

Análise do Comportamento de Misturas de Areia e Solo Argiloso com Cinza Volante de Carvão Mineral e Cal para Aplicações Geotécnicas

Amanda Maria Chrispim Meliande
PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, chrispimamanda@gmail.com

Michéle Dal Toé Casagrande
PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, michele_casagrande@puc-rio.br

RESUMO: Apresenta-se o estudo experimental do comportamento de misturas de areia e solo argiloso com teores variados de cinza volante, provenientes do processo de queima de carvão mineral no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, localizado no município Capivari de Baixo, no estado de Santa Catarina. O objetivo da presente pesquisa consiste em avaliar a aplicabilidade do uso de misturas com diferentes teores de materiais em obras geotécnicas, como camadas de aterros sanitários, solos de fundação e estabilização de taludes. Foram realizados ensaios de caracterização física (análise granulométrica, densidade real dos grãos, limites) e mecânica (ensaio de compactação e ensaios de cisalhamento direto). Os ensaios de cisalhamento em amostras de areia foram realizados para uma densidade relativa de 50% e umidade ótima de 10%, com teores de cinza volante de 15 e 30% em relação ao peso seco do solo, definidos com base no estudo de trabalhos anteriores. Já para as misturas com solo argiloso, os ensaios foram realizados em amostras compactadas na umidade ótima e no peso específico seco máximo correspondente, também com teores de cinza volante de 15% e 30% em relação ao peso seco do solo. A fim de estudar a influência da cal nas misturas com areia e solo argiloso, adicionou-se 3% de cal em substituição ao peso seco da cinza. Os resultados mostraram-se mais satisfatórios para as misturas com solo argiloso, que apresentaram uma maior resistência ao cisalhamento, evidenciada pelo aumento considerável dos seus parâmetros coesão e ângulo de atrito interno, quando comparadas às misturas com areia. Com a adição de cal, as misturas com solo argiloso, em comparação às misturas com areia, também foram as que apresentaram um comportamento melhor, resultante do incremento das reações pozolânicas entre a cal e os demais materiais constituintes das misturas. Desse modo, este estudo permitiu constatar a viabilidade do emprego da cinza volante de carvão em misturas com solos preferencialmente argilosos para a aplicação em obras geotécnicas, como camadas de aterros sanitários e aterros sobre solos moles, dando um fim mais nobre a este material.

PALAVRAS-CHAVE: cinza volante, areia, solo argiloso, cal, aplicações geotécnicas

1 INTRODUÇÃO

A tentativa do uso diversificado de rejeitos industriais tem sido uma preocupação constante em vários países, o que tem motivado o desenvolvimento de novas técnicas de aproveitamento deste tipo de material.

As cinzas de carvão mineral encontram-se no grupo de rejeitos industriais e costumam ser

amplamente aplicadas como agentes estabilizantes de solo. Elas são adicionadas ao solo quando este, por si só, não possui parâmetros de resistência adequados para sua utilização na Engenharia Geotécnica, ou quando o objetivo é melhorá-los de forma significativa, acrescentando outro produto cimentante como cal ou cimento (Nardi, 1975).

O presente trabalho busca analisar a influência

da adição de cinza volante e cal em dois tipos de materiais. Essa cinza constitui um resíduo fino proveniente do processo de queima de carvão mineral no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, no município Capivari de Baixo, no estado do Rio Grande do Sul. As bacias de sedimentação são utilizadas para a disposição final deste resíduo, descartado a céu aberto, podendo ocasionar problemas com grande risco ambiental. Dessa forma, o reaproveitamento deste resíduo para diversos fins tem sido de grande importância, reduzindo os impactos ambientais e os custos de disposição em bacias de sedimentação.

2 METODOLOGIA

O programa experimental deste trabalho consiste em duas etapas: na primeira, inicialmente foram definidas as porcentagens de cinza e cal adotadas para as misturas, com base na pesquisa realizada por Lopes (2011), que utilizou a mesma cinza. Posteriormente, foram realizados ensaios de caracterização física dos materiais (areia, solo argiloso, cinza volante, misturas destes com a cal), com o objetivo de conhecer a granulometria dos mesmos e obter os valores de densidade real dos grãos.

Para a areia e as misturas contendo areia, também foram realizados ensaios de compactação com o objetivo de determinar os índices de vazios, com base na densidade relativa de 50%.

Na segunda etapa, foram realizados ensaios de caracterização mecânica (ensaios de compactação e ensaios de cisalhamento direto).

2.1 Materiais

2.1.1 Areia

O areia utilizada neste estudo foi coletada na Praia da Barra, no município do Rio de Janeiro/RJ. O local da coleta foi escolhido em função da presença de uma areia e granulometria fina, como mostra a Figura 1.



Figura 1. Areia.

2.1.2 Solo argiloso

O material foi retirado Campo Experimental II da PUC-Rio de uma profundidade de aproximadamente 2 metros a partir da superfície da encosta, sendo que ele foi escolhido para esta pesquisa em função de o local de retirada ser de fácil acesso e de haver muitos trabalhos na literatura com o seu estudo. A Figura 2 mostra o seu aspecto.



Figura 2. Solo argiloso.

2.1.3 Cinza volante

A cinza volante (Figura 3) utilizada neste estudo é proveniente do processo de queima do carvão mineral no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, situado no município Capivari de Baixo, no estado de Santa Catarina.



Figura 3. Cinza volante.

2.1.4 Cal

A cal utilizada nas misturas é a cal hidratada calcítica, conhecida comercialmente por “cal hidratada Itaú”. As suas características físicas e químicas encontram-se especificadas na norma NBR 7175 – Cal hidratada para argamassas.

2.1.5 Misturas

Tanto para as misturas com areia como para as misturas com solo argiloso, foram utilizados os teores de 15% e 30% de cinza volante, a fim de determinar o “teor ótimo” deste material, capaz de proporcionar às misturas uma melhoria dos parâmetros de resistência.

O teor de cal utilizado foi arbitrado em 3%, em substituição ao peso seco das cinza, tendo sido escolhido com base no trabalho realizado por Lopes (2011).

A Tabela 1 apresenta os teores de cada material utilizado nas misturas, assim como as siglas que as descrevem.

Tabela 1. Teores e símbolos utilizados para os materiais.

Material/ Mistura	Solo (%)	Cinza volante (%)	Cal (3%)	Símbolo
Areia	100	-	-	A
Solo argiloso	100	-	-	S
Mistura 1	85	15	-	A85/CV15
Mistura 2	70	30	-	A70/CV30
Mistura 3	85	12	3	A85/CV12/C3
Mistura 4	70	27	3	A70/CV27/C3
Mistura 5	85	15	-	S85/CV15
Mistura 6	70	30	-	S70/CV30
Mistura 7	85	12	3	S85/CV12/C3
Mistura 8	70	27	3	S70/CV27/C3

2.2 Métodos e procedimentos de ensaio

2.2.1 Ensaios de caracterização física

Os ensaios de caracterização física das amostras de solo foram realizados no intuito de se determinar as suas propriedades-índice, e envolveram os ensaios de análise granulométrica e densidade real dos grãos. Todos estes ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio, e seguiram as metodologias prescritas nas normas a seguir:

- NBR 6457/1986 – Amostras de Solos – Preparação para ensaios de compactação e caracterização;
- NBR 7181/1984 – Análise granulométrica;
- NBR 6508/1984 – Determinação da densidade real dos grãos;
- NBR 6459 (1984) – Solo – Determinação do limite de liquidez;
- NBR 7180 (1984) – Solo – Determinação do limite de plasticidade.

2.2.2 Ensaios de caracterização mecânica

Os ensaios de caracterização mecânica compreenderam os ensaios de compactação e os ensaios de cisalhamento direto.

Os ensaios de compactação foram realizados para o solo puro e as misturas com os teores de 12%, 15%, 27% e 30% de cinza volante, com a finalidade de determinar a umidade ótima de compactação e o peso específico seco máximo dos materiais. Esses ensaios seguiram as metodologias da norma NBR 7182 (1986), utilizando-se a energia de compactação Proctor Normal e com reuso de material.

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados para a areia, o solo argiloso e as misturas correspondentes, com o objetivo de determinar a resistência ao cisalhamento através da obtenção dos parâmetros coesão e ângulo de atrito, sendo os procedimentos para a sua execução descritos na norma ASTM D 3080/2004.

Para a confecção dos corpos de prova da areia e das misturas relacionadas, a compactação do material foi realizada diretamente na caixa de cisalhamento, uma vez que a areia é um

material não coesivo, não sendo possível moldá-lo fora do equipamento. O teor de umidade utilizado no processo de compactação foi de 10%, sendo esta realizada manualmente, de maneira uniforme, e de modo que a areia não ficasse muito densa. Com o auxílio de um gabarito, foi possível ajustar a altura do material na caixa de cisalhamento. A Figura 4 mostra a moldagem do corpo de prova arenoso para o ensaio de cisalhamento.



Figura 4. Processo de moldagem do corpo de prova arenoso.

Para a confecção dos corpos de prova do solo argiloso e das suas misturas, primeiramente, compactou-se um corpo de prova cilíndrico na energia Proctor Normal com umidade ótima e peso específico seco máximo obtidos por meio dos ensaios de compactação. Em seguida, moldaram-se 3 corpos de prova para o ensaio de cisalhamento direto. Na Figura 5 observa-se o processo de moldagem do corpo de prova argiloso.



Figura 5. Processo de moldagem do corpo de prova argiloso.

As tensões normais aplicadas para os corpos de prova com areia foram de 50, 150 e 300 kPa. Para as misturas com solo argiloso, utilizou-se 200 kPa ao invés de 150 kPa. Através do gráfico da Tensão Cisalhante Máxima x deslocamento horizontal, determinaram-se as envoltórias de ruptura e os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo. A Figura 6 ilustra o equipamento de cisalhamento direto utilizado na presente pesquisa.

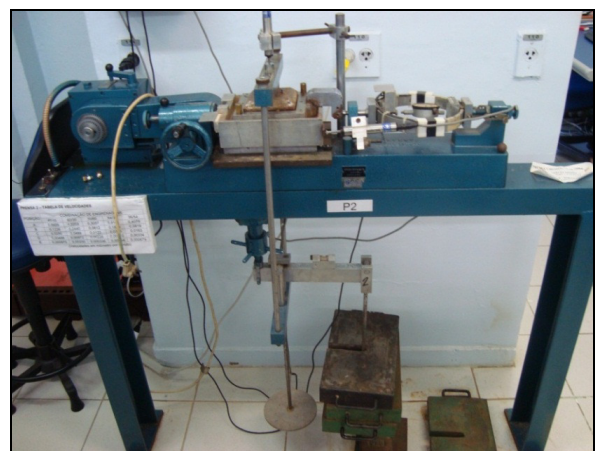


Figura 6. Prensa utilizada nos ensaios de cisalhamento.

3 RESULTADOS

3.1 Ensaios de caracterização física

3.1.1 Densidade real dos grãos

Os resultados para a areia e suas misturas encontram-se na Figura 7, enquanto os resultados obtidos para o solo argiloso e suas misturas estão apresentados na Figura 8. Através das figuras, é possível observar uma

redução da densidade real dos grãos com o aumento dos teores de cinza, sendo essa redução mais acentuada para as misturas com o solo argiloso.

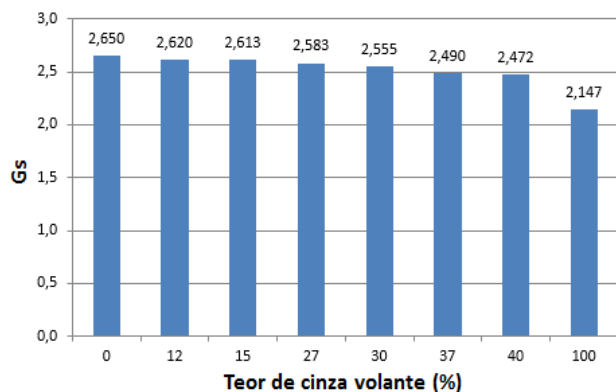


Figura 7. Variação da densidade real dos grãos com o teor de cinza de volante para as misturas com areia.

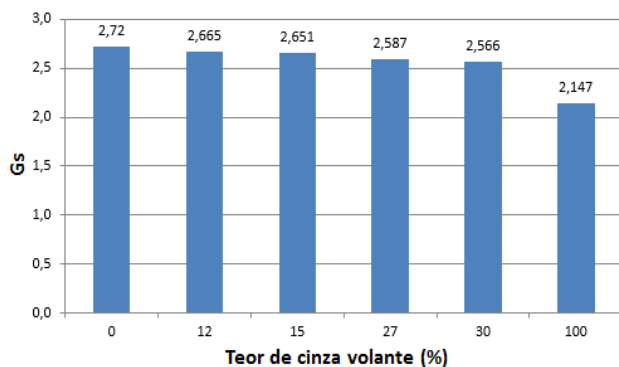


Figura 8. Variação da densidade real dos grãos com o teor de cinza de volante para as misturas com solo argiloso.

Lopes (2011) e Ubaldo (2005) encontraram os valores de 2,105 e 2,090 para a mesma cinza, coletada da mesma usina termelétrica, sendo eles bem próximos ao valor encontrado na presente pesquisa, de 2,147. Ainda que os valores obtidos por esses últimos autores sejam bem parecidos, ressalta-se que a ligeira diferença entre eles já demonstra a influência da variabilidade da qualidade e das propriedades da cinza sobre os resultados, devido a fatores como a composição química do carvão.

3.1.2 Caracterização granulométrica

A Figura 9 apresenta as curvas granulométricas da areia e suas misturas, e a Figura 10 mostra as curvas granulométricas do solo argiloso e suas misturas.

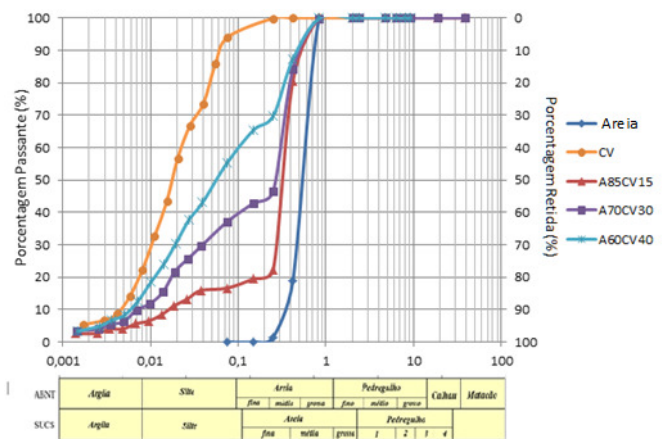


Figura 9. Curvas granulométricas da areia, da cinza volante e das suas misturas.

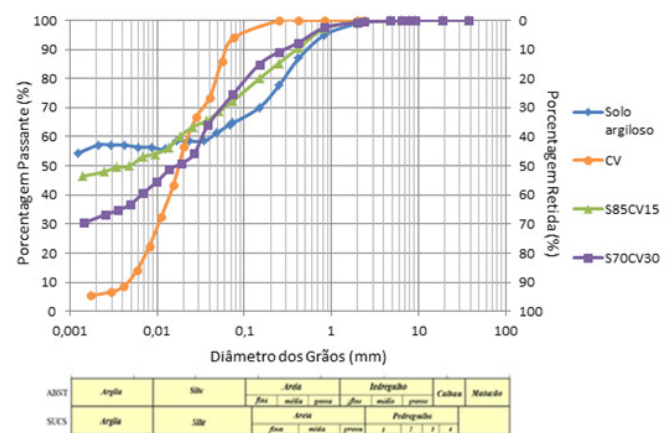


Figura 10. Curvas granulométricas do solo argiloso, da cinza volante e das suas misturas.

Pode-se observar que a cinza volante (CV) apresenta elevado teor de finos em sua composição, o que corresponde à granulometria silte, além de uma fração de areia de granulometria fina. Desse modo, ela é classificada de acordo com o Sistema SUCS como silte de baixa plasticidade (ML). Rohde et al (2006) encontrou esta mesma classificação para esta cinza, que é a classificação típica das cinzas volantes de usinas termelétricas do sul do Brasil.

Quanto à granulometria das misturas com areia e solo argiloso, pode-se dizer que ela se torna intermediária às granulometrias dos materiais puros, sendo que quanto maior o teor de cinza nas misturas, mais evidente se torna a presença da fração silte, acarretando na redução das demais frações (areia e argila).

3.1.3 Limites de Atterberg

Para o solo argiloso, foram obtidos os valores de 53% e 39% para os limites de liquidez e plasticidade, respectivamente, resultando em um índice de plasticidade de 14%. De acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), normatizado pela ASTM D 2487 (1983), o solo em estudo é classificado como CH, correspondendo a uma argila arenosa de média plasticidade.

Em virtude de a cinza volante apresentar uma granulometria com alto teor de material granular, sendo isenta de características plásticas, não foi possível determinar os seus limites de Atterberg. Ressalta-se que Ubaldo (2005) também a classificou como materiais não plásticos.

3.2 Ensaios de caracterização mecânica

3.2.1 Ensaios de compactação

As curvas de compactação das misturas com solo argiloso na ausência e na presença de cal estão dispostas nas Figuras 11 e 12, respectivamente. Pode-se notar que ocorre uma redução não só do peso específico seco máximo como também da umidade ótima à medida que o teor de cinza se eleva, sendo esse fato observado tanto nas misturas sem cal, como nas misturas com cal.

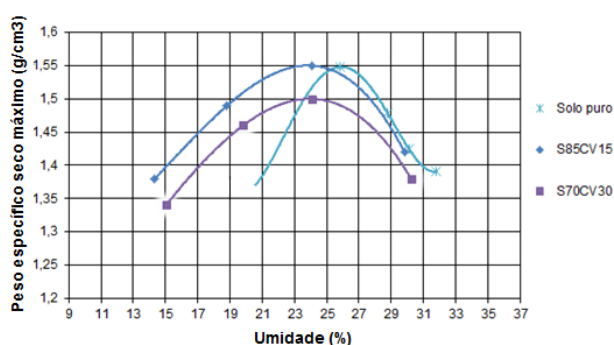


Figura 11. Curvas de compactação do solo puro e das misturas sem a adição de cal.

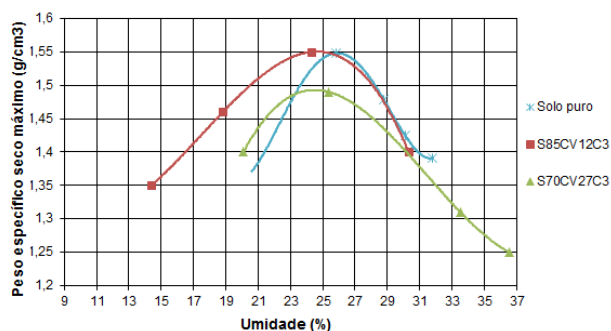


Figura 12. Curvas de compactação do solo puro e das misturas com a adição de cal.

3.2.2 Ensaios de cisalhamento direto

A Figura 13 apresenta o comportamento da tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para a areia e as misturas com cinza volante. O comportamento obtido para as misturas com cal pode ser observado na Figura 14. Como as curvas não apresentaram pontos de ruptura bem definidos, eles foram determinados com base na observação de uma constância dos valores de tensão cisalhante máxima após um determinado tempo. Assim, para a obtenção dos parâmetros de resistência, os dados foram coletados a 12 mm de deslocamento.

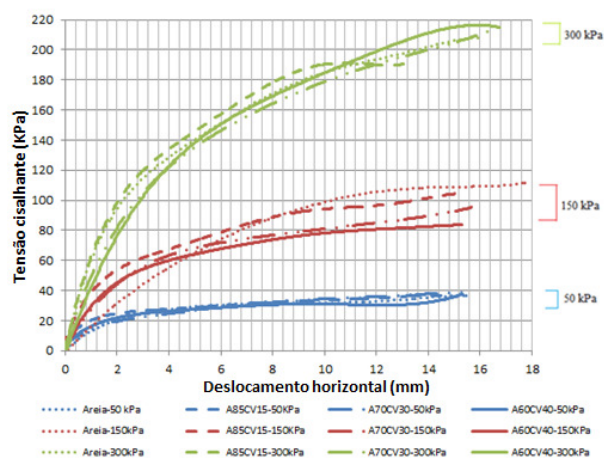


Figura 13. Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal da areia e das misturas com cinza.

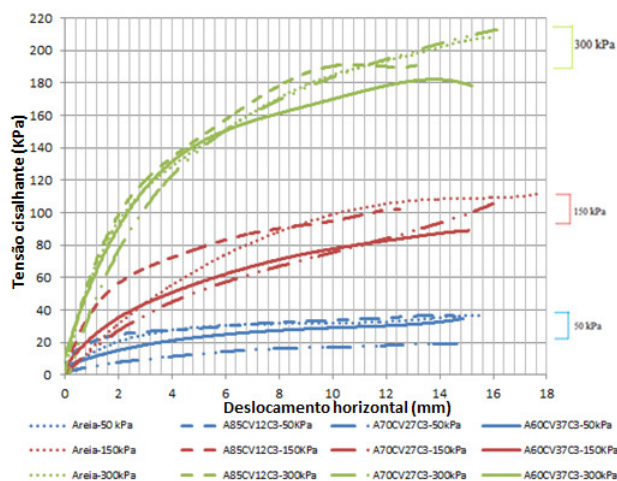


Figura 14. Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal da areia e das misturas com cal.

Analisando-se a influência do teor de cinza nas misturas com areia e cinza (Figura 15), pode-se dizer que todas as misturas apresentaram comportamento semelhante, devido à similaridade existente entre as curvas granulométricas dessas misturas. Além de semelhantes, foram inferiores à areia, o que confirma que, ao se adicionar somente cinza volante a este material, não é possível conferir a ele alguma estabilização.

Nas misturas com cal (Figura 16), observa-se que a areia também mantém um comportamento melhor do que as misturas, o que pode ser explicado pelo fato de ainda não terem ocorrido as reações pozolânicas, sendo necessário um período de cura para que elas ocorram.

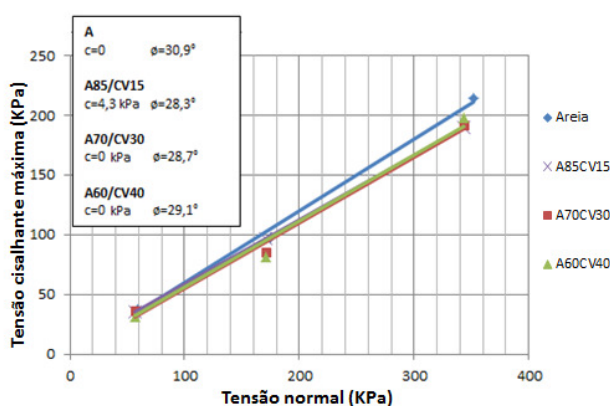


Figura 15. Influência do teor de cinza nas misturas com areia e cinza.

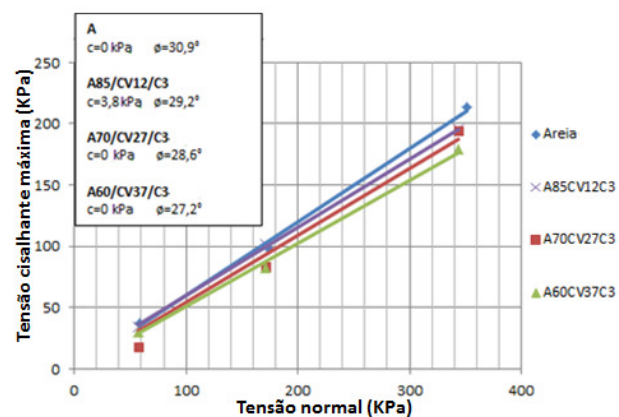


Figura 16. Influência do teor de cinza nas misturas com areia, cinza e cal.

O comportamento da tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para o solo argiloso e as misturas com cinza volante é apresentado na Figura 17. Para as misturas com cal, esse comportamento pode ser observado na Figura 18. Com exceção da mistura S70/CV30, as demais misturas não apresentaram picos de ruptura bem definidos, tendo sido os dados coletados a 12 mm de deslocamento.

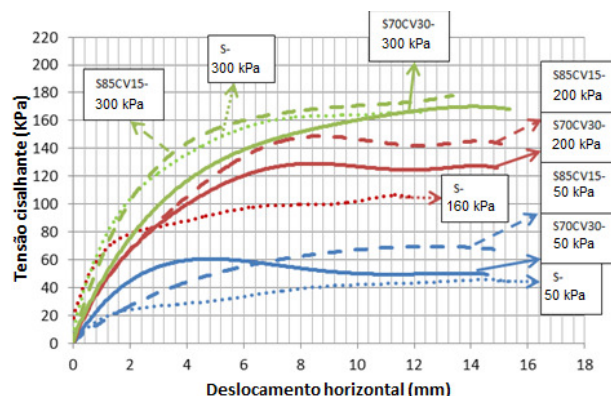


Figura 17. Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal do solo argiloso e das misturas com cinza.

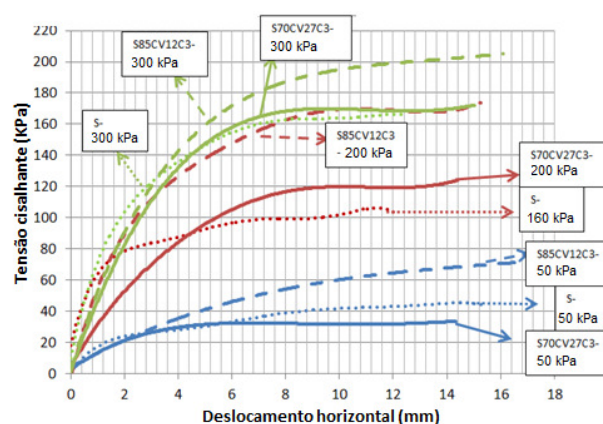


Figura 18. Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal do solo argiloso e das misturas com cal.

As Figuras 19 e 20 mostram as envoltórias de resistência para as misturas sem cal e com cal, respectivamente.

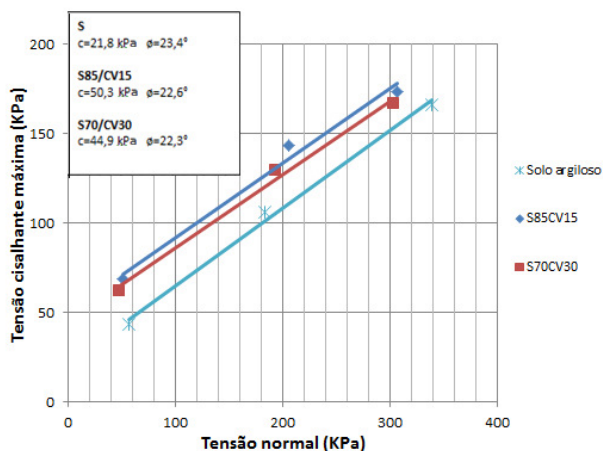


Figura 19. Influência do teor de cinza nas misturas com solo argiloso e cinza.

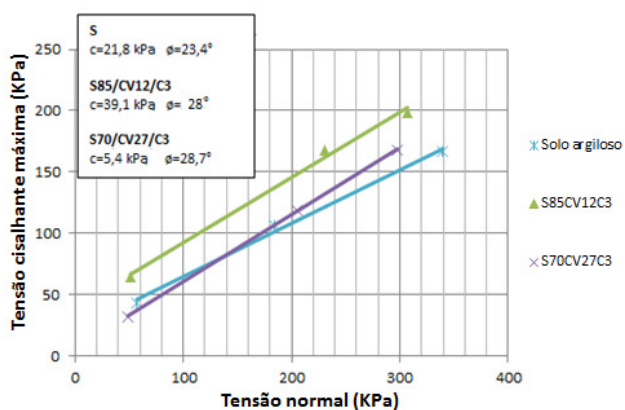


Figura 20. Influência do teor de cinza nas misturas com solo argiloso, cinza e cal.

As figuras mostram que ambas as misturas com cinza obtiveram um comportamento superior ao solo puro, com destaque para a mistura S85/CV15, que apresentou um ganho considerável na coesão, devido às características cimentantes conferidas pela cinza. Quanto às misturas com cal, pode-se dizer que a mistura S85/CV12/C3 obteve melhores parâmetros de resistência, o que permite concluir que, para efeitos de ganho de resistência e estabilidade, não é necessário adicionar grandes quantidades de cinza a este solo.

4 CONCLUSÕES

Os resultados permitiram concluir que o uso da

cinza volante com o solo argiloso foi mais benéfico, uma vez que provocou um aumento considerável dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, não só para as misturas solo-cinza, mas também para as misturas solo-cinza-cal. Esse aumento pode ser explicado pelo incremento das reações ocorridas entre os minerais do solo argiloso e os demais materiais constituintes das misturas. Com relação às misturas com areia, cujo objetivo era analisar o papel das cinzas e da cal, as misturas apresentaram resultados iguais ou inferiores à areia, o que pode ter ocorrido em função de a areia ser proveniente de região de praia, contendo sal em sua composição, que pode ter inibido a ocorrência de reações pozolânicas entre a cinza e a cal.

AGRADECIMENTOS

À CAPES pelo apoio concedido para a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Lopes, L.S.E. (2011) *Análise do comportamento mecânico e ambiental de misturas solo-cinzas de carvão mineral para camadas de bases de pavimentos*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 206 p.
- Nardi, J.V. (1975) *Estabilização de areia com cal e cinza volante; efeito do cimento como aditivo e de brita na mistura*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 179 p.
- Rohde, G.M.; Zwonok, O.; Chies, F.; Silva, N.I.W. (2006) *Cinzas de carvão fóssil no Brasil – aspectos técnicos e ambientais*, Vol.1, CIENTEC, Porto Alegre, 202 p.
- Ubaldo, M.O. (2005) *Uso de cinzas de carvão na composição de uma cobertura de rejeitos de mineração*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 170 p.