

# PROPOSIÇÃO DE MODELOS DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE PARA MATERIAIS NATURAIS E ESTABILIZADOS COM CINZAS DE CARVÃO PARA A REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA

Sarah Denise Vasconcelos <sup>(1)</sup>

Suely Helena de Araújo Barroso <sup>(2)</sup>

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes (PETRAN)

## RESUMO

Os métodos de dimensionamento mecanístico-empíricos incorporam parâmetros de Deformação Permanente (DP) para previsão do comportamento mecânico dos materiais. Esta tese de doutorado se propõe a investigar melhor a DP, propondo modelos de previsão desse parâmetro para solos da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) e em misturas estabilizadas quimicamente de solo com cinzas de carvão, levando-se em consideração aspectos ambientais das misturas à luz das condições de compactação e confinamento em campo. Para tanto, foram coletados inicialmente 8 solos na RMF e ensaios de DP preliminares apontam a influência da estabilização química e dos tempos de cura na redução dos valores de deformação irreversível. Espera-se que modelos de previsão da DP sejam criados, validados e testados para a realidade local e que, concomitantemente, haja uma contribuição ambiental do uso de resíduos industriais na pavimentação.

## 1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Em virtude de um contexto global de estímulo a uma política de conscientização sustentável e adoção de sistemas industriais ecologicamente aceitos, um dos grandes desafios atuais é a melhor gestão dos resíduos produzidos em regiões industriais. No caso das usinas termelétricas ocorre a geração diária de toneladas de rejeitos sólidos, cinzas leves (*fly ash*) e pesadas (*bottom ash*), oriundas do processo da queima do carvão mineral. Dada a demanda atual por sistemas seguros de disposição final para os rejeitos industriais, é de responsabilidade de todos os agentes envolvidos na geração de energia em centrais termelétricas propor soluções de engenharia para o reaproveitamento dos resíduos produzidos.

Na concepção de novos materiais para pavimentação, torna-se necessária uma avaliação dos seus riscos ambientais. Chies *et al.* (2003) destacam que a exploração do carvão gera problemas ambientais, decorrentes da geração de significativas quantidades de resíduos que, quando depositados inadequadamente, podem gerar impactos no solo e nas águas subterrâneas, devido à lixiviação de elementos tóxicos presentes em sua composição. Destaca-se que as cinzas de carvão são resíduos, cujo potencial poluidor depende das concentrações dos elementos tóxicos e do seu grau de solubilização no ambiente natural.

Além de aspectos ambientais, é imprescindível o conhecimento das propriedades mecânicas dos materiais a serem empregados na área de pavimentação. É relevante nesse contexto que se conheçam os processos de estabilizações, granulométricas e químicas, à luz de análises mais mecanísticas. Para caracterização mecânica dos materiais das camadas dos pavimentos, tem-se que o Módulo de Resiliência (MR) e a Deformação Permanente (DP) são parâmetros internacionalmente utilizados em métodos de dimensionamento empírico-mecanísticos de pavimentos flexíveis, como por exemplo, no *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*.

Ribeiro (2016) propôs, calibrou e validou um modelo destinado à geração de estimativas do MR de solos da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF). Outros diferentes estudos internacionais, com o intuito de prever o comportamento resiliente de solos também já foram conduzidos, como Sukumaran *et al.*, (2002) e Soliman *et al.*, (2010). No entanto, Thom

(2008) afirma que poucas pesquisas têm sido elaboradas para a avaliação da DP em materiais que compõem camadas de bases e sub-bases de pavimentos. Internacionalmente, podem-se citar alguns estudos que direcionaram os trabalhos para análise da DP em solos, como: Hornyh e Absamad (2004) e Salour e Erlingsson (2016).

Os modelos de predição de DP dos materiais de pavimentação têm sido desenvolvidos a partir de dados obtidos em laboratório ou por meio de simuladores de tráfego. O modelo de Monismith *et al.* (1975) relaciona o número de repetições de carga com a deformação específica permanente. Por meio da diferenciação matemática desse modelo, Cardoso (1987) relacionou a deformação permanente com a deformação resiliente. Tseng e Lytton (1989) desenvolveram modelos a partir de uma abordagem mecanístico-empírica, sendo o modelo dependente da deformação específica resiliente e de algumas propriedades físicas e geotécnicas dos materiais. Guimarães (2009) propôs um modelo de DP relacionando a deformação permanente específica com as tensões confinantes e tensões desvio e o número N.

Diante do exposto, este projeto de pesquisa objetiva a proposição de modelos, aplicáveis para a Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), de predição da deformação permanente em solos e misturas de solo+cinza estabilizadas quimicamente, levando-se em consideração aspectos ambientais dos materiais e misturas propostas à luz das condições de compactação e confinamento existentes em camadas de pavimentos.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Primeira etapa: modelos para predição de valores de DP

Para predição dos valores de DP em solos e misturas estabilizadas, torna-se necessária a adoção de algumas fases, esquematizadas na Figura 1.



Figura 1 - Etapas para criação dos modelos de DP

A primeira fase contempla uma ampla pesquisa bibliográfica acerca dos modelos de predição de deformação permanente de solos e de misturas estabilizadas para melhor conhecer o estado da arte e o estado da prática dos estudos de deformação permanente. Posteriormente, na definição da área de estudo, as cinzas de carvão a serem utilizadas são advindas da Usina Termelétrica Energia Pecém, localizada no Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), na RMF. À luz de uma viabilidade econômica, a aplicação desse resíduo na pavimentação limita-se ao entorno da termelétrica o qual foi gerado. Optou-se, assim, por limitar a área de estudo à RMF. A partir da definição da área de estudo, segue-se um levantamento das características geológicas, pedológicas e geomorfológicas da região, a fim de auxiliar na identificação de características geotécnicas da área de estudo.

A próxima etapa consiste na definição dos planos de amostragens para os solos da região de estudo e para as cinzas da termelétrica investigada. A escolha dos solos foi norteadada por Ribeiro (2016) que mapeou os solos existentes na RMF. No que se referem às cinzas, serão analisadas os diferentes tipos de cinzas geradas na termelétrica. Na fase de idealização das misturas, propõe-se realizar misturas das cinzas com os solos da RMF e com adição de dois estabilizantes químicos: cal e materiais geopoliméricos à base de cinzas de carvão mineral.

Para proceder as modelagens dos valores de DP para os materiais e misturas idealizados, propõe-se um programa laboratorial composto dos ensaios de Granulometria, Limites de Liquidez e de Plasticidade, Proctor, CBR, MR, Resistência à Compressão Simples (RCS) e Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD) e DP. Todos os resultados serão organizados em um banco de dados georreferenciado, para tratamento e processamento. A técnica de modelagem utilizada será a de Redes Neurais Artificiais (RNA). Os dados deverão passar por análises estatísticas, para selecionar as variáveis com maior poder explicativo na geração de estimativas de DP. Devem-se criar também modelos de regressão das variáveis explicativas com a DP, a fim de avaliar o grau de predição das regressões.

## **2.2. Segunda etapa: metodologia de ensaios ambientais**

Esta etapa objetiva avaliar aspectos ambientais dos materiais e misturas propostas à luz das condições de compactação e confinamento existentes em camadas de pavimentos. Propõe-se uma avaliação do efeito da compactação e da estabilização química como técnicas capazes de minimizar a capacidade de transferir ou lixiviar poluentes. Serão realizados, para todos os materiais e misturas propostas, os ensaios tradicionais de Solubilização (NBR 10006/2004) e de Lixiviação (NBR 10005/2004). Além disso, com base na norma da ASTM D 4874 (1995), será proposta uma metodologia de ensaio de Lixiviação em Coluna, a fim de simular as condições reais de compactação e confinamento em campo.

## **2.3. Terceira etapa: construção e monitoramento de um trecho experimental**

Nesta etapa serão selecionadas misturas idealizadas nas etapas anteriores, que apresentaram bons comportamentos à luz dos ensaios de MR e DP e dos ensaios ambientais, para elaboração de um projeto estrutural de pavimento. O monitoramento da execução e pós-execução de um trecho experimental a ser construído dentro da termelétrica investigada fará parte desta etapa metodológica. Nas atividades de pós-execução, deverão ser monitoradas as condições de segurança, por meio de medições periódicas de macro e microtextura, e de superfície do pavimento, verificando o índice de irregularidade longitudinal. Propõe-se também o monitoramento da deformação permanente em campo, por meio da verificação do afundamento de trilha de roda na estrutura em diferentes intervalos de tempo.

## **3. RESULTADOS PRELIMINARES**

A RMF é a mais populosa do Norte-Nordeste e a sexta maior região metropolitana do Brasil (IBGE/2017). A vegetação típica na região é a caatinga e a hidrogeologia predominante é de Formação Barreiras. A pedologia da região é caracterizada por solos de diferentes tipos, com predominância de argissolos vermelho-amarelo distrófico e eutrófico.

Coletaram-se 8 solos localizados na RMF (identificadas como SL-1 a SL-8), sendo que 6 estão localizados em um raio de até 30 km da usina termelétrica investigada. O solo SL-6 foi caracterizado como do tipo A-2-4. Esse solo apresentou uma densidade de  $2,65 \text{ g/cm}^3$ , com limite de liquidez de 25% e o índice de plasticidade foi 7%. O CBR foi de 21% e o MR melhor representado pelo modelo composto ( $MR = 139,3 \cdot \sigma_3^{-0,269} \cdot \sigma_d^{-0,538}$ ).

Foram realizados ensaios de DP para a mistura de 50% SL-6 + 50% cinza e para a mistura 47,5% SL-6 + 47,5% cinza + 5% CAL (tempos de cura imediato e 7 dias). Observou-se que a mistura 50% SL-6 + 50% cinza apresentou uma DP acumulada de 10,17 mm. A adição de 5% cal na mistura diminuiu consideravelmente a DP observada, apresentando ao fim dos ensaios deformações irreversíveis de 1,203 mm (cura imediata) e 0,165 mm (cura de 7 dias).

Na etapa da construção e monitoramento do trecho, já foram realizados estudos geotécnicos e topográficos. No estudo geotécnico do subleito foram coletadas 10 (dez) amostras. Todas as amostras foram classificadas como materiais do tipo A-2-4 e o CBR de projeto foi de 15%. No estudo topográfico, foi realizado um levantamento planialtimétrico com uso do GPS geodésico e, conforme critério estabelecido em DNER (1999), quase 90% da área levantada apresentou baixas declividades (declividades de até 8%), classificando-se como região plana.

#### 4. CONCLUSÕES ESPERADAS

Espera-se que modelos de previsão da deformação permanente em solos da RMF e em misturas de solo+cinza estabilizadas quimicamente sejam criados, validados e testados para a realidade local. Busca-se, a partir da obtenção desses modelos, contribuir para difusão do uso dos métodos de dimensionamentos empírico-mecanísticos de pavimentos, pela facilitação na obtenção dos valores da Deformação Permanente. Espera-se também uma contribuição ambiental do uso de resíduos na pavimentação, por meio da constatação de que a compactação e a estabilização química são técnicas eficientes para melhoria das propriedades físicas e das características toxicológicas dos resíduos industriais, proporcionando uma diminuição da capacidade dos materiais de transferir ou lixiviar poluentes.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio financeiro da pesquisa através: (i) da CAPES pela concessão de bolsa de doutorado; (ii) da Energia Pecém e (iii) da Petrobras através da Rede Temática de Asfaltos.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cardoso, H., S. (1987) *Procedure for Flexible Airfield Pavement Design Based on Permanent Deformation*. Tese PhD. University of Maryland. EUA.
- Chies, F.; Silva, N. I. W. e Zwosnok, O. (2003) *Desenvolvimento de Blocos e Tijolos a Partir de Cinzas de Fundo de Carvão*. In: Rocha, J.C. & John, U.M. Coleção Habitare, Porto Alegre, v. 4, p. 218-239.
- Guimarães, A. C. R. (2009) *Estudo de Deformação Permanente em Solos e a Teoria do Shakedown Aplicada a Pavimentos Flexíveis*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DNER (1999) *Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais*, Rio de Janeiro, Brasil.
- Hornych, P.; Absamad, A. E. (2004) Selection and Evaluation of Models for Prediction of Permanent Deformations of Unbound Granular Materials in Road Pavements. SAM-05- E10. *Sustainable and Advanced Materials for Road Infrastructure*, Roskilde, Denmark.
- IBGE (2017) *IBGE Divulga as Estimativas Populacionais dos Municípios em 2017*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Brasil.
- Monismith, C. L.; Ogawa, N.; e Freeme, C.R. (1975) *Permanent Deformation Characteristics of Subgrade Soils due to Repeated Loading*, 54th Annual Meeting of TRB, Washington.
- Ribeiro, A. J. A. (2016) *Um Modelo de Previsão do Módulo de Resiliência dos Solos no Estado do Ceará para fins de Pavimentação*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza.
- Salour, F., Erlingsson, S. (2016) *Characterization of Permanent Deformation of Silty Sand Subgrades from Multistage RLT Tests [J]*. Procedia Eng. n. 143, p. 300–307.
- Sukumarán, B., Kyatham, V., SHAH A., SHETH D. (2002) *Suitability Of Using California Bearing Ratio Test To Predict Resilient Modulus*. Presented For The Federal Aviation Administration Airport Technology Transfer Conference.
- Soliman, H. e Shalaby, A. (2010) *Sensitivity of Subgrade Resilient Modulus to Moisture Variation*. Annual Conference of the Transportation Association of Canada Halifax.
- Thom, N. (2008) *Principles of Pavement Engineering*. Thomas Telford Publishing Ltd, United Kingdom.
- Tseng, K. H. e Lytton, R. L. (1989) Prediction of Permanent Deformation in Flexible Pavement Materials. In: *Implication of aggregates in the design, construction and performance of flexible pavements*, ASTM STP 1016, p. 154-172, Philadelphia.

---

(1) Sarah Denise Vasconcelos (sarah.denise@hotmail.com)

(2) Suelly Helena de Araújo Barroso (suelly@det.ufc.br)

Departamento de Engenharia de Transportes, Campus do Pici, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil.