fração fina, como a areia estudada, não possuem um aumento considerável de sua resistência somente com a adição de cal. Dessa forma, a adição de cinza volante juntamente com a cal permite a ocorrência de reações pozolânicas neste tipo de solo, pois a cinza disponibiliza os elementos necessários para tais reações, enquanto um solo argiloso geralmente já possui tais componentes em sua composição. Assim, ao se adicionar cal à mistura com areia e cinza, além de se promover uma estabilização granulométrica, promove-se também uma estabilização química. De fato, observa-se que dentre todas as

misturas, considerando o solo arenoso, a mistura CV₂₇Ca₃A₇₀_T60 foi a que apresentou o melhor resultado.

Comparando-se as misturas realizadas com os dois tipos de solos, a mistura CV₂₇Ca₃A₇₀_T60 é a que apresenta um maior ângulo de atrito, semelhante à mistura SP₆₀CV₄₀ realizada com o solo argiloso.

Através dos resultados apresentados, pode-se observar que a inclusão de cinzas em ambos os tipos de solo se mostra viável. Em solos argilosos, os parâmetros de resistência do material sofrem um ganho mais significativo com a inclusão de cinzas, diferentemente do que se observou para o solo arenoso estudado. Porém, a inclusão das mesmas ao solo arenoso também se mostra aplicável, o que contribui com a possibilidade de reutilização do resíduo e sua destinação mais adequada.