

## 4 Resultados e Análises

Neste capítulo serão apresentados os resultados e as análises dos ensaios executados nesta pesquisa, para as amostras de solo, cinza de bagaço de cana-de-açúcar, cinza de casca de arroz 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 Ensaio de caracterização física

#### 4.1.1. Areia

##### 4.1.1.1. Índices físicos

A areia em estudo é caracterizada como sendo uma areia média, limpa e de granulometria uniforme. Durante sua caracterização, não foi observada a presença de matéria orgânica. Os índices físicos da areia são apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2** Índices físicos da areia

Índices Físicos	Areia
Densidade real dos grãos ( $G_s$ )	2,65
Coefficiente de uniformidade ( $C_u$ )	1,76
Coefficiente de curvatura ( $C_c$ )	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 dessas frações. A Figura 1 apresenta a curva granulométrica obtida para a areia.

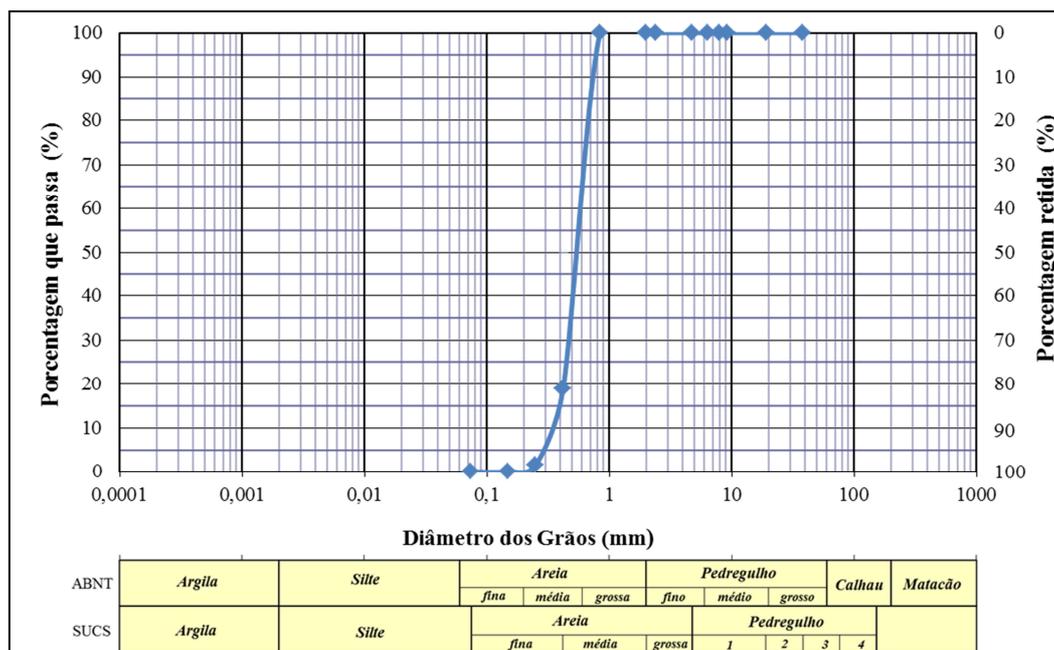


Figura 1 Curva granulométrica da areia

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, são classificadas como SP, tratando-se, então, de uma areia mal graduada.

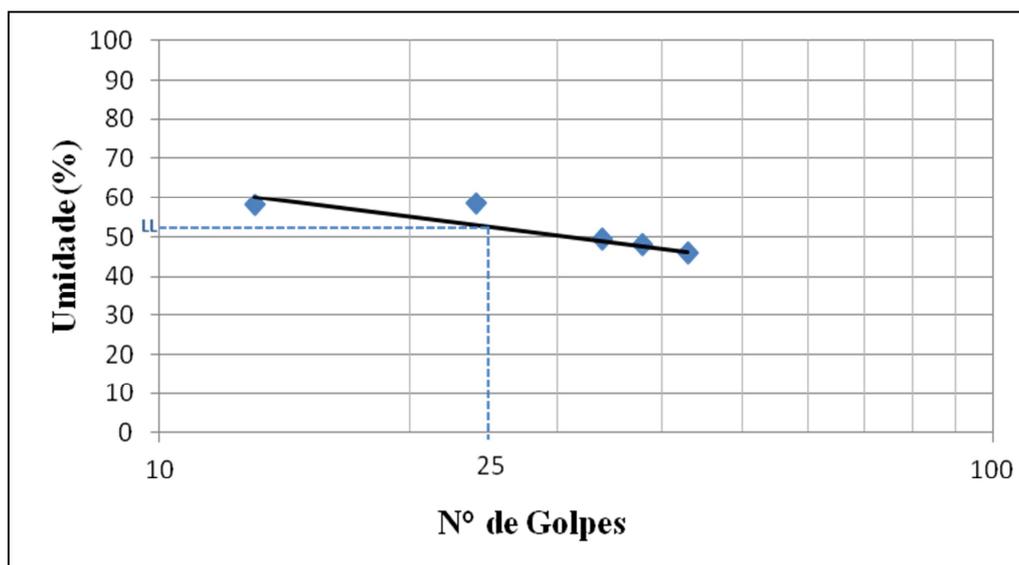
#### 4.1.2. Solo argiloso puro

##### 4.1.2.1. Limites de atterberg

Os limites de consistência, ou limites de Atterberg, são fundamentais para a análise do comportamento de solos finos para a engenharia. O estado em que o solo apresenta um comportamento plástico, permitindo-o ser moldado, está delimitado pelo Limite de Liquidez (LL), que marca a transição do estado plástico ao estado líquido do

solo, e pelo Limite de Plasticidade, que corresponde ao teor de umidade em que o solo passa do estado semi-sólido para o estado plástico.

Os resultados do Limite de Plasticidade e Limite de Liquidez do solo puro podem ser observados na Figura 2.



**Figura 2** Gráfico de determinação do Limite de Liquidez

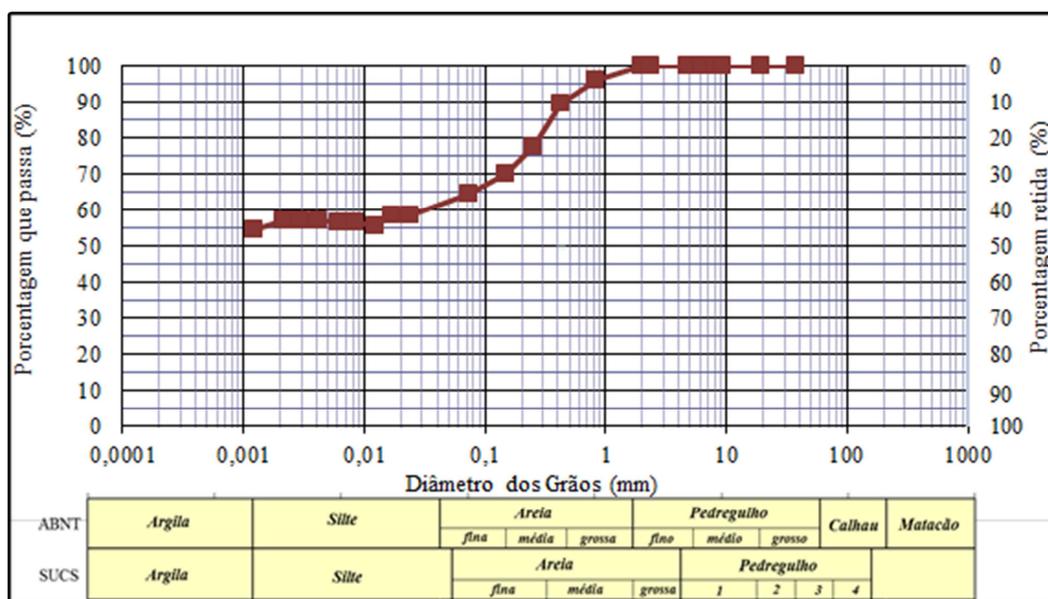
Por meio dos resultados obtidos, tem-se que o Limite de Liquidez do solo é igual a 53% e o Limite de Plasticidade, a 39%, resultando em um Índice de Plasticidade ( $IP = LL - LP$ ) que exprime o grau de argilosidade da fração fina, igual a 14% é um material medianamente plástico. Quanto maior o IP de um solo, maior será seu índice de compressibilidade, sendo menos adequado a obras geotécnicas.

#### 4.1.2.2. Densidade real dos grãos (Gs)

O peso específico real dos grãos consiste na relação entre peso e volume dos grãos. O ensaio consiste na determinação do volume do material sólido de massa conhecida, de forma que o volume de vazios seja excluído. Para o solo argiloso puro, o valor de Gs obtido foi igual a 2,72.

### 4.1.2.3. Análise granulométrica

Este ensaio tem por finalidade a obtenção das frações constituintes do solo e sua classificação a partir dessas frações. A Figura 3 apresenta a curva granulométrica obtida para solo argiloso puro.



**Figura 3** Curvas granulométricas obtidas para solo argiloso puro

Segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), o solo, em estudo, é classificado como CH, correspondente a uma Argila Arenosa de média plasticidade.

### 4.1.3. Cinza de bagaço de cana-de-açúcar e misturas

#### 4.1.3.1. Densidade real dos grãos (Gs)

O peso específico real dos grãos consiste na relação entre peso e volume destes. O ensaio consiste na determinação do volume do material sólido de massa conhecida, de forma que o volume de vazios seja excluído. Este ensaio foi realizado tanto para os materiais puros, quanto para as misturas em estudo. Os valores de Gs obtidos são apresentados na Tabela 3 e na Tabela 4.

**Tabela 3** Resultados do ensaio de densidade real dos grãos para areia, cinza de bagaço de cana-de-açúcar e misturas

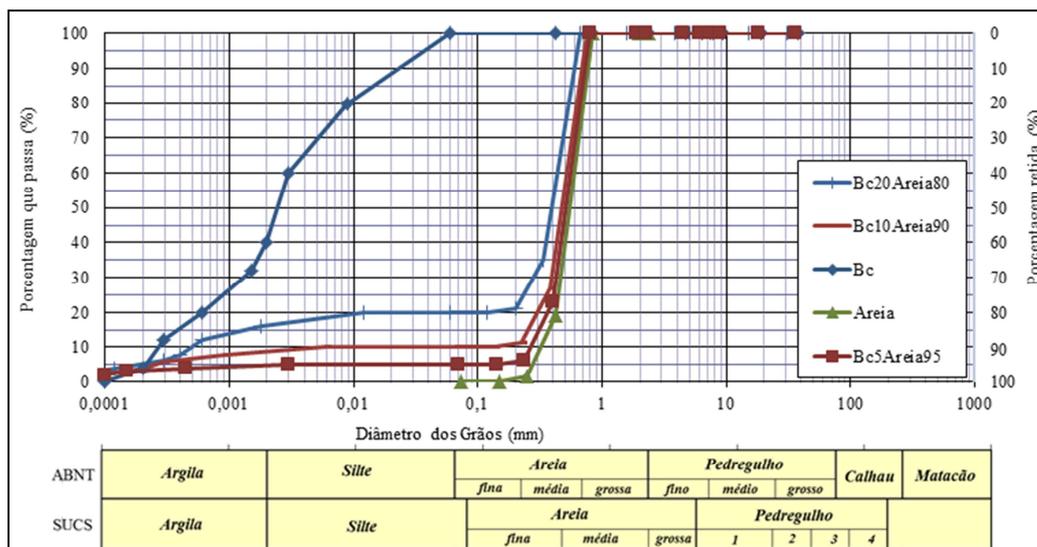
<b>Amostra</b>	<b>Teor de Cinza (%)</b>	<b>Densidade real dos Grãos (Gs)</b>
Areia	0	2,654
Bc	100	2,530
Bc5Areia95	5	2,638
Bc10Areia90	10	2,621
Bc20Areia80	20	2,601

**Tabela 4** Resultados do ensaio de densidade real dos grãos para o solo argiloso, cinza de bagaço de cana-de-açúcar e misturas

<b>Amostra</b>	<b>Teor de Cinza (%)</b>	<b>Densidade real dos Grãos (Gs)</b>
Argila	0	2,720
Bc	100	2,530
Bc10Argila90	10	2,681
Bc20Argila80	20	2,643

#### **4.1.3.2. Análise granulométrica**

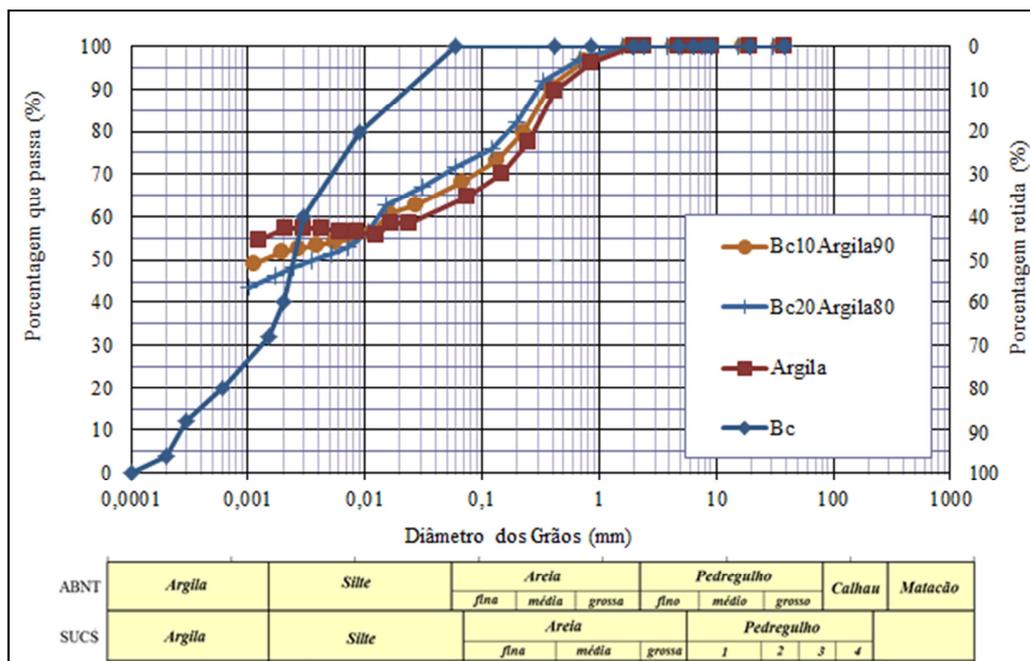
A Figura 4 apresenta as curvas granulométricas da areia, cinza de bagaço de cana e misturas do solo com 5, 10 e 20% de cinza de bagaço de cana-de-açúcar.



**Figura 4** Curvas granulométricas do solo arenoso, cinza de bagaço de cana-de-açúcar e misturas do solo com 5, 10 e 20% de cinza

Pode ser observado que a cinza de bagaço de cana-de-açúcar em estudo possui uma alta fração de material fino, correspondente à granulometria da argila, e uma fração média de grãos referentes à granulometria silte. Por meio 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 de bagaço de cana-de-açúcar pura. Com a adição de 20% de cinza de bagaço de cana, observa-se uma maior quantidade de finos na mistura e uma menor quantidade de fração areia média, quando comparado à mistura de 5%, o que seria esperado devido à maior porcentagem de cinza na mistura.

A Figura 5 apresenta a comparação entre as curvas granulométricas do solo argiloso, cinza de bagaço de cana-de-açúcar e misturas do solo com 10 e 20% de cinza de bagaço de cana-de-açúcar.



**Figura 5** Curvas granulométricas do solo argiloso, cinza de bagaço de cana-de-açúcar e misturas do solo com 10% e 20% de cinza

Ao se adicionar esta cinza ao solo, obteve-se um material semelhante à argila pura, composto, em sua maioria, por fração silte e uma maior quantidade de finos, devido à inserção das cinzas.

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 tornou-se um pouco mais bem graduado que o solo puro.

### **Classificação SUCS dos Materiais**

Primeiramente, convém dizer que não é muito apropriado utilizar esta classificação para cinzas ou misturas, tendo em vista que elas fogem do espaço de abrangência para o qual a classificação foi proposta, entretanto, para efeitos de comparação, tal classificação foi, então, aplicada para a cinza de bagaço de cana-de-açúcar e as misturas utilizadas nesta pesquisa.

Pelo fato de a cinza apresentar alto teor de silte, é classificada, de acordo com o Sistema SUCS, como silte de baixa plasticidade (ML). Para as misturas com solo arenoso, a classificação enquadrou-se no grupo SM, de areia siltosa.

#### 4.1.4. Ensaio químicos

##### 4.1.4.1. Composição química

Os ensaios de composição química da cinza de bagaço de cana-de-açúcar foram realizados no laboratório do Departamento de Engenharia Química da PUC-Rio.

A Tabela 5 mostra os resultados da composição química da cinza, expresso em termos dos elementos químicos.

**Tabela 5** Elementos químicos presentes na cinza de bagaço de cana-de-açúcar

Elemento Químico	Concentração %
	Bc
Silício	46,4
Cálcio	0,54
Ferro	17,14
Alumínio	32,11
Titânio	1,4
Enxofre	0,51
Potássio	1,36
Manganês	0,1
Vanádio	0,18
Zircônio	0,1
Outros	0,1

A Tabela 6 apresenta as composições químicas das cinzas, investigadas por Martirena Hernández et al. (1998), e de amostras caracterizadas por Massazza (1998) e Singh et al. (2000).

Há variação na composição química das amostras apresentadas, principalmente para os teores de SiO<sub>2</sub> (63,2% – 75%).

**Tabela 6** Composições químicas das cinzas estudadas por Martirena Hernández et al. (1998), Massazza (1998) e Singh et al. (2000)

Composto	Quantidade (% em massa)		
	Cinza de Bagaço de Cana-de-açúcar		
	MARTIRENA HERNÁNDEZ et al.(1998)	MASSAZZA (1998)	SINGH et al. (2000)
SiO <sub>2</sub>	72,7	75	63,2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,3	6,7	9,7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,9	6,3	5,4
TiO <sub>2</sub>	0,3	–	–
CaO	8	2,8	3,1
MgO	2,9	1,1	2,9
SO <sub>3</sub>	0,1	–	2,9
K <sub>2</sub> O	3,5	2,4	–
Na <sub>2</sub> O	0,8	1,1	–
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,6	4	–

Cordeiro (2006) analisou a composição química em termos de óxidos por espectrometria de fluorescência de raios X. Os resultados da composição química são apresentados na Tabela 7. O dióxido de silício é o composto preponderante, com 78,34% da amostra. Outros óxidos, presentes em quantidades significativas, são Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (8,55%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (3,61%), K<sub>2</sub>O (3,46%) e CaO (2,15%). Foi observada a coloração cinza claro do material, o que indica processo de combustão do bagaço praticamente completo.

**Tabela 7** Composição química em termos de óxidos por espectrometria de fluorescência de raios X

<b>Composto</b>	<b>Composição (% em massa)</b>
SiO <sub>2</sub>	78,34
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,55
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,61
CaO	2,15
Na <sub>2</sub> O	0,12
K <sub>2</sub> O	3,46
MnO	0,13
TiO <sub>2</sub>	0,5
MgO	1,65
BaO	< 0,16
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,07

#### **4.1.4.2.**

##### **Teor de matéria orgânica**

A determinação do teor de matéria orgânica do solo argiloso foi feita por Quispe (2013), por meio da técnica de oxidação com dicromato de potássio em meio sulfúrico, no Laboratório de Geotecnia/Química de Solos da COPPE/UFRJ. Obteve-se um valor de 0,85%.

#### **4.1.4.3.**

##### **Ensaio de lixiviação**

O ensaio de lixiviação da cinza de bagaço de cana-de-açúcar foi realizado pelo laboratório TASQA Serviços Analíticos Ltda. e seus resultados são apresentados na Tabela 8 e na Tabela 9.

**Tabela 8** Resultados analíticos dos ensaios de lixiviação – parâmetros orgânicos (TASQA, 2014)

<b>Parâmetros orgânicos</b>			
<b>Parâmetros</b>	<b>Limite de quantificação (LQ) (mg/L)</b>	<b>Cinza de bagaço de cana-de-açúcar (mg/L)</b>	<b>VMP NBR 10005:2004 Lixiviado (mg/L)</b>
Aldrin e Dieldrin	0,001	<LQ	0,003
Benzeno	0,004	<LQ	0,5
Benzo(a)pireno	0,002	<LQ	0,07
Clordano (isômeros)	0,001	<LQ	0,02
Cloreto de vinila	0,4	<LQ	0,5
Clorobenzeno	0,01	<LQ	100
Clorofórmio	0,004	<LQ	6
m-cresol	0,01	<LQ	200
o-cresol	0,01	<LQ	200
p-cresol	0,01	<LQ	200
Cresol total	0,01	<LQ	200
2,4-D	0,01	<LQ	3
DDT (p,p-DDT+p,p-DDE+p,p-DDD)	0,001	<LQ	0,2
1,4-diclorobenzeno	0,004	<LQ	7,5
1,2-dicloroetano	0,004	<LQ	1
1,1-dicloroetileno	0,004	<LQ	3
2,4-dinitrotolueno	0,01	<LQ	0,13
Endrin	0,001	<LQ	0,06
Heptacloro e seu epóxido	0,001	<LQ	0,003
Hexaclorobenzeno	0,001	<LQ	0,1
Hexaclorobutadieno	0,004	<LQ	0,5
Hexacloroetano	0,01	<LQ	3
Lindano (g BHC)	0,001	<LQ	0,2
Metilcetonona	0,5	<LQ	200
Metoxicloro	0,001	<LQ	2
Nitrobenzeno	0,01	<LQ	2
Pentaclorofenol	0,01	<LQ	0,9
Piridina	0,001	<LQ	5
2,4,5-T	0,002	<LQ	0,2
Tetracloroeto de carbono	0,004	<LQ	0,2
Tetracloroetileno	0,004	<LQ	4
Toxafeno	0,002	<LQ	0,5
2,4,5-TP	0,01	<LQ	1
Tricloroetileno	0,004	<LQ	7
2,4,5-triclorofenol	0,01	<LQ	400
2,4,6-triclorofenol	0,01	<LQ	20

LQ – limite de quantificação.

**Tabela 9** Resultados analíticos dos ensaios de lixiviação – parâmetros inorgânicos (TASQA, 2014)

<b>Parâmetros inorgânicos</b>			
<b>Parâmetros</b>	<b>Limite de quantificação (LQ) (mg/L)</b>	<b>Cinza de bagaço de cana-de-açúcar (mg/L)</b>	<b>VMP NBR 10005:2004 Lixiviado (mg/L)</b>
Arsênio	0,05	<LQ	1
Bário	0,005	0,47	70
Cádmio	0,005	<LQ	0,5
Chumbo	0,03	<LQ	1
Cromo total	0,005	0,0081	5
Fluoretos	0,05	<0,05	150
Mercúrio	0,00017	<0,00017	0,1
Prata	0,005	<0,005	5
Selênio	0,05	<LQ	1

LQ – limite de quantificação.

Por meio da análise dos resultados, conclui-se que todos os parâmetros analisados no ensaio de lixiviação apresentaram concentrações adequadas às indicadas no Anexo F da norma NBR 10004 (2004).

#### **4.1.4.4. Ensaio de solubilização**

O ensaio de solubilização da cinza de bagaço de cana-de-açúcar também foi realizado pelo laboratório TASQA Serviços Analíticos Ltda. e seus resultados são apresentados na Tabela 10 e na Tabela 11.

**Tabela 10** Resultados analíticos dos ensaios de solubilização – parâmetros orgânicos (TASQA, 2014)

<b>Parâmetros orgânicos</b>			
<b>Parâmetros</b>	<b>Limite de quantificação (LQ) (mg/L)</b>	<b>Cinza de bagaço de cana-de-açúcar (mg/L)</b>	<b>VMP NBR 10006:2004 Solubilizado (mg/L)</b>
Aldrin e Eldrin	0,00002	<LQ	0,00003
Clordano (isômeros)	0,0002	<LQ	0,0002
2,4-D	0,01	<LQ	0,03
DDT (isômeros)	0,001	<LQ	0,002
Endrin	0,0002	<LQ	0,0006
Fenóis totais	0,0011	0,0033	0,01
Heptacloro e seu epóxido	0,00002	<LQ	0,00003
Hexaclorobenzeno	0,001	<LQ	0,001
Lindano (g BHC)	0,001	<LQ	0,002
Metoxocloro	0,001	<LQ	0,02
2,4,5-T	0,002	<LQ	0,002
2,4,5-TP	0,01	<LQ	0,03
Toxafeno	0,002	<LQ	0,005

LQ – limite de quantificação.

**Tabela 11** Resultados analíticos dos ensaios de solubilização – parâmetros inorgânicos (TASQA, 2014)

<b>Parâmetros inorgânicos</b>			
<b>Parâmetros</b>	<b>Limite de quantificação (LQ) (mg/L)</b>	<b>Cinza de bagaço de cana-de-açúcar (mg/L)</b>	<b>VMP NBR 10006:2004 Solubilizado (mg/L)</b>
Alumínio	0,05	0,13	0,2
Arsênio	0,001	0,01	0,01
Bário	0,005	0,21	0,7
Cádmio	0,005	<LQ	0,005
Chumbo	0,002	<0,002	0,01
Cianetos	0,005	<0,005	0,07
Cloretos	0,01	5,89	250
Cobre	0,005	0,0062	2
Cromo total	0,005	<0,005	0,05
Ferro	0,005	0,26	0,3
Fluoretos	0,05	0,08	1,5
Manganês	0,005	0,02	0,1
Mercúrio	0,00017	<0,00017	0,001
Nitrato (como N)	0,1	2,09	10
Prata	0,005	<0,005	0,05
Selênio	0,002	<0,002	0,01
Sódio	0,5	8,98	200
Sulfato	1,00	51,3	250
Surfactantes	0,03	<0,03	0,5
Zinco	0,005	0,17	5

LQ – limite de quantificação.

Segundo as diretrizes do Anexo G da Norma NBR 10004 (2004), que apresentam os valores máximos permitidos no ensaio de solubilização, a cinza foi classificada como pertencente à Classe II B – Resíduo Inerte.

#### 4.1.5.

#### Cinza de casca de arroz e misturas

##### 4.1.5.1.

##### Densidade real dos grãos (Gs)

O peso específico real dos grãos consiste na relação entre peso e volume destes. O ensaio consiste na determinação do volume do material sólido de massa conhecida, de forma que o volume de vazios seja excluído. Este ensaio foi realizado, tanto para os materiais puros, quanto para as misturas em estudo. Os valores de Gs obtidos são apresentados na Tabela 12 e na Tabela 13.

**Tabela 12** Resultados do ensaio de densidade real dos grãos para a areia, cinza de casca de arroz e misturas

Amostra	Teor de Cinza (%)	Densidade real dos Grãos (Gs)
Areia	0	2,65
Ca	100	2,293
Ca10Areia90	10	2,611
Ca20Areia80	20	2,566

**Tabela 13** Resultados do ensaio de densidade real dos grãos para o solo argiloso, cinza de casca de arroz e misturas

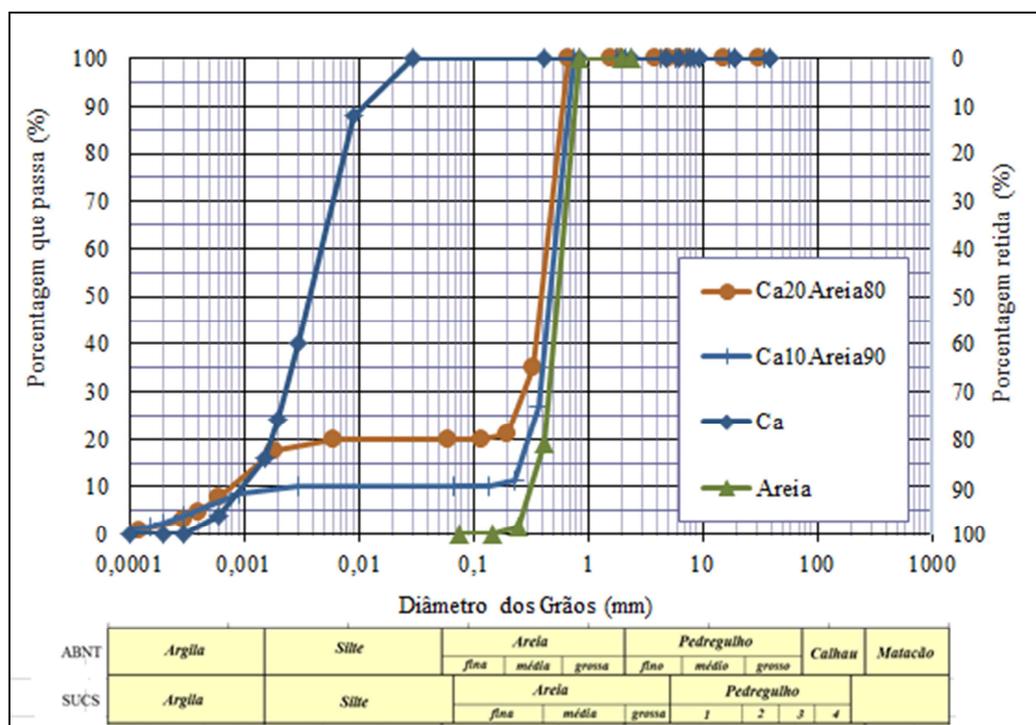
Amostra	Teor de Cinza (%)	Densidade real dos Grãos (Gs)
Argila	0	2,72
Ca	100	2,293
Ca10Argila90	10	2,662
Ca20Argila80	20	2,589

Observa-se que o valor da densidade real dos grãos das cinzas puras apresenta-se menor do que o do solo puro, e as misturas apresentam-se com valores entre os dos

materiais puros, o que indica que, ao se adicionar a cinza de casca de arroz, ao solo, poderá ser obtido um material mais leve que o solo puro.

#### 4.1.5.2. Análise granulométrica

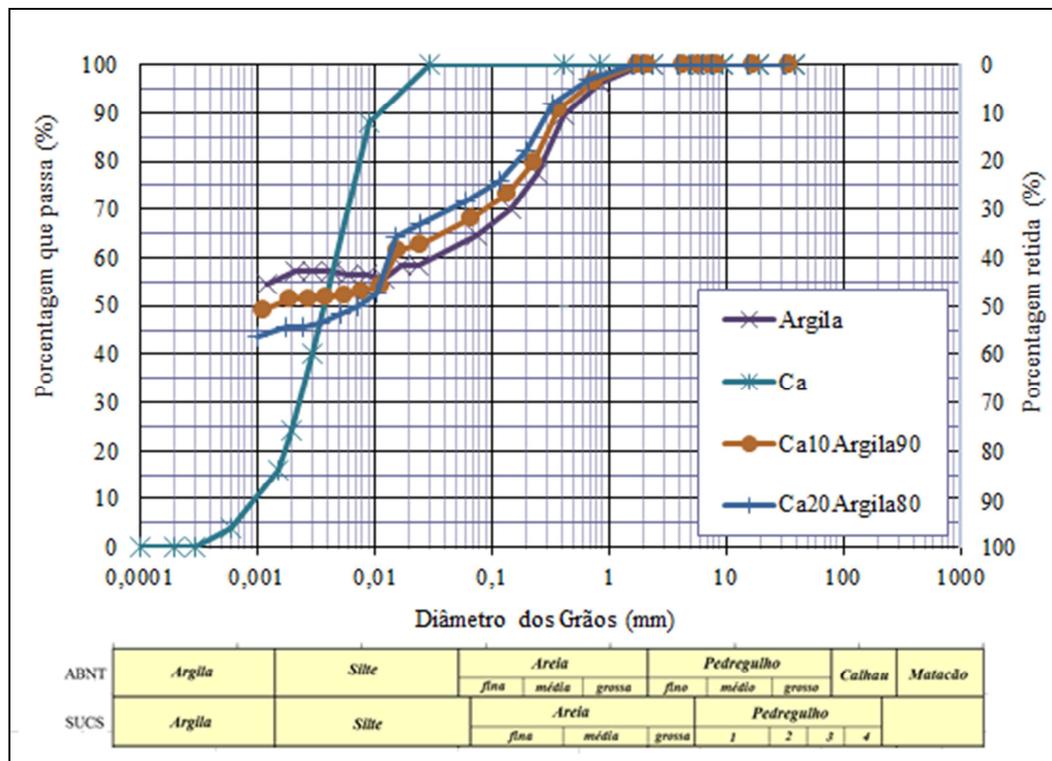
A Figura 6 apresenta as curvas granulométricas da areia, casca de arroz e misturas do solo com 10 e 20% de cinza de casca de arroz. A Figura 7 apresenta as curvas granulométricas do solo argiloso, cinza de casca de arroz e misturas do solo com 10 e 20% de cinza de casca de arroz. Ao se apresentarem as curvas granulométricas em um mesmo gráfico, objetiva-se mostrar a influência da adição da cinza de casca de arroz na composição granulométrica do material.



**Figura 6** Curvas granulométricas do solo arenoso, cinza de casca de arroz e misturas do solo com 10 e 20% de cinza

Pode ser observado que a cinza de casca de arroz possui uma alta fração de material fino, correspondente à granulometria argila, e uma fração média de grãos referentes à granulometria silte. Por meio das misturas, observa-se que o material resultante adquire uma granulometria intermediária a dos materiais puros, sendo mais bem graduado que a areia pura e mais uniforme que a cinza de casca de arroz pura. Com

a adição de 20% de cinza de casca de arroz, observa-se uma maior quantidade de finos na mistura e uma menor quantidade de fração areia média, quando comparado com a mistura de 5% o que já era esperado, devido à maior porcentagem de cinza na mistura.



**Figura 7** Curvas granulométricas do solo argiloso, cinza de casca de arroz e misturas do solo com 10% e 20% de cinza

Ao se adicionar esta cinza, ao solo, obteve-se um material semelhante à argila pura, composto, em sua maioria, por fração silte e uma maior quantidade de finos devido à inserção das cinzas.

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 tornou-se um pouco mais bem graduado que o solo puro.

## **Classificação SUCS dos Materiais**

Pelo fato de a cinza de casca de arroz apresentar alto teor de silte, esta é classificada, de acordo com o Sistema SUCS, como silte de baixa plasticidade (ML). Para as misturas com solo arenoso, a classificação enquadrou-se no grupo SM, o de areia siltosa.

### **4.1.6. Ensaio químicos**

#### **4.1.6.1. Composição química**

Os ensaios de composição química da cinza de casca de arroz foram realizados no laboratório do Departamento de Engenharia Química da PUC-Rio.

A Tabela 14 mostra os resultados da composição química da cinza, expressos em termos dos elementos químicos.

**Tabela 14** Elementos químicos presentes na cinza de casca de arroz

Elemento Químico	Concentração %
	Ca
Silício	53
Cálcio	0,32
Ferro	17,33
Alumínio	25,17
Titânio	1,72
Enxofre	0,63
Potássio	1,25
Manganês	0,14
Vanádio	0,21
Zircônio	0,1
Outros	0,098

A Tabela 15 apresenta a composição química da cinza de casca de arroz, investigada por Martirena Hernández et al. (1998).

**Tabela 15** Composição química da cinza de casca de arroz por Martirena Hernández et al. (1998)

Composto	Quantidade (% em massa)
	Cinza de Casca de Arroz
MARTIRENA HERNÁNDEZ et al.(1998)	
SiO <sub>2</sub>	71,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,5
TiO <sub>2</sub>	0,4
CaO	10,4
MgO	2
SO <sub>3</sub>	0,5
K <sub>2</sub> O	3,6
Na <sub>2</sub> O	0,4
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,9

Cordeiro (2006) analisou a composição química em termos de óxidos por espectrometria de fluorescência de raios X. Os resultados da composição química são apresentados na Tabela 16.

**Tabela 16** Composição química por espectrometria de fluorescência de raios X

Composto	Composição (% em massa)
SiO <sub>2</sub>	82,62
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,38
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,49
CaO	0,85
Na <sub>2</sub> O	0,05
K <sub>2</sub> O	1,81
MnO	0,3
SO <sub>3</sub>	0,08
MgO	0,67
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,87

#### 4.1.6.2. Ensaio de lixiviação

O ensaio de lixiviação da cinza de casca de arroz foi realizado pelo laboratório TASQA Serviços Analíticos Ltda., e seus resultados são apresentados na Tabela 17 e na Tabela 18.

**Tabela 17** Resultados analíticos dos ensaios de lixiviação – parâmetros orgânicos (TASQA, 2014)

Parâmetros orgânicos			
Parâmetros	Limite de quantificação (LQ) (mg/L)	Cinza de casca de arroz (mg/L)	VMP NBR 10005:2004 Lixiviado (mg/L)
Aldrin e Dieldrin	0,001	<LQ	0,003
Benzeno	0,004	<LQ	0,5
Benzo(a)pireno	0,002	<LQ	0,07
Clordano (isômeros)	0,001	<LQ	0,02
Cloreto de vinila	0,4	<LQ	0,5
Clorobenzeno	0,01	<LQ	100
Clorofórmio	0,004	<LQ	6
m-cresol	0,01	<LQ	200
o-cresol	0,01	<LQ	200
p-cresol	0,01	<LQ	200
Cresol total	0,01	<LQ	200
2,4-D	0,01	<LQ	3
DDT (p,p-DDT+p,p-DDE+p,p-DDD)	0,001	<LQ	0,2
1,4-diclorobenzeno	0,004	<LQ	7,5
1,2-dicloroetano	0,004	<LQ	1
1,1-dicloroetileno	0,004	<LQ	3
2,4-dinitrotolueno	0,01	<LQ	0,13
Endrin	0,001	<LQ	0,06
Heptacloro e seu epóxido	0,001	<LQ	0,003
Hexaclorobenzeno	0,001	<LQ	0,1
Hexaclorobutadieno	0,004	<LQ	0,5
Hexacloroetano	0,01	<LQ	3
Lindano (g BHC)	0,001	<LQ	0,2
Metiletilcetona	0,5	<LQ	200
Metoxicloro	0,001	<LQ	2
Nitrobenzeno	0,01	<LQ	2
Pentaclorofenol	0,01	<LQ	0,9
Piridina	0,001	<LQ	5
2,4,5-T	0,002	<LQ	0,2
Tetracloroeto de carbono	0,004	<LQ	0,2
Tetracloroetileno	0,004	<LQ	4
Toxafeno	0,002	<LQ	0,5
2,4,5-TP	0,01	<LQ	1
Tricloroetileno	0,004	<LQ	7
2,4,5-triclorofenol	0,01	<LQ	400
2,4,6-triclorofenol	0,01	<LQ	20

LQ – limite de quantificação.

**Tabela 18** Resultados analíticos dos ensaios de lixiviação – parâmetros inorgânicos (TASQA, 2014)

<b>Parâmetros inorgânicos</b>			
<b>Parâmetros</b>	<b>Limite de quantificação (LQ) (mg/L)</b>	<b>Cinza de casca de arroz (mg/L)</b>	<b>VMP NBR 10005:2004 Lixiviado (mg/L)</b>
Arsênio	0,05	<LQ	1
Bário	0,005	0,47	70
Cádmio	0,005	<LQ	0,5
Chumbo	0,03	<LQ	1
Cromo total	0,005	<LQ	5
Fluoretos	0,05	0,12	150
Merúrio	0,00017	<0,00017	0,1
Prata	0,005	<0,005	5
Selênio	0,05	<LQ	1

LQ – limite de quantificação.

Por meio da análise dos resultados, conclui-se que todos os parâmetros analisados no ensaio de lixiviação apresentaram concentrações adequadas às indicadas no Anexo F, da norma NBR 10004 (2004).

#### **4.1.6.3. Ensaio de solubilização**

O ensaio de solubilização da cinza volante também foi realizado pelo laboratório TASQA Serviços Analíticos Ltda. e seus resultados são apresentados na Tabela 19 e na Tabela 20.

**Tabela 19** Resultados analíticos dos ensaios de solubilização parâmetros orgânicos (TASQA, 2014)

<b>Parâmetros orgânicos</b>			
<b>Parâmetros</b>	<b>Limite de quantificação (LQ) (mg/L)</b>	<b>Cinza de casca de arroz (mg/L)</b>	<b>VMP NBR 10006:2004 Solubilizado (mg/L)</b>
Aldrin e Eldrin	0,00002	<LQ	0,00003
Clordano (isômeros)	0,0002	<LQ	0,0002
2,4-D	0,01	<LQ	0,03
DDT (isômeros)	0,001	<LQ	0,002
Endrin	0,0002	<LQ	0,0006
Fenóis totais	0,0011	0,016	0,01
Heptacloro e seu epóxido	0,00002	<LQ	0,00003
Hexaclorobenzeno	0,001	<LQ	0,001
Lindano (g BHC)	0,001	<LQ	0,002
Metoxocloro	0,001	<LQ	0,02
2,4,5-T	0,002	<LQ	0,002
2,4,5-TP	0,01	<LQ	0,03
Toxafeno	0,002	<LQ	0,005

LQ – limite de quantificação.

**Tabela 20** Resultados analíticos dos ensaios de solubilização – parâmetros inorgânicos (TASQA, 2014)

<b>Parâmetros inorgânicos</b>			
<b>Parâmetros</b>	<b>Limite de quantificação (LQ) (mg/L)</b>	<b>Cinza de casca de arroz (mg/L)</b>	<b>VMP NBR 10006:2004 Solubilizado (mg/L)</b>
Alumínio	0,05	1,11	0,2
Arsênio	0,001	0,004	0,01
Bário	0,005	0,67	0,7
Cádmio	0,005	<LQ	0,005
Chumbo	0,002	0,006	0,01
Cianetos	0,005	<0,005	0,07
Cloretos	0,01	31,7	250
Cobre	0,005	0,0073	2
Cromo total	0,005	0,022	0,05
Ferro	0,005	0,42	0,3
Fluoretos	0,05	0,2	1,5
Manganês	0,005	0,63	0,1
Mercúrio	0,00017	<0,00017	0,001
Nitrato (como N)	0,1	14,4	10
Prata	0,005	<0,005	0,05
Selênio	0,002	<0,002	0,01
Sódio	0,5	20,2	200
Sulfato	1,00	249	250
Surfactantes	0,03	0,095	0,5
Zinco	0,005	0,62	5

LQ – limite de quantificação.

Segundo as diretrizes do Anexo G. da Norma NBR 10004 (2004), que apresentam os valores máximos permitidos no ensaio de solubilização, a cinza foi classificada como pertencente à Classe II A – Resíduo não inerte, já que as concentrações de alumínio, ferro, manganês, nitrato e fenóis totais foram superiores aos valores apresentados na norma.

Apesar de a cinza de casca de arroz ser classificada com um resíduo não inerte, isso não inviabiliza a sua utilização como agente cimentante em misturas com o solo, já que, no ensaio de lixiviação, que representa a infiltração da água da chuva no solo, todos os parâmetros analisados encontram-se dentro dos limites permitidos pela norma. No entanto, para estudos futuros, pode ser feita a análise da influência dos parâmetros, que ultrapassam os limites da norma, para o solo e o meio ambiente.

Em termos dos danos causados à saúde humana, verificou-se que a concentração de alumínio, ferro, manganês e nitrato da cinza encontram-se dentro do valor máximo permitido em reservatórios de água subterrânea (Resolução CONAMA 420 de 2009). Dessa forma, as concentrações apresentadas pela cinza não causam danos à saúde humana.

## **4.2.**

### **Ensaio de caracterização mecânica**

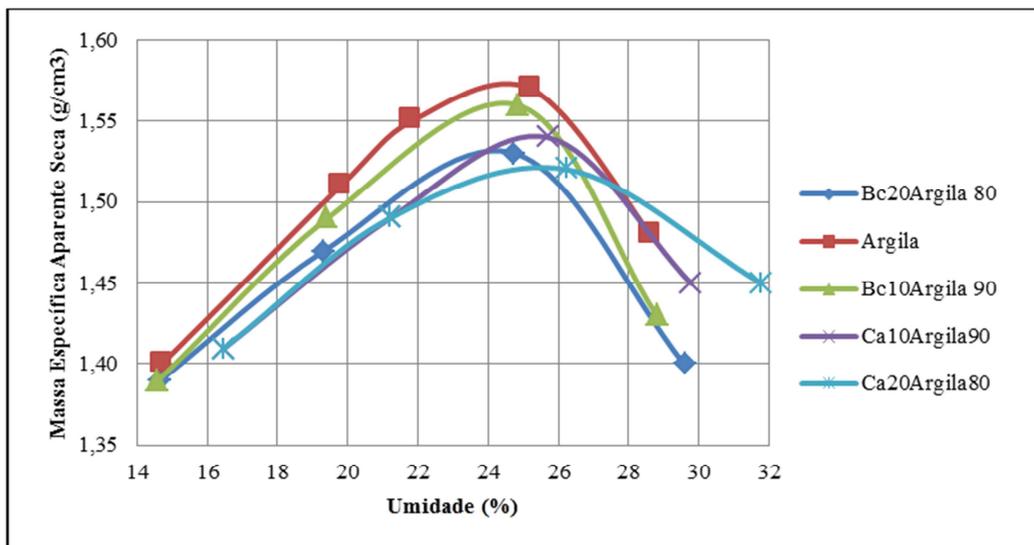
#### **4.2.1.**

##### **Solo argiloso**

##### **4.2.1.1.**

##### **Ensaio de compactação**

Os ensaios de compactação foram realizados para o solo puro e as misturas com cinza de bagaço de cana-de-açúcar e com cinza de casca de arroz foram realizados sob a energia Proctor normal. As curvas de compactação das misturas com cinza bagaço de cana-de-açúcar e com cinza de casca de arroz estão dispostas na Figura 8.



**Figura 8** Curvas de compactação do solo puro e das misturas com cinza de bagaço de cana-de-açúcar e com cinza de casca de arroz

Pode-se notar que ocorre uma redução do peso específico seco máximo, com o aumento do teor de cinza, tanto para as misturas com cinza de bagaço de cana-de-açúcar, quanto para as misturas com cinza de casca de arroz. Pode-se dizer, também, que ocorre um aumento da umidade ótima, à medida que se aumenta o teor de cinza de casca de arroz devido a superfície específica desta cinza ser muito alta conforme observado por Cordeiro (2006).

#### 4.2.1.2. Ensaio de cisalhamento

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados para o solo puro e misturas com 10 e 20% de cinza de bagaço de cana-de-açúcar. Os corpos de prova foram moldados nas condições de umidade ótima e peso específico seco máximo determinados nos ensaios de compactação. Os ensaios foram realizados sob as tensões de 50, 150 e 300 kPa, a fim de se determinar seus parâmetros de resistência ao cisalhamento, como coesão e ângulo de atrito.

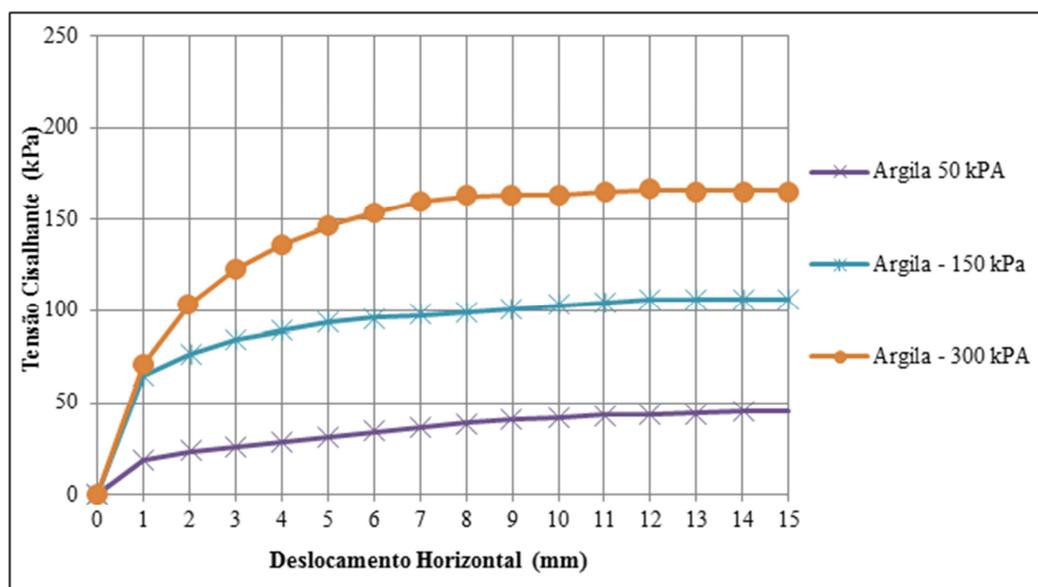
Devido ao fato de o ensaio de cisalhamento direto não ter controle da drenagem, este deve ser executado lentamente, no intuito de impedir a geração de poropressões nos poros da amostra. Em um ensaio de cisalhamento direto, realizam-se leituras de 3 medidas: deslocamento horizontal, deslocamento vertical e força cisalhante. A partir

delas, são, então, calculadas as tensões cisalhantes e plotados os gráficos de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal.

#### 4.2.1.3.

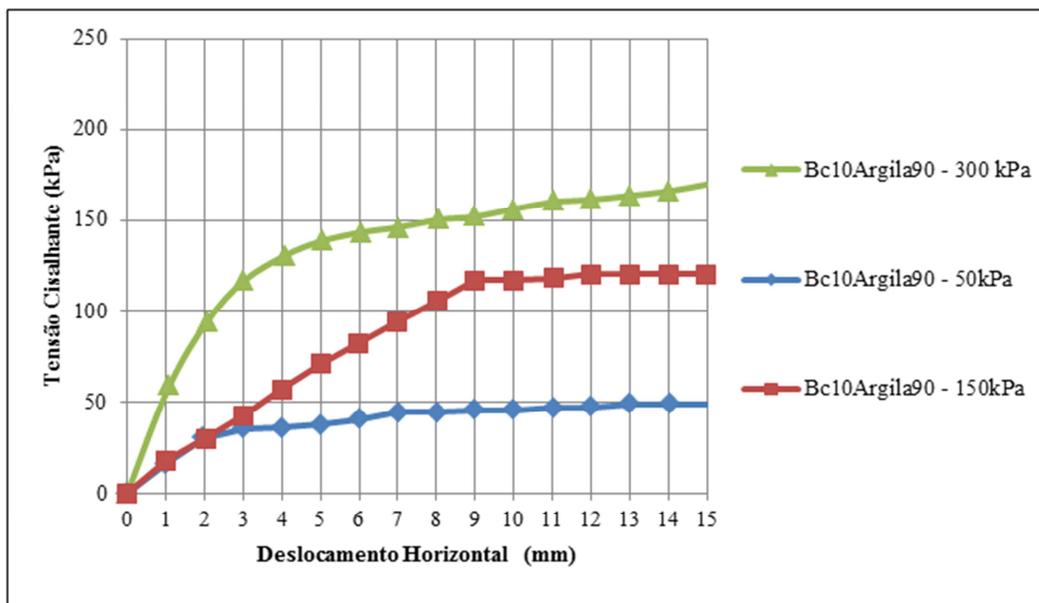
#### Comportamento tensão cisalhante versus deslocamento horizontal em solo argiloso puro e misturas com cinza de bagaço de cana-de-açúcar

A Figura 9 mostra as curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal para o solo argiloso, obtidas para as tensões de 50, 150 e 300 kPa.

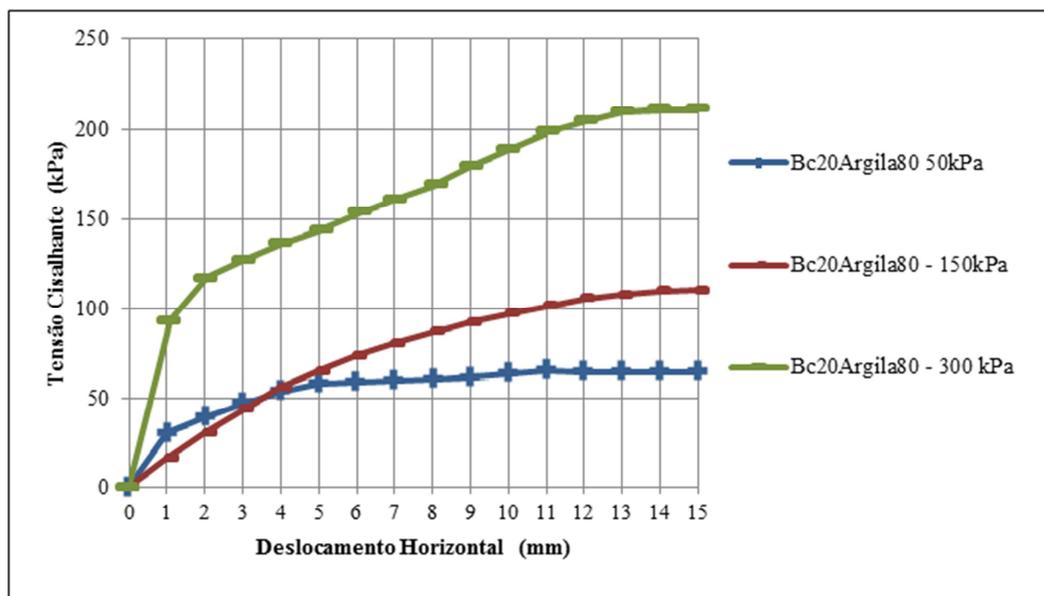


**Figura 9** Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal solo argiloso

A Figura 10 e a Figura 11 mostram as curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal para as misturas Bc10Argila90 e Bc20Argila80, respectivamente, submetidas às tensões de 50, 150 e 300 kPa.

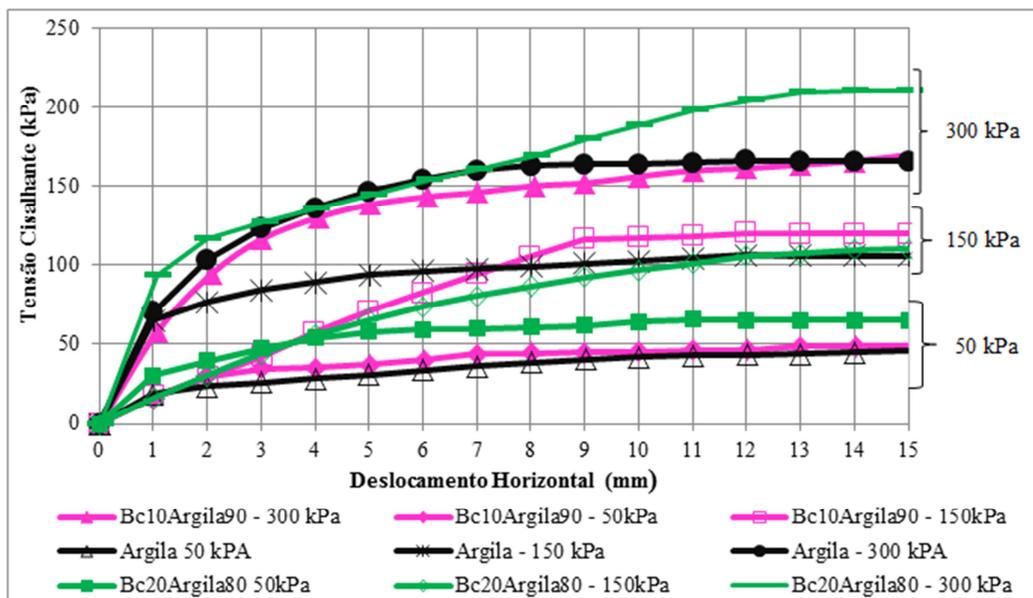


**Figura 10** Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal Bc10Argila90



**Figura 11** Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal Bc20Argila80

A Figura 12 mostra as curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal para o solo puro e solo com misturas entre 0 e 20 % de cinza de bagaço de cana-de-açúcar, sob as tensões de 50, 150 e 300 kPa.



**Figura 12** Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal solo argiloso puro e com teores de cinza de bagaço de cana-de-açúcar

#### 4.2.1.4. Influência do teor de cinza

Pode-se notar que para a tensão normal de 50 kPa, ambas as misturas apresentaram um comportamento melhor do que o solo argiloso. Observa-se que a mistura com 20% de cinza de bagaço de cana apresentou um resultado melhor do que o solo puro e do que a mistura com 10%. Para a tensão normal de 150 kPa, a mistura que contém 10% de cinza apresenta um comportamento melhor do que o do solo puro e do que a mistura de 20 %, sendo que ambas as misturas revelam um comportamento similar para deslocamentos menores que 7mm, que são, por sua vez, menores que a resistência do solo puro. No entanto, para deslocamentos superiores, tanto para 10% de cinza, como para 20%, as resistências obtidas são maiores do que a do solo puro, com destaque para a mistura com 10 % de cinza de bagaço de cana-de-açúcar que apresenta um comportamento melhor.

Para a tensão normal de 300 kPa, o solo puro e a mistura com 20% de cinza apresentam resistências maiores que a mistura com 10%, que também é maior do que a resistência apresentada pelo solo puro. A 4 mm de deslocamento, suas resistências praticamente igualam-se, quando, então, a mistura com 20% de cinza passa a apresentar resistências maiores do que o solo puro, mantendo certa constância, com o acréscimo de deslocamento.

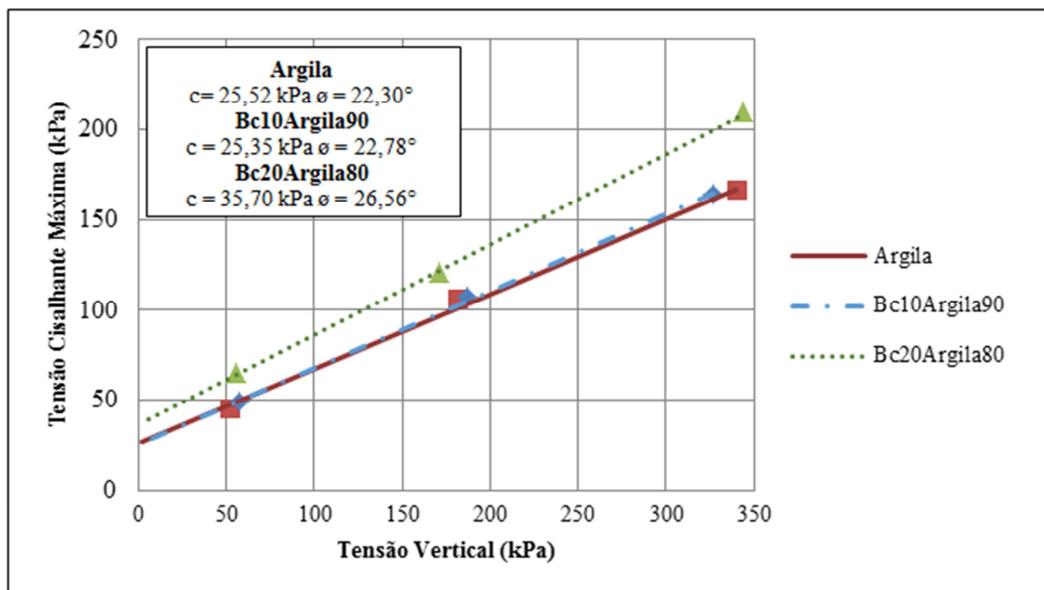
Desse modo, comparando as duas misturas, convém dizer que, de forma geral, para deslocamentos superiores a 8 mm, aproximadamente, a mistura com 20% de cinza de bagaço de cana-de-açúcar foi a que apresentou melhor comportamento, tanto para a tensão de 50 kPa, quanto para a tensão de 300 kPa.

Para a tensão normal de 150 kPa, ambas as misturas apresentam valores de resistência maiores que os do solo puro para praticamente todos os valores de deslocamento. Para deslocamentos superiores, a mistura com 10% de cinza atinge resistências maiores do que o solo e do que a mistura com 20% de cinza.

Para a tensão normal de 150 kPa, o solo puro, para pequenos valores de deslocamento, apresenta um comportamento melhor do que o das duas misturas. Com 9 mm, a mistura de 10% ultrapassa os valores de resistência do solo puro e da mistura de 20% e se mantém constante até o término do ensaio.

As curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal não apresentaram picos de ruptura bem definidos. Dessa forma, para este caso, os pontos de ruptura de cada curva foram determinados dos valores na tensão cisalhante, após um determinado tempo em torno de 13 mm de deslocamento, não só para estas misturas, mas também para o solo puro, de onde foram extraídos os valores das tensões normal e cisalhante.

Segundo o critério de ruptura Mohr-Coulomb, ao se plotarem os pares de dados tensão cisalhante e tensão normal, em um gráfico, obtêm-se os parâmetros de resistência desejados: coesão ( $c$ ) e ângulo de atrito ( $\phi$ ). Com o objetivo de avaliar a influência do teor de cinza, nas misturas, a Figura 13 apresenta a envoltória de ruptura das misturas, variando os teores de cinza.



**Figura 13** Envoltórias de ruptura do solo argiloso puro e com teores de cinza de bagaço de cana-de-açúcar

A Tabela 21 apresenta os valores de coesão e do ângulo de atrito para as misturas estudadas.

**Tabela 21** Parâmetros de Resistência do solo argiloso puro e com teores de cinza de bagaço de cana-de-açúcar

Misturas	c(kPa)	$\phi$ (°)
Argila	25,52	22,30
Bc10Argila90	25,35	22,78
Bc20Argila80	35,7	26,56

Comparando as misturas com 10% e 20% de cinza, pode-se observar que apenas a mistura com 20% possui o comportamento mecânico melhor do que o solo puro, sendo que para a esta mistura há um aumento no ângulo de atrito e na coesão. A mistura com 10% de cinza apresentou praticamente o mesmo comportamento que o solo puro. Isto mostra que, quando misturada com o solo argiloso, a cinza de bagaço de cana-de-açúcar já produz as reações pozolânicas necessárias para a estabilização do solo. Sendo assim, pode-se concluir que, para efeitos de ganho de resistência e estabilidade, não é necessário adicionar grandes quantidades de cinza ao solo. Com relação a coesão, foi observado um aumento desta com o aumento do teor de cinza.

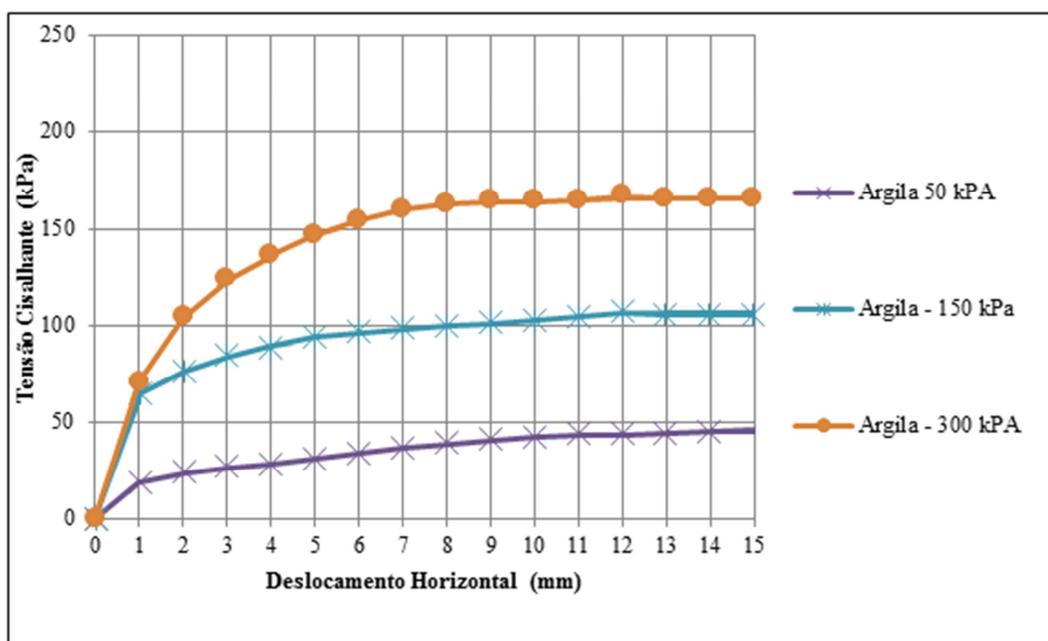
Estudos futuros podem pesquisar mais teores torno de 30% de cinza em peso. Aparentemente, a adição de cinza à mistura pode ser melhorar o comportamento

mecânico do material. Para este tipo de solo a mistura contendo 20% de cinza apresentou o melhor desempenho.

#### 4.2.1.5.

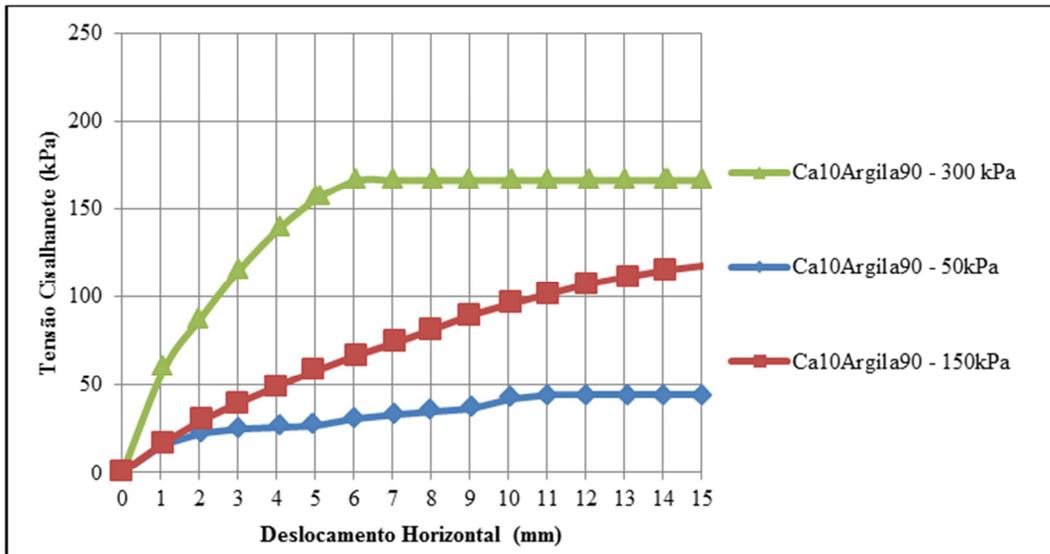
#### Comportamento tensão cisalhante versus deslocamento horizontal em solo argiloso puro e misturas com cinza de casca de arroz

A Figura 14 mostra as curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal para o solo arenoso, obtidas para as tensões de 50, 150 e 300 kPa.

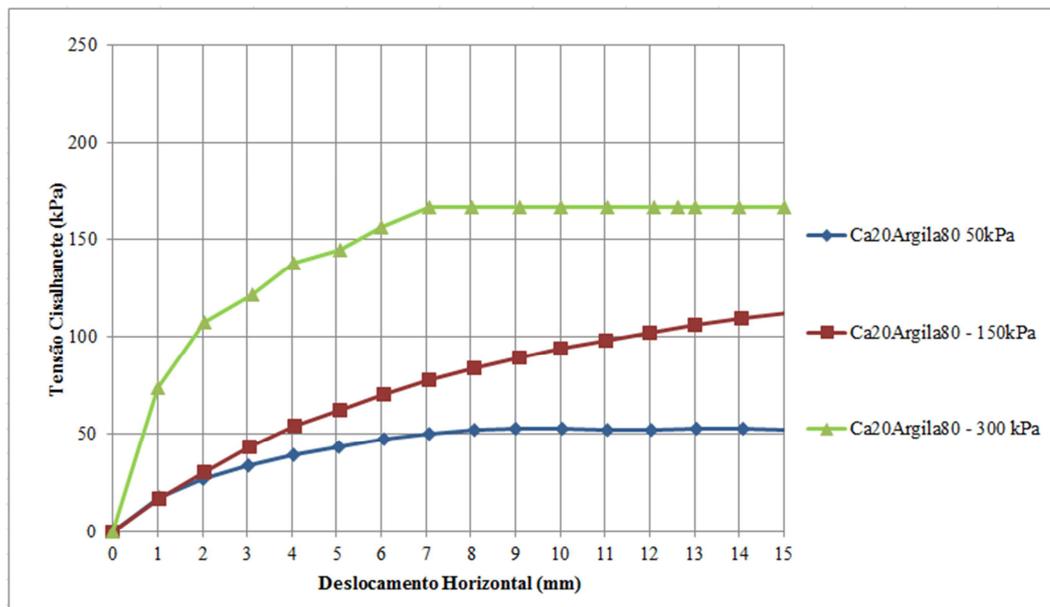


**Figura 14** Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal solo argiloso puro

A Figura 15 e a Figura 16 mostram as curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal para as misturas Ca10Argila90 e Ca20Argila80, respectivamente, submetidas às tensões de 50, 150 e 300 kPa.

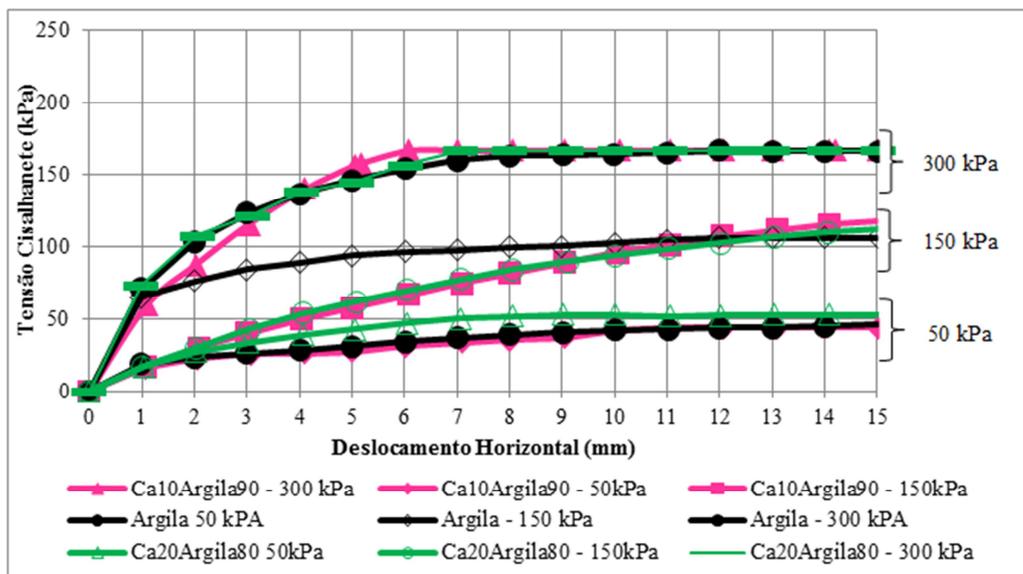


**Figura 15** Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal Ca10Argila90



**Figura 16** Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal Ca20Argila80

A Figura 17 mostra as curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal para o solo puro e solo com misturas entre 0 e 20 % de cinza de casca de arroz, sob as tensões de 50, 150 e 300 kPa.



**Figura 17** Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal do solo argiloso puro e com teores de cinza de casca de arroz

#### 4.2.1.6. Influência do teor de cinza

Pode-se notar que, para a tensão normal de 50 kPa, as misturas com 20% apresentam comportamento melhor do que o solo argiloso puro e melhor do que a mistura com 10% de cinza. Observa-se que a mistura com 10% de cinza de casca de arroz apresentou um comportamento pior do que o do solo puro.

Para a tensão normal de 150 kPa, ambos os teores de cinza, a partir do deslocamento de 12 mm, apresentaram comportamento melhor do que o do solo puro. Sendo que ambas as misturas revelaram um comportamento similar para deslocamentos menores que 12mm, que são menores que a resistência do solo puro.

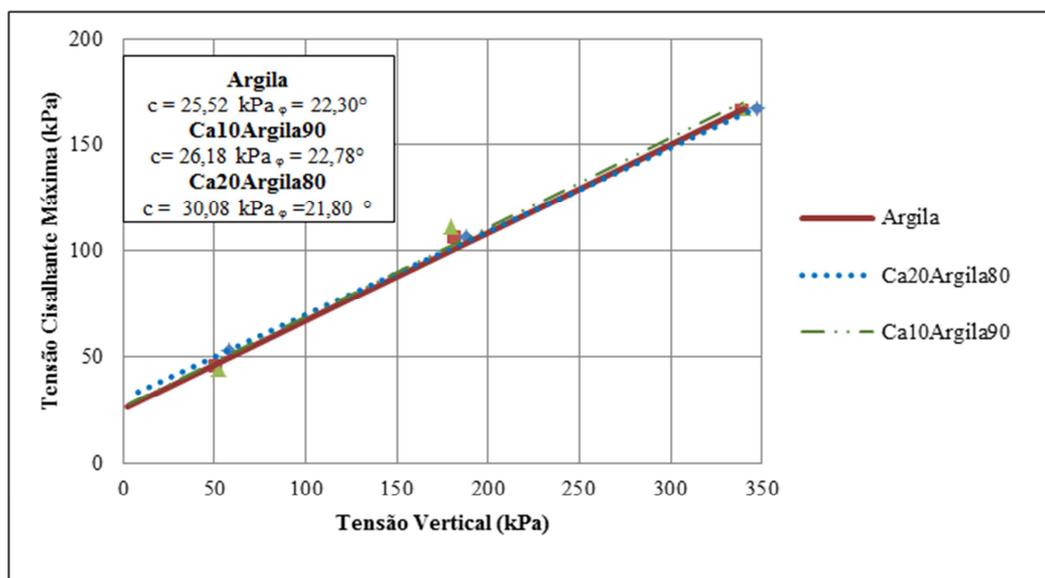
Para a tensão normal de 300 kPa, a mistura com 10% de cinza para valores entre 5 e 6 mm apresenta resistência maior que a mistura com 20% .Entre 1-3 mm, a mistura com 10% de cinza apresenta comportamento inferior ao da mistura com 20% de cinza e também inferior ao do solo puro.

Desse modo, comparando as duas misturas, convém dizer que, de forma geral, para baixas tensões de 50 kPa, a mistura com maior teor de cinza apresentou melhor comportamento. Pode-se observar, também, a ausência de um pico de ruptura bem definido.

Para a tensão normal de 300 kPa, as misturas apresentam o comportamento praticamente igual ao do solo puro.

As curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal não apresentaram picos de ruptura bem definidos. Foram extraídos os valores das tensões normal e cisalhante em torno de 13 mm de deslocamento, não só para essas misturas, mas também para o solo puro.

Segundo o critério de ruptura Mohr-Coulomb, ao se plotarem os pares de dados tensão cisalhante e tensão normal, em um gráfico, obtêm-se os parâmetros de resistência desejados: coesão ( $c$ ) e ângulo de atrito ( $\phi$ ). Com o objetivo de avaliar a influência do teor de cinza, nas misturas, a Figura 18 apresenta a envoltória de ruptura das misturas, variando os teores de cinza.



**Figura 18** Envoltórias de ruptura do solo argiloso puro e com teores de cinza de casca de arroz

A Tabela 22 apresenta os valores de coesão e do ângulo de atrito para as misturas estudadas.

**Tabela 22** Parâmetros de Resistência do solo puro e com teores de cinza de casca de arroz

Misturas	c(kPa)	$\phi$ (°)
Argila	25,52	22,30
Ca10Argila90	26,18	22,78
Ca20Argila80	30,08	21,08

Comparando as misturas com 10% e 20% de cinza, pode-se observar que ambas possuem um comportamento igual ou ligeiramente melhor do que o solo puro. Isto mostra que, quando misturada com o solo argiloso, a cinza de casca de arroz produz as reações pozolânicas necessárias para a estabilização do solo. Com relação ao ângulo de atrito, apenas a mistura com 10 % apresentou acréscimo. Estudos futuros podem pesquisar mais teores, talvez, em torno de 25-30 % de cinza em peso. Aparentemente, a adição de cinza de casca de arroz à mistura acima é benéfica no que diz respeito à coesão e em relação ao ângulo de atrito. A mistura contendo 20 % de cinza pode ser considerada melhor, pois apresenta maior acréscimo de coesão e mesmo não proporcionando um aumento no ângulo de atrito propicia a utilização de uma maior quantidade de resíduo.

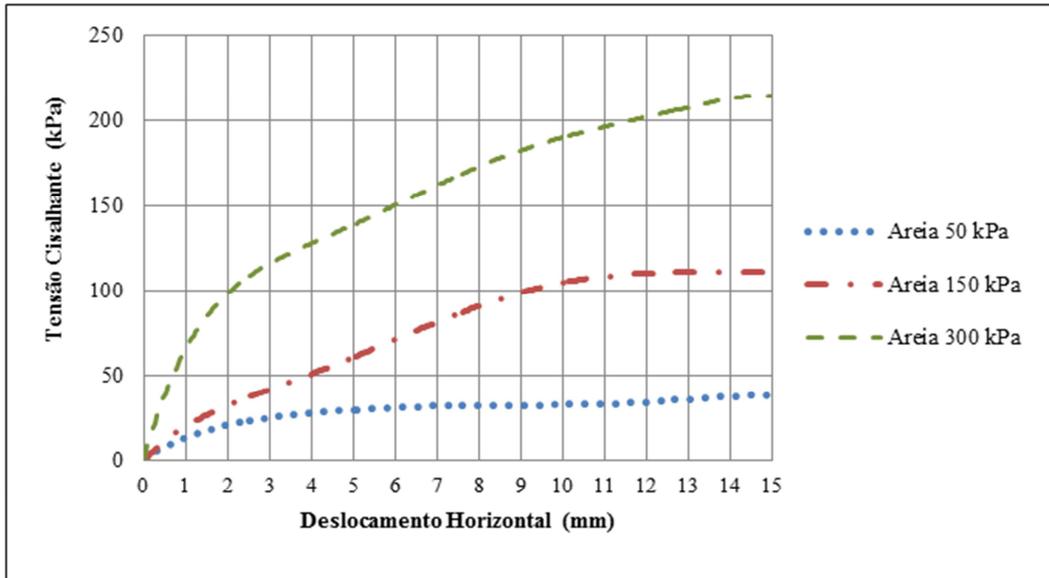
#### **4.2.2. Solo arenoso**

##### **4.2.2.1. Ensaio de cisalhamento**

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados para o solo puro e para as misturas com 5%, 10% e 20% de cinza de bagaço de cana-de-açúcar. O material foi compactado diretamente na caixa de cisalhamento, uma vez que a areia é um material não coesivo, não sendo possível moldá-lo fora do equipamento. Para cada mistura, foram realizados ensaios sob as tensões de 50, 150 e 300 kPa, a fim de se determinar seus parâmetros de resistência ao cisalhamento.

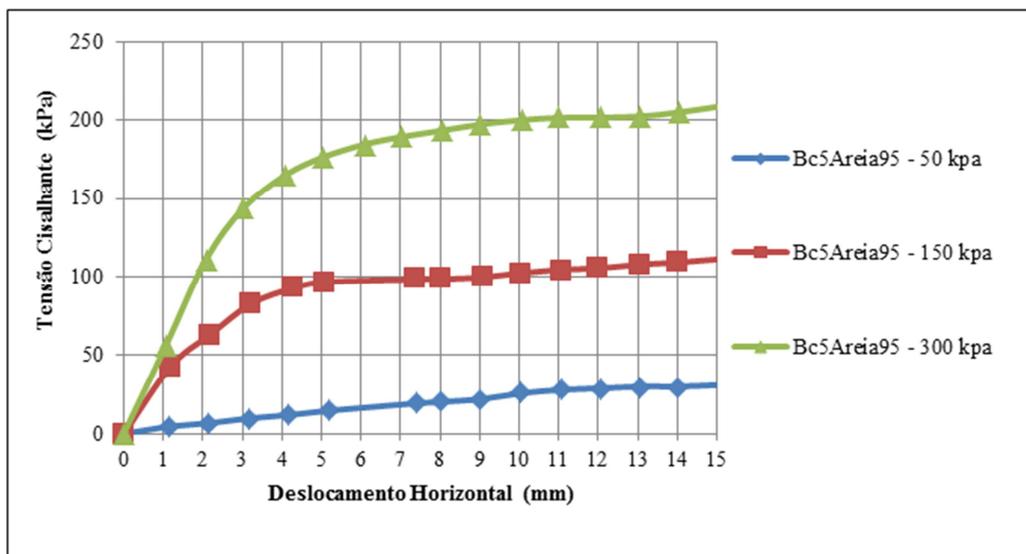
##### **4.2.2.2. Comportamento de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para o solo arenoso puro e misturas com cinza de bagaço de cana-de-açúcar.**

A Figura 19 mostra as curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal para o solo puro, sob as tensões de 50, 150 e 300 kPa.

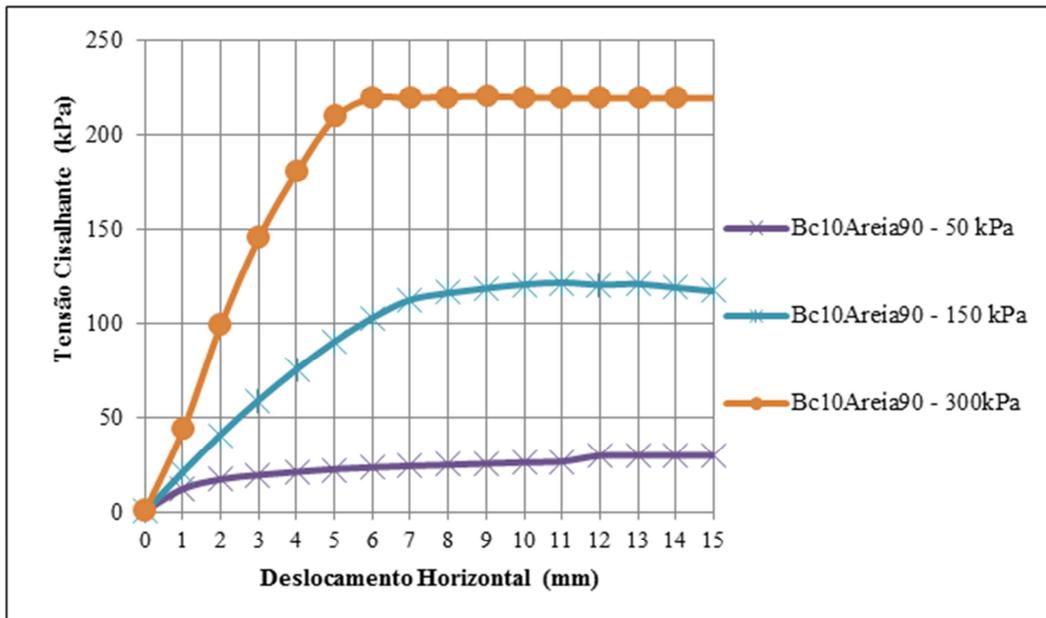


**Figura 19** Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para areia

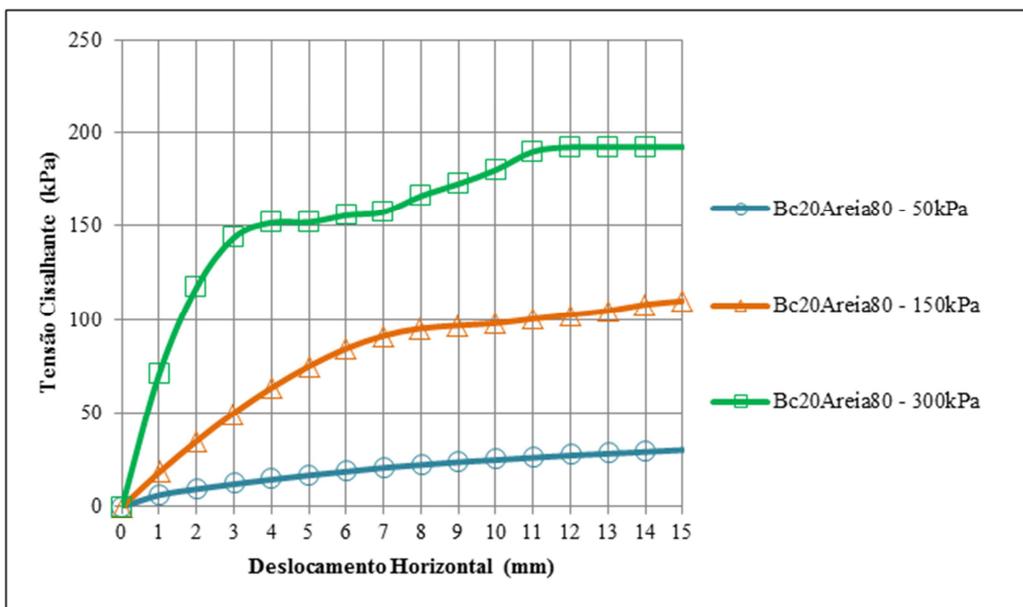
A Figura 20, a Figura 21 e a Figura 22 mostram as curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal para as misturas Bc5Areia95, Bc10Areia90 e Bc20Areia80, respectivamente, submetidas às tensões de 50, 150 e 300 kPa.



**Figura 20** Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para Bc5Areia95

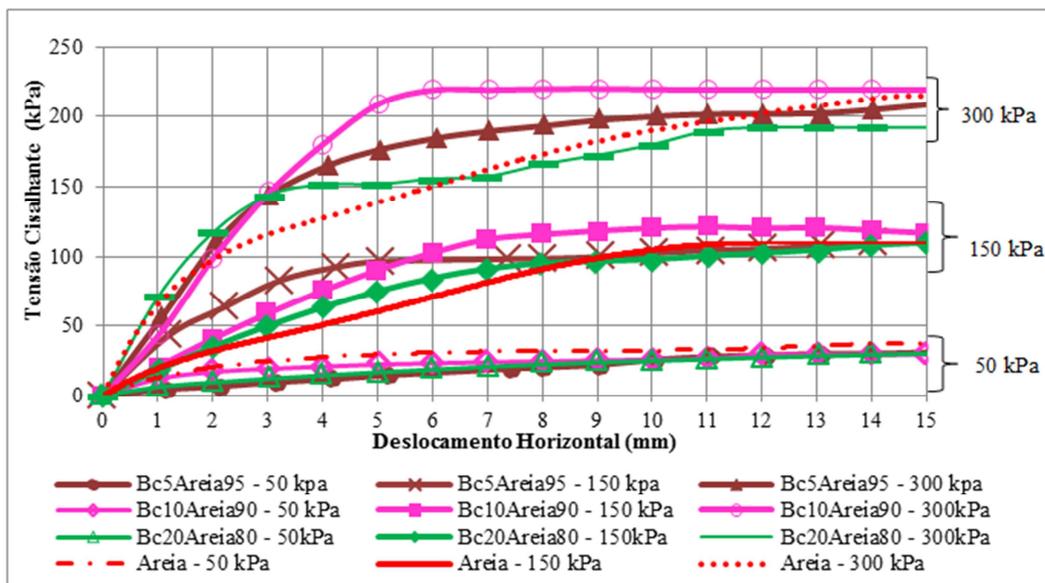


**Figura 21** Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para Bc10Areia90



**Figura 22** Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para Bc20Areia80

A Figura 23 mostra as curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal para o solo arenoso e misturas, obtidas para as tensões de 50, 150 e 300 kPa.



**Figura 23** Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para areia pura e com teores de cinza de bagaço de cana-de-açúcar

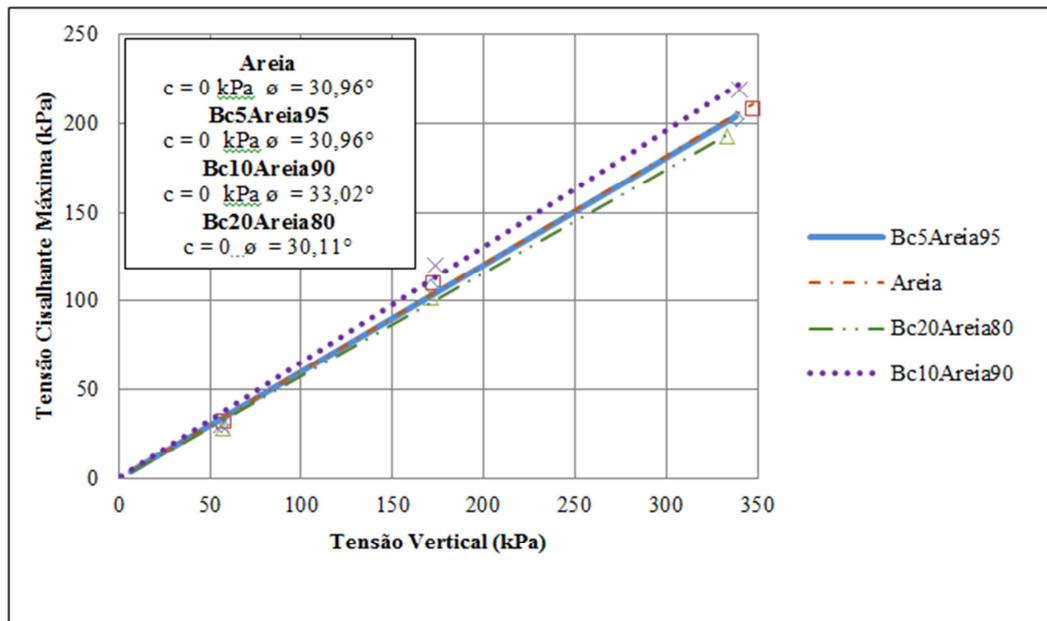
#### 4.2.2.3. Influência do teor de cinza

Para valores de tensão igual a 50 kPa, pode-se dizer que o comportamento das misturas com cinza manteve-se semelhante ao comportamento do solo puro, o que mostra que não ocorreram reações entre a cinza e a areia, considerada material inerte.

Para a tensão de 150 kPa, pode-se dizer que, para deformações de até 7 mm, todos os teores de cinza proporcionaram um acréscimo na resistência, em comparação com o solo puro. A mistura com 10% de cinza apresentou melhor comportamento, quando comparada às outras misturas e ao solo puro.

Para a tensão de 300 kPa, verificou-se que a mistura com 10% apresentou um acréscimo na resistência, tanto comparado com os outros teores de mistura, quanto comparado com o solo puro.

Com o objetivo de avaliar a influência do teor de cinza nas misturas, a Figura 24 e a Tabela 23 apresentam as envoltórias de ruptura das misturas e do solo puro e os parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb.



**Figura 24** Envoltórias de ruptura da areia pura e com teores de cinza de bagaço de cana-de-açúcar

**Tabela 23** Parâmetros de Resistência da areia pura e com teores de cinza de bagaço de cana-de-açúcar

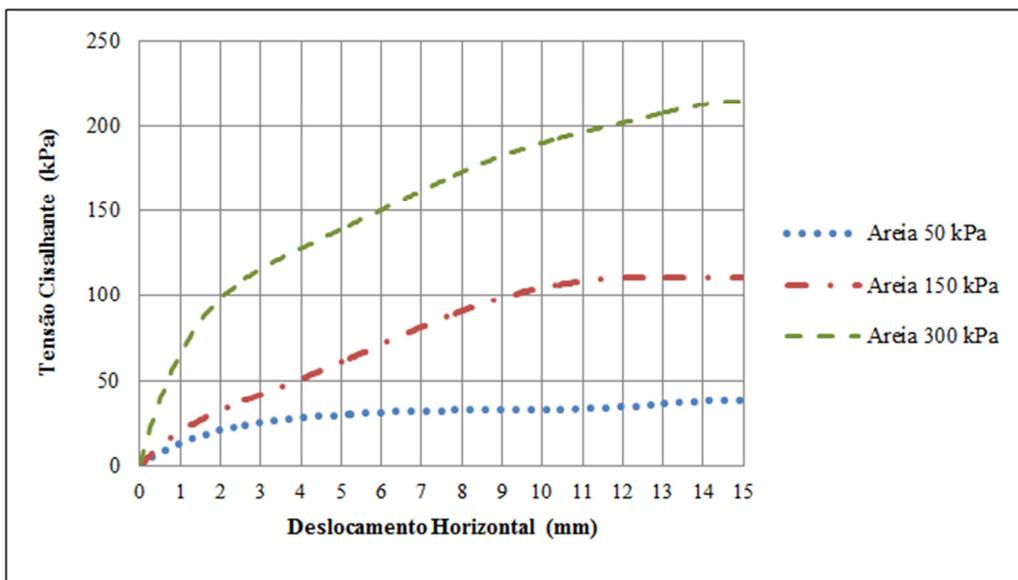
Mistura	c(kPa)	$\phi$ (°)
Areia	0	30,96
Bc5Areia95	0	30,96
Bc10Areia90	0	33,02
Bc20Areia80	0	30,01

A mistura com 5% apresentou o mesmo ângulo de atrito do solo puro, enquanto a mistura com 20 % de cinza de bagaço de cana-de-açúcar apresentou um decréscimo no ângulo de atrito e nenhum acréscimo de coesão. A mistura com 10% foi a que apresentou o maior acréscimo no ângulo de atrito. Este fato confirma que, ao se adicionarem 10% de cinza de bagaço de cana-de-açúcar a este tipo de solo, é possível conferir, a ele, alguma estabilização e, como os resultados foram superiores ao solo puro, vale a pena usar este material, em substituição aos materiais convencionais.

#### 4.2.2.4.

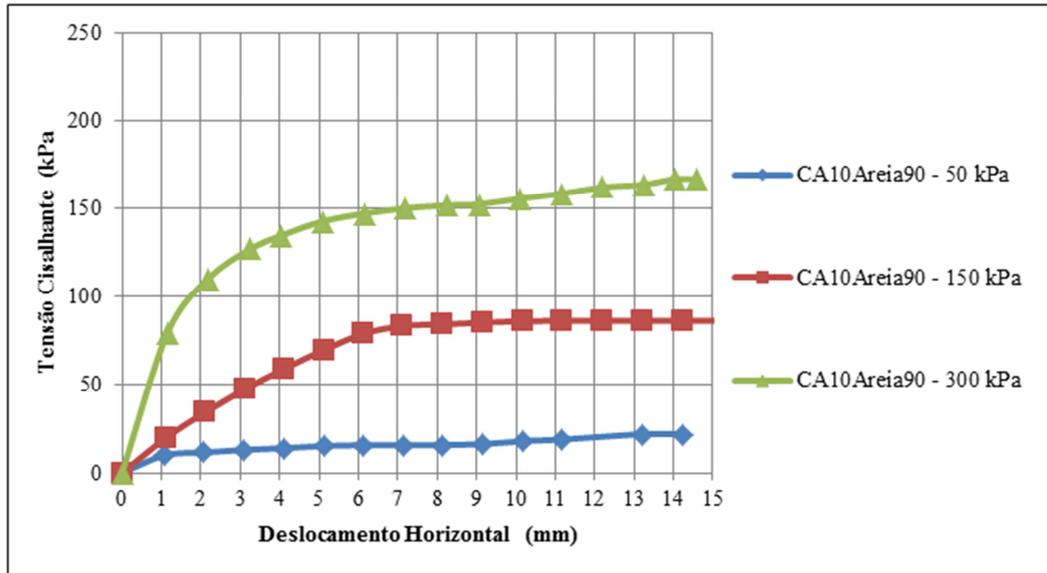
#### Comportamento tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para o solo arenoso puro e misturas com cinza casca de arroz

A Figura 25 mostra as curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal para o solo puro, sob as tensões de 50, 150 e 300 kPa.

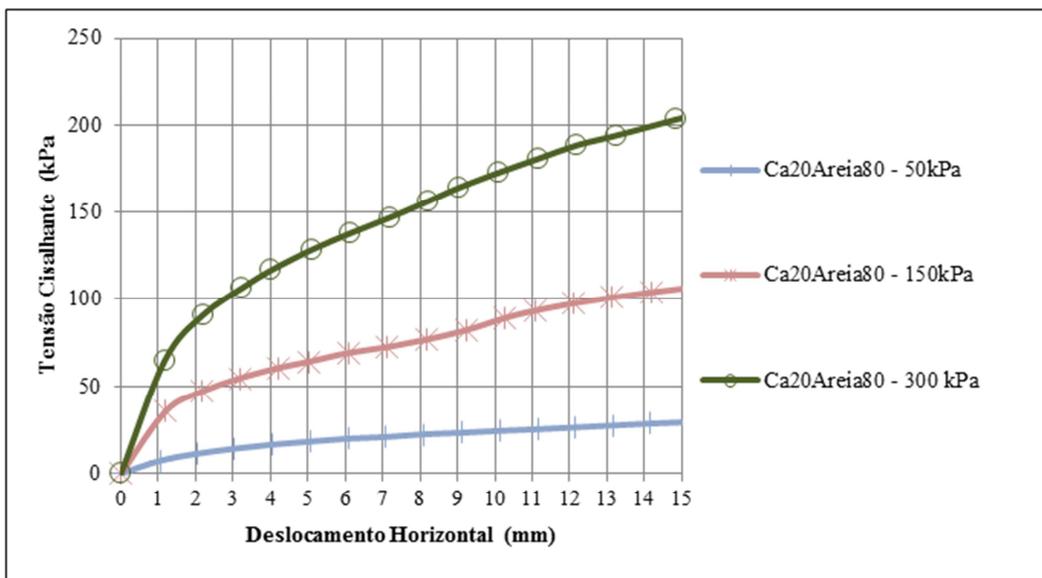


**Figura 25** Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para a areia

A Figura 26 e a Figura 27 mostram as curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal para as misturas Ca10Areia90 e Ca20Areia80, respectivamente, submetidas às tensões de 50, 150 e 300 kPa.

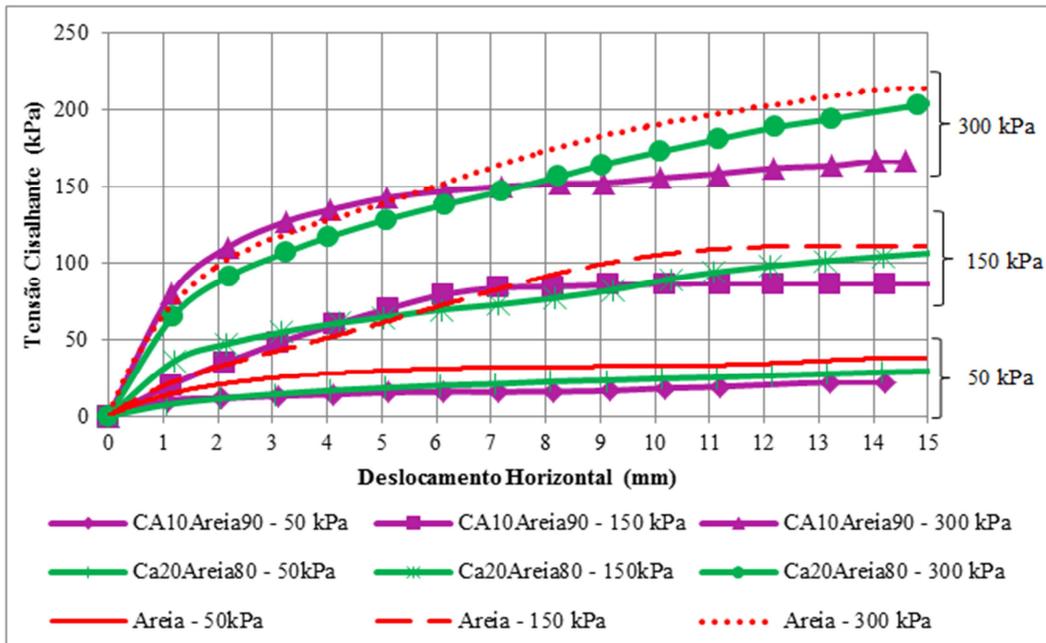


**Figura 26** Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal Ca10Areia90



**Figura 27** Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal Ca20Areia80

A Figura 28 mostra as curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal para o solo arenoso e misturas, obtidas para as tensões de 50, 150 e 300 kPa.



**Figura 28** Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal da areia e de misturas com teores de cinza de casca de arroz

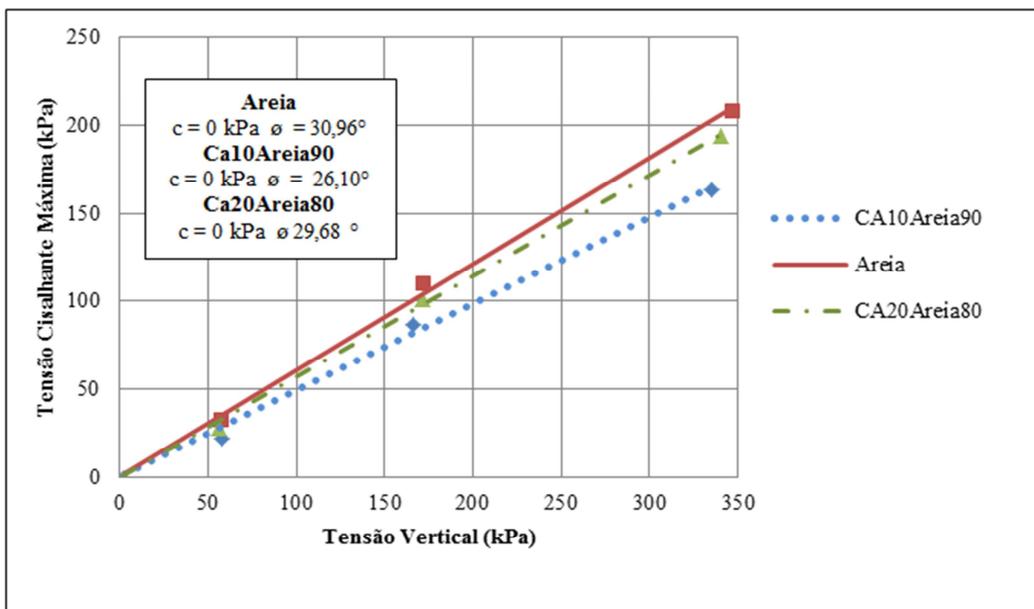
#### 4.2.2.5. Influência do teor de cinza

Para valores de tensão igual a 50 kPa, pode-se dizer que o comportamento das misturas com cinza manteve-se semelhante ao comportamento do solo puro, o que mostra que não ocorreram reações entre a cinza e a areia, considerada material inerte.

Para a tensão de 150 kPa, pode-se dizer que a mistura com 10% de cinza manteve o mesmo comportamento do solo puro até a deformação de 7 mm e comportamento inferior para deformações superiores a 7 mm e que a mistura com 20% de cinza proporcionou um comportamento inferior ao do solo puro. Para deformações de 13 mm, todos os teores de cinza proporcionaram resistência inferior a do solo puro.

Para a tensão de 300 kPa, verificou-se que nenhuma mistura apresentou acréscimo na resistência quando comparada com o solo puro.

Com o objetivo de avaliar a influência do teor de cinza nas misturas, a Figura 29 e a Tabela 24 apresentam as envoltórias de ruptura das misturas e do solo puro e os parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb.



**Figura 29** Envoltórias de ruptura da areia pura e com teores de cinza de casca de arroz

**Tabela 24** Parâmetros de Resistência da areia pura e com teores de cinza de casca de arroz

Mistura	c(kPa)	$\phi$ (°)
Areia	0	30,96
Ca10Areia90	0	26,10
Ca20Areia80	0	29,68

A mistura com 10% de cinza de casca de arroz apresentou um decréscimo no ângulo de atrito e nenhum acréscimo de coesão. A mistura com 20% apresentou praticamente o mesmo ângulo de atrito do solo puro e nenhum ganho de coesão. Nesse caso o melhor teor foi o contendo 20 % de cinza.

Com o intuito de analisar a influência de alguns parâmetros a Tabela 25 e a Tabela 26 apresentam uma comparação entre os resultados desta pesquisa e os resultados de outras realizadas anteriormente com o mesmo solo arenoso e com o mesmo solo argiloso respectivamente.

**Tabela 25** Comparação da variação dos parâmetros de resistência para misturas com solo arenoso

Variáveis	Szeliga (2014)		Meliande (2014)		Santos (2014)			
Tipo de Cinza	Cinza de RSU		Cinza de Carvão Mineral		Cinza de Bc		Cinza Ca	
Quantidade de cinza na mistura (%)	30	40	15	30	10	20	10	20
Teor de SiO <sub>2</sub> (%)	44		57,10		78,34		82,64	
Classificação NBR10.004	Não Inerte		Não Inerte		Inerte		Não Inerte	
Varição da coesão em relação ao solo puro	Aumentou em 9,35 kPa		Igual ao solo puro		Igual ao solo puro		Igual ao solo puro	
Varição do ângulo de atrito em relação ao solo puro	Diminuiu em 4,67 %	Diminuiu em 5,29 %	Diminuiu em 9,2 %	Diminuiu em 7,2%	Aumentou em 6,6 %	Diminuiu em 3,0 %	Diminuiu em 15%	Diminuiu em 4,1 %

**Tabela 26** Comparação da variação dos parâmetros de resistência para misturas com solo argiloso

Variáveis	Meliande (2014)		Quispe (2013)		Santos (2014)			
Tipo de Cinza	Cinza de Carvão Mineral		Cinza de RSU		Cinza de Bc		Cinza Ca	
Quantidade de cinza na mistura (%)	15	30	20	30	10	20	10	20
Teor de SiO <sub>2</sub>	57,10		44		78,34		82,64	
Classificação NBR10.004	Não Inerte		Não Inerte		Inerte		Não Inerte	
Varição da coesão em relação ao solo puro	Aumentou em 130%	Aumentou em 105 %	Aumentou em 143 %	Aumentou em 97%	Igual do solo puro	Aumentou em 39,9 %	Aumentou em 2,6 %	Aumentou em 17,8%
Varição do ângulo de atrito em relação ao solo puro	Diminuiu em 3,4 %	Diminuiu em 4,7 %	Aumentou em 12%	Aumentou em 21%	Aumentou em 2,15%	Aumentou em 19,1 %	Aumentou em 2,15%	Aumentou em 5,47%

Para o solo arenoso a cinza que propiciou maior acréscimo dos parâmetros de resistência foi a cinza de bagaço de cana-de-açúcar. Já para o solo argiloso as misturas com cinza de resíduos sólidos urbanos apresentaram um acréscimo expressivo nos parâmetros de resistência do solo, e em seguida as misturas com cinza de carvão mineral também apresentaram aumentos significativos na coesão, mas em relação ao ângulo de atrito houve uma redução.

Para ambos os tipos de solo não foi possível estabelecer um padrão na comparação realizada, e desta forma, não foi possível concluir qual a variável tem maior influência no aumento ou na diminuição dos parâmetros de resistência dos tipos de solos analisados.

### **4.3. Considerações sobre os resultados**

Os resultados obtidos neste estudo, em geral, mostraram-se satisfatórios e cumpriram os objetivos iniciais propostos, com relação à investigação do comportamento solo-cinza para utilização em obras geotécnicas.

Com relação aos resultados obtidos com o solo arenoso, pode-se dizer que estes não foram tão satisfatórios, como se esperava. A princípio, solos mal graduados e desprovidos de finos, como a areia utilizada nesta pesquisa, não são indicados para processos de estabilização de solos, uma vez que o maior volume de vazios das partículas e o menor número de contatos entre elas tendem a dificultar o processo de cimentação, como afirma Nardi (1975). Dessa forma, o emprego das cinzas, nas misturas com este solo, foi justamente para substituir a fração fina do solo.

Em relação à cinza de bagaço de cana-de-açúcar, para solo argiloso a mistura com 20% apresentou melhores resultados nos parâmetros de resistência, sendo praticamente igual ao solo puro e apresentando um ganho de coesão. O mesmo foi observado por Amaral (2014) que verificou que a resistência à compressão em mistura solo-cimento e cinza de bagaço de cana aumentava com o aumento da quantidade de resíduo de cinza. Valenciano et al (2004) verificaram que a resistência à compressão simples, em misturas de solo-cimento cinza, diminuía com o aumento da porcentagem de cinza das misturas.

Para a utilização da cinza de casca de arroz, pode-se considerar a porcentagem de 20 % como a melhor porcentagem estudada, em misturas com solo argiloso uma vez que

os parâmetros de resistência apresentados por essas misturas foram quase iguais ou superiores aos do solo puro, com maior porcentagem de resíduo utilizado. Basha et al (2005) verificaram que, em mistura solo-cimento-cinza, essas mesmas misturas, contendo até 20% de cinza de casca de arroz em substituição ao cimento, não proporcionaram diminuição da resistência à compressão simples.

O teor de  $\text{SiO}_2$  influencia diretamente no aumento dos parâmetros de resistência, pois ele é um dos compostos responsáveis pela ocorrência das reações pozolânicas.