

USO DE TÉCNICAS DE REOMETRIA PARA AVALIAR A RIGIDEZ DE SOLOS FINOS ESTABILIZADOS QUIMICAMENTE NA PAVIMENTAÇÃO

Thaís Cavalcante dos Santos
Suely Helena de Araújo Barroso

Universidade Federal do Cear
Programa de Pós Graduação em Engenharia de Transportes

RESUMO

Ações que permitam a construção de rodovias mais econômicas com responsabilidade ambiental são cada vez mais necessárias. Nesse contexto, a estabilização de solos passa a ser vista como uma opção, quando o solo natural não apresenta características mínimas necessárias para uso em subcamadas dos pavimentos, reduzindo os custos de transporte e ampliando as possibilidades do emprego de materiais alternativos. No entanto, o protocolo de ensaio para caracterização de solos estabilizados requer relativa exaustão com excesso de materiais e dispêndio de tempo, além de permitir em predominância análises subjetivas. A fim de contribuir para a caracterização desses materiais, propõe-se um estudo a ser realizado em quatro principais etapas, visando investigar os parâmetros de rigidez de solos finos estabilizados quimicamente com técnicas de reometria. Espera-se obter relações com ensaios clássicos e produzir uma alternativa de análise expedita que possibilite melhor compreensão da técnica de estabilização.

1. PROPOSTA DE PESQUISA

Esse estudo visa contribuir com o método de caracterização de solos finos estabilizados quimicamente a partir de ensaios de torção de cilindro com uso de reômetros. Com o embasamento físico e químico mais aprofundado, remete-se à possibilidade de diminuição de tempo e materiais utilizados para se obter uma dosagem adequada dos materiais estabilizados.

1.1 Problema de Pesquisa

A pouca construção de obras de pavimentação com uso de materiais alternativos favorece a escolha por minerais convencionais, gerando escassez e falta de sustentabilidade, além desses materiais serem geralmente mais onerosos. Entre outros motivos, isso ocorre devido aos protocolos de ensaio fadigosos e à falta de normalização adequada quanto à escolha de materiais.

O uso de grandes quantidades de materiais em ensaios de laboratório para obter parâmetros físicos e mecânicos de solos, produz maior emprego de tempo para a obtenção desses dados e maior custo relacionados ao transporte, estocagem e ensaios. Há uma exaustão na execução dos ensaios durante a etapa dos estudos geotécnicos.

1.2 Questões de Pesquisa

Para a compreensão do comportamento de materiais finos utilizados em pavimentação, propõe-se uma abordagem com base em reologia de materiais, visando reduzir a quantidade de materiais e tempo, para avançar quanto às seguintes questões de pesquisa: (i) Qual geometria de ensaio em reômetros de cisalhamento dinâmico melhor se adequa ao estudo de solos finos quimicamente estabilizados, em função da faixa de Módulo de Resiliência (MR)? (ii) Qual a consequência, na rigidez desses solos, da perda de umidade causada por reações químicas (cura), em função da umidade ótima (h%)? (iii) Como a compreensão de parâmetros químicos e da influência da temperatura pode auxiliar na previsão e correlação com a umidade de ensaio e a umidade ótima dos solos? (iv) Como ensaios de propagação de ondas poderiam contribuir para a obtenção mais rápida e eficiente do módulo de resiliência do solo estabilizado? e (v) Como o conhecimento dos parâmetros reológicos pode dar suporte à escolha de materiais para a estabilização granulométrica e química de solos finos?

1.3 Objetivos

O objetivo geral da pesquisa proposta é desenvolver técnicas de caracterização mais rápidas de solos finos que se relacionem bem com ensaios clássicos de rigidez e com as características físicas e mecânicas de materiais estabilizados quimicamente. Os objetivos específicos, são: (i) reconhecer a geometria mais viável, a depender da faixa de MR esperada do material para o ensaio de torção cíclica em reômetros de cisalhamento dinâmico; (ii) investigar se há influência da umidade nos resultados obtidos que gere perda de representatividade do comportamento reológico e mecânico do material mineral; (iii) analisar a influência da temperatura, investigando seu efeito na perda de umidade e (iv) explorar o uso de ensaios ultrassônicos para os solos finos estabilizados quimicamente.

2. BREVE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Visando aumentar a durabilidade e a resistência de materiais aos esforços solicitados pelo tráfego e aos efeitos de intempéries, na pavimentação, propõe-se a estabilização desses materiais, seja ela, química, física ou ambas (Vogt, 1971; Gondim, 2008). No caso da estabilização química, pode-se dizer que ela ocorre com adição dos agentes químicos estabilizantes no solo natural, contribuindo para se atingir a umidade ótima do solo e uma boa compactação (Makusa, 2013). No entanto, essas melhorias dependem dessa reação que ocorre entre o estabilizador e os minerais presentes no solo, tornando numerosas as possibilidades, dados os diversos tipos de solos e de estabilizantes.

A literatura tem mostrado que não há dosagem específica entre agente estabilizador e solo que seja comum a todas as possibilidades. Alguns métodos para dosagem de solo-cal, por exemplo, testados por Araújo (2008) têm se mostrado também inadequados. Por isso, faz-se necessário um aprofundamento mecanicista dessas reações que ocorrem nos solos, dos quais serão obtidos parâmetros reológicos associados aos processos químicos e como o comportamento reológico desses solos pode ter efeito na dosagem no processo de estabilização. Pileggi (2013) se utilizou da reometria de oscilação e calorimetria isotérmica para avaliar a transição do fluido para o sólido elástico de pastas cimentícias com resíduo de bauxita, o que sustenta a ideia de que é possível ser feitas correlações entre as reações químicas advindas da estabilização e o comportamento mecânico dos materiais.

Segundo Schiozer (1996), os materiais provenientes da natureza podem, com relação aos aspectos de agregação, ser agrupados em várias classes. A forma mais simples de apresentar esse agrupamento é dividindo-os em dois grandes grupos: fluidos e sólidos. Diz-se que o material é um fluido newtoniano quando há uma relação de proporcionalidade entre a tensão e a taxa de cisalhamento (Pileggi, 2001). No entanto, Bingham (1922) já havia identificado que para um material apresentar comportamento viscoso, deve-se levar em consideração a existência de um valor residual para a tensão de cisalhamento (uma tensão mínima para produzir fluxo), o que foi reconhecido como a tensão de escoamento. Abaixo dessa tensão, o material tem comportamento sólido, possivelmente elástico. Vyalov (1986) analisou experimentalmente as relações entre a tensão e a deformação de solos e teve como resultado que o modelo reológico viscoplástico descrevia de maneira adequada o comportamento dos solos submetidos a um estado permanente de tensões.

Os ensaios com enfoque reológico em materiais granulares finos são pouco difundidos no Brasil, e destinados normalmente à compreensão de solos argilosos com aplicação na geologia

e alguns autores relatam dificuldade no manuseio do material e problemas sistêmicos do ensaio (Castro *et al.*, 2009; Markgraf *et al.*, 2012). No entanto, houve contribuições no que diz respeito à metodologia e ao tratamento de dados que serão aproveitadas para este estudo mais focado em solos para pavimentação.

3. METODOLOGIA

A metodologia se divide em quatro etapas gerais que correspondem aos objetivos específicos propostos na Seção 1.3: (i) avaliação da geometria ideal de ensaio, considerando faixas de MR; (ii) investigação da influência da umidade, quanto à necessidade de correlacionar a umidade de ensaio com a umidade ótima; (iii) investigação da influência da temperatura no comportamento reológico e na umidade ótima e (iv) exploração do ensaio ultrassônico para determinação do MR de amostras finas estabilizadas. O trabalho será apresentado em forma de quatro artigos em que cada um corresponderá a uma dessas etapas da metodologia. A Figura 1 apresenta um mapa mental das etapas, sendo que elas estão mais detalhadas nos parágrafos que se seguem.

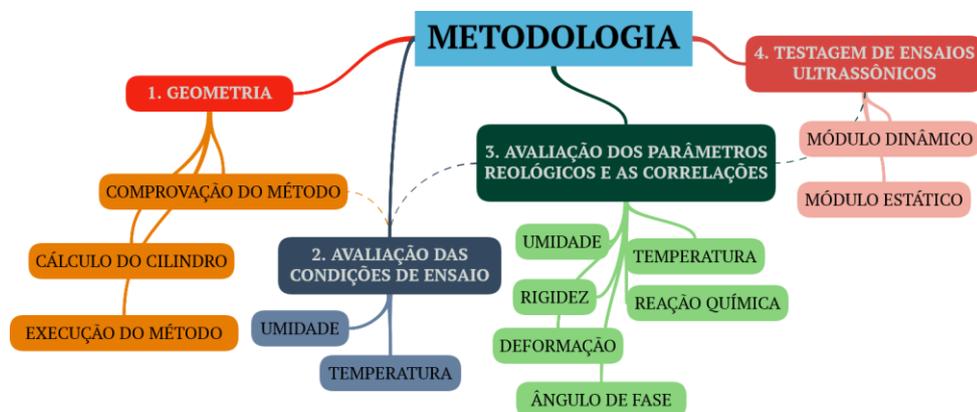


Figura 1: Mapa mental mostrando as etapas da pesquisa.

Fase (i): trata-se do cálculo da geometria a partir de considerações sobre os materiais a serem testados e das equações de torção de cilindro (ver Equação 1, em que o ângulo de torção φ depende do comprimento do cilindro L , do torque aplicado T , do momento polar de inércia da seção reta do cilindro J e do módulo de cisalhamento do material G). Destaque-se que se planeja realizar ensaios cíclicos e que os ângulos de torção e os torques correspondem às amplitudes a serem aplicadas nos corpos-de-prova cilíndricos. O objetivo dessa fase é determinar, dentro da resolução e da capacidade de torque do equipamento, para quais valores de ângulo e deformação específica o ensaio se torna viável para diferentes tipos de solos. Por esse fim, foram fixados os valores de torque, módulo de resiliência, diâmetro.

$$\varphi = \frac{L.T}{J.G} \quad (1)$$

Fase (ii): serão realizados os ensaios de cisalhamento dinâmico em diferentes teores, com ramos mais úmidos e ramos mais secos em torno da umidade ótima do solo para a análise da rigidez em cada situação. Também será verificado o percentual de umidade perdido durante a execução do ensaio, a partir da relação das umidades antes e depois desse procedimento. Com esses dados obtidos, será verificado se há padrão nessas perdas percentuais de execução e se a umidade ótima do solo poderá ser correlacionada com uma umidade padrão de ensaio, sem perda de representatividade.

Fase (iii): nessa fase serão realizados os seguintes ensaios e análises: (a) ensaio

termogravimétrico, a fim de investigar se há e como ocorre a mudança de massa diante das interações químicas; (b) ensaio de Análise Térmico Diferencial (DTA) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), para a compreensão dos processos físicos e químicos que ocorrem e promovem variações de energia termodinâmica e (c) Análise Termomecânica (TMA), Análise Dilatométrica (DIL) e Dínamo-mecânica para verificar possíveis mudanças nas dimensões, deformações e alteração na rigidez do material.

Fase (iv): a partir da medição da velocidade da onda ultrassônica, realizada a partir de um transdutor, serão calculados os parâmetros de rigidez em diferentes frequências de diversos corpos de prova.

4. RESULTADOS PRELIMINARES

Quanto aos resultados preliminares, estão sendo concluídas as confecções dos moldes cilíndricos reduzidos que foram obtidos no desenvolvimento da Fase (i) descrita na Metodologia. Foram dimensionadas três alturas distintas (25mm, 50mm e 75mm) para o cálculo do molde cilíndrico, diante às faixas de MR que resultou em deformações específicas em torno de $200\mu\epsilon$ e distorção de angulação executável. Observou-se que é possível a execução de ensaios em materiais que apresentaram MR de 100MPa a 1500MPa, representativos de solos naturais e/ou estabilizados quimicamente usualmente empregados na pavimentação.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Capes, à Funcap e à Petrobras pelo auxílio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Araujo, A. F. (2009) Avaliação de Misturas de Solos Estabilizados com Cal, em Pó e em Pasta, para Aplicação em Rodovias do Estado do Ceará. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE, 175 fl.
- Bingham, E. C. (1922) *Fluidity and plasticity*. Ed. McGraw-Hill, New York
- Cardoso, F. A., (2009) Método de Formulação de Argamassas de Revestimento Baseado em Distribuição Granulométrica e Comportamento Reológico. Tese Doutorado. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica, 2009.
- Castro, A. L., Libório, J.B.J., Pandolfelli, V.C., (2011). Reologia e concretos de alto desempenho aplicados na construção civil – Revisão. *Cerâmica* 57. v. 57, n. 341, p. 63-75.
- Gondim, L. M. (2008) Estudo experimental de misturas solo-emulsão aplicado às rodovias do agropólo do Baixo Jaguaribe - Estado do Ceará. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE, 213 f.
- Makusa, G. P. (2013) Soil stabilization methods and materials in engineering practice: State of the art review. In: *Sweden: Lulea University of Technology*.
- Markgraf, W.; Moreno, F. e Horn, R. (2012) Quantification of microstructural changes in Salorthidic Fluvuquents using rheological and particle charge techniques. *Vadose Zone Journal* 11: 1-11.
- Schiozer, D., (1996) *Mecânica dos fluidos* (2ª ed.) / c1996 - Livros - Acervo 63229. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, c1996. 629 p.
- Pileggi, R. G. (2001) Ferramentas para o Estudo e Desenvolvimento de Concretos Refratários. Tese Doutorado. Universidade Federal de São Carlos.
- Pileggi, R. G.; Cincotto, M. A.; Gallo, J. B.; Montini, M.; Liberato, C. C.; Romano, R. C. R. (2013) Evaluation of transition from fluid to elastic solid of cementitious pates with bauxite redidue using oscillation rheometry and isothermal calorimetry. *Applied Rheology*. v.23, n.2, p.23830(1)-20803(7).
- Vogt, J. C. (1971) Estabilização Betuminosa. 7º *Simpósio sobre pesquisas rodoviárias*, Rio de Janeiro, n.p.
- Vyalov, S. S. (1986) Rheological Fundamental of Soil Mechanics. *Elsevier Science Publishers B.V*, v. 36, n.1.