

5

Conclusões e Sugestões para Futuros Trabalhos

5.1. Conclusões

Os resultados apresentados e analisados no Capítulo anterior possibilitaram as conclusões abordadas no presente capítulo.

A adição das cinzas, tanto de fundo como volantes, no solo estudado, com e sem a adição de cal, proporcionaram a melhoria em grande parte das propriedades mecânicas do material. Comprovou-se que a utilização das cinzas de carvão mineral em misturas com solo para aplicação em base de pavimentos é benéfico, não somente para o Meio Ambiente, como para a Engenharia dos Pavimentos, uma vez que um solo inapropriado para pavimentação passou a condição de adequado para tal finalidade.

As principais contribuições relacionadas à adição de cinzas de carvão mineral ao solo são apresentadas a seguir:

- As análises realizadas no solo o classificaram como do tipo SM (areia siltosa), pela classificação SUCS, já pela AASHTO, pertence ao grupo A-2-4 (areia siltosa), o que o enquadra como material pouco recomendado para base de pavimentos;
- Os resultados da composição química das cinzas de fundo e volantes e das misturas com adição de cal apresentaram elevados teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , além de baixos teores de matéria orgânica nas misturas com adição de cal. Os dois fatores em conjunto são positivos para a ocorrência das reações pozolânicas, que integram o processo de estabilização química do solo.
- Nos ensaios ambientais – solubilização e lixiviação realizado nas cinzas, os resultados foram positivos. A cinza volante classificada como resíduo da *Classe II B – Resíduo Inerte*, já a Cinza de Fundo como *Classe II A – Resíduo Não Inerte*. A cinza volante somente recebeu tal classificação devido ao ensaio de solubilização, onde apresentou teores de Alumínio, Fluoretos e Fenóis Totais levemente superiores aos valores sugeridos por norma.
- Quanto aos ensaios de compactação foi verificado que o tipo e teor de cinza são fatores influentes na umidade ótima e massa

específica aparente seca máxima. A adição das cinzas ao solo gera aumento na umidade ótima do material e diminuição na massa específica aparente máxima, em diferentes proporções, de acordo com o tipo e teor de cinzas analisado.

- As análises mecanística-empíricas efetuadas neste estudo com os valores de módulos resilientes obtidos nos ensaios mostram que é viável a utilização de cinzas como aditivo ao solo para utilização em base de pavimentos de baixo volume de tráfego.
- Os resultados dos Ensaio Triaxiais de Carga Repetida demonstraram que a tensão confinante é mais influente no solo estudado, como esperado, tendo em vista que o mesmo é composto predominantemente por material granular. Tal comportamento não é modificado com a adição de ambas as cinzas, também materiais granulares ;
- As análises dos resultados de módulo de resiliência comprovaram a influência já conhecida dos seguintes fatores: tipo e teor de cinzas, tempo de cura e cal.
 - Quanto ao tempo de cura: A cura foi um fator de forte influência para as misturas com a presença de cal. Os aumentos nos módulos de resiliência de tais materiais foram consideráveis. E a interpretação destes resultados faz crer que em tempos de cura maiores há a possibilidade de se obter resultados mais positivos do que os atuais. Entretanto, nas misturas sem a adição de cal foi observado que o tempo de cura não influenciou o ganho de resistência de tais materiais proporcionando a melhora em seus comportamentos mecânicos, demonstrando a inexistência ou baixa expressividade da estabilização química.
 - Quanto ao tipo e teor de cinzas: como esperado as cinzas volantes apresentaram ganhos nos valores de MR mais representativos do que as cinzas de fundo, principalmente nas misturas com a presença de cal. Entretanto, os resultados com as cinzas de fundo também foram satisfatórios. Já com as misturas sem a adição da cal, as cinzas de fundo obtiveram melhor desempenho quanto a este parâmetro. De onde pode se concluir que as cinzas volantes possuem maior capacidade de desenvolver (em conjunto com a cal) a estabilização química do

solo, normalmente mais eficiente e que as cinzas de fundo, devido sua granulometria e aos teores utilizados (maiores que os de cinza de fundo) favorecem a ocorrência de estabilização granulométrica do solo.

- Quanto à influência da cal: A adição da cal às misturas se apresentou como fator positivo em relação ao MR em todos os casos analisados, e ao comparar-se as misturas com e sem adição de cal, pode-se verificar que as primeiras apresentaram comportamento superior às demais. Este fato demonstra que as cinzas estudadas não possuem alto índice de atividade pozolânica e que necessitam da cal como aditivo para alcançarem melhores resultados.
- Similarmente, os resultados dos Ensaio de Deformação Permanente proporcionaram as seguintes conclusões:
 - Quanto ao tempo de cura: Assim como nos resultados de MR, o tempo de cura nos resultados de Deformação Permanente foi fator influente de forma positiva, diminuindo os valores apresentados em todas as misturas estudadas.
 - Quanto ao tipo e teor de cinzas: As cinzas volantes apresentaram diminuições relativas dos valores de deformação permanente maiores que as cinzas de fundo. Todavia, as cinzas de fundo também apresentaram resultados positivos.
- Em uma análise geral dos resultados de MR e Deformação Permanente, pode-se dizer que a mistura com menor teor de cinza volante, S90/CV7/C3, obteve os melhores resultados entre as misturas com cinzas volantes, levantando a hipótese de um “teor ótimo” de cinzas volantes para o solo estudado ser próximo a 7% de cinza volante em peso. Já nas entre as cinzas de fundo, não foi possível fazer tal distinção, dado que as misturas estudadas obtiveram resultados muito semelhantes.
- O emprego do solo misturado com os teores, tanto de cinza de fundo e volante mostrou-se viável para fins de pavimentação. O dimensionamento exploratório feito apresenta espessuras de base compatíveis com as normalmente utilizadas. As misturas com cinzas volantes inclusive apresentaram a espessura mínima possível pelo programa utilizado, SisPav, para tempo de projeto de 10 anos.

5.2. Sugestões para pesquisas futuras

No decorrer da pesquisa foram percebidos alguns pontos no qual o estudo da aplicabilidade das cinzas de carvão mineral em misturas com solo pode ainda ser estendido. Tais sugestões são apresentadas a seguir:

- Analisar o comportamento mecânico de outros teores de cinzas de fundo e volantes quando adicionadas ao solo, com base em programa experimental mais aprofundado, na busca de um “teor ótimo” para o solo estudado;
- Verificar os efeitos da cal no comportamento mecânico e de estabilização do solo, realizando um programa experimental mais aprofundado, utilizando distintos teores de cal não estudados, com diferentes tempos de cura. Comparar tais resultados com os obtidos com as misturas de solo-cinza-cal;
- Análise mais detalhada da reação que ocorre entre o solo, cinzas de fundo e a cal, com a finalidade de verificar a natureza da estabilização que ocorre neste novo material geotécnico, realizando por exemplo, ensaios mineralógicos – observação da modificação da microestrutura ;
- Avaliar o comportamento ambiental das misturas, não somente para aplicação deste novo material em base de pavimentos, mas também para aplicações em obras geotécnicas em geral;
- Aprofundar o estudo da adição de cinzas de fundo em outros tipos de solo, dado os resultados obtidos e a possibilidade de reutilização de um resíduo industrial;
- Aplicar em trechos experimentais bases com misturas de solo-cinza de fundo ou volante-cal e solo-cinza de fundo ou volante, monitorando o seu comportamento mecânico e interações ambientais no decorrer do tempo;
- Aprofundar o estudo do comportamento tensão-deformação de misturas solo-cinzas-cal para utilização em obras geotécnicas de outra natureza, em diversos tipos de solo, através de ensaios triaxiais convencionais;
- Realizar análise mecanística-empírica nos resultados obtidos para outros níveis de tráfego, mais elevados dos estudados, considerando a resposta positiva com os casos analisados.

- E ainda, desenvolver modelos de previsão de ruptura para análise numérica, que reproduzam o comportamento de solos misturados com cinzas de carvão mineral, para a simulação de obras geotécnicas;