Desenvolvimento de arranjo experimental para análise de camadas granulares de pavimentos em regiões remotas

Gustavo Eros Queiroz Secchi[1], Henrique Lopes Cavalcante[1], José Antonio Schiavon[1], Cláudia Azevedo Pereira[1], José Turano Júnior[1]

[1]Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil

***Resumo* – Mobilizar equipamentos de grande porte para avaliar pavimentos em regiões remotas é um desafio logístico no Brasil. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um arranjo experimental para viabilizar metodologias de avaliação de camadas granulares utilizando o *Light Weight Deflectometer* (LWD) e o *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP). O sistema utiliza um tronco de pirâmide de base quadrada e um cilindro de pequeno porte, metálicos, permitindo a simulação de diversas condições de compactação e umidade. Com dados dos ensaios, a calibração de um modelo computacional no software PLAXIS-2D será desenvolvida, objetivando extrapolar resultados para outras condições de contorno. Espera-se que a integração entre ensaios de campo simplificados, laboratoriais e modelagem estime os módulos de resiliência por modelos preditivos, auxiliando o dimensionamento de pavimentos em regiões longínquas e beneficiando a prontidão logística em áreas de defesa.**

***Palavras-Chave* – LWD, Módulo de Resiliência, Modelagem Computacional.**

I. INTRODUÇÃO

A manutenção e a construção de infraestruturas de transporte em regiões remotas, como áreas de fronteira ou áreas isoladas na Amazônia, são fundamentais para a soberania nacional e para a logística das Forças Armadas. Todavia, realizar a avaliação de camadas granulares de pavimentos em tais regiões é desafiador em função da dificuldade de mobilizar equipamentos para a realização do diagnóstico, como o *Falling Weight Deflectometer* (FWD) e o *Heavy Weight Deflectometer* (HWD). O alto custo e o desafio logístico para transportar equipamentos desse porte para regiões de difícil acesso reforçam a necessidade do desenvolvimento de soluções mais simples, ágeis e com menor esforço logístico para a avaliação de pavimentos.

O LWD, por meio de um dispositivo de carga que gera um pulso a partir da queda de uma massa padronizada, de uma placa de carga que distribui o impacto e de um sensor que mede a deflexão na superfície ensaiada, estima o módulo de elasticidade dinâmico com base na teoria de camadas elásticas de Boussinesq. De acordo com o discutido por Nazzal et al. [9], as principais vantagens do LWD em relação aos outros equipamentos são a portabilidade e a rápida execução do ensaio, o que possibilita a avaliação da homogeneidade da compactação de extensas áreas de uma infraestrutura.

Secchi G., secchi@ita.br; Cavalcante H., cavalcante.ime@gmail.com; Schiavon J., jose.schiavon@gp.ita.br; Pereira C., claudia.azevedo@ita.br; Turano J., jose.turano@gmail.com

Fig. 1. LWD modelo ZFG 3000 – Zorn, sendo utilizado na pesquisa.

De forma complementar, o *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP) mede a resistência ao cisalhamento do solo, o que possibilita estimar sua capacidade de suporte e obter sua estratigrafia sem a necessidade de grandes escavações. O ensaio consiste na penetração de uma haste delgada de aço com uma ponta cônica a partir da queda de um martelo de massa padronizada. O avanço da haste a cada golpe do martelo fornece a taxa de penetração, índice que varia de uma camada do pavimento para outra, e que possibilita obter a estratigrafia e estimar a capacidade de suporte. Estudos recentes confirmam a aplicabilidade do DCP para a investigação de uma variedade de solos, desde areias limpas até solos coesivos [4]. O ensaio possibilita a identificação de pequenas variações de rigidez e de espessura das camadas granulares que impactam diretamente a vida útil do pavimento.

Com reduzida interferência no pavimento, a integração dessas duas técnicas permite caracterizar o solo quanto à rigidez superficial, à capacidade de suporte e à estratigrafia das camadas a fim de validar a uniformidade da construção [9], [4]. Essa combinação de informações tem grande valia para a calibração de modelagens baseadas no Método dos Elementos Finitos (MEF), como a do software PLAXIS-2D. Isso porque a variação espacial, capturada pelos resultados dos ensaios, fornece dados sobre as propriedades dos materiais que possibilitam simular o comportamento não linear dos solos em uma malha de elementos finitos [1,4,9].

Ao considerar esse contexto, o emprego de equipamentos de impacto leve e de penetração dinâmica se destaca como uma alternativa viável para a realização de avaliações estruturais de pavimentos em localidades e situações em que o FWD e o HWD não são acessíveis. Essa viabilidade se dá tanto

pelas dimensões reduzidas dos equipamentos, que podem ser embarcados em veículos e aeronaves de pequeno porte, quanto pelo menor custo de aquisição. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é propor uma metodologia de experimento laboratorial que permita associar os resultados dos ensaios do LWD e do DCP ao comportamento mecânico real dos materiais e extrapolá-los para diversos cenários operacionais por meio de modelagens computacionais.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A. Ensaios de Deflexão

A deflexão consiste na resposta elástica do pavimento às solicitações do tráfego. A ação de cargas de tráfego sobre o pavimento gera dois tipos de deformações: as permanentes e as recuperáveis [7]. As deformações permanentes não se dissipam após a passagem da carga, ou seja, elas se consolidam no pavimento ainda que residualmente. Já as deformações recuperáveis, ou simplesmente deflexões, refletem o comportamento elástico da estrutura, desaparecendo após a remoção da carga.

Em ensaios de campo são as deflexões que os sensores acoplados a equipamentos não-destrutivos captam ao impor cargas, estáticas ou dinâmicas, ao pavimento. Ou seja, os acelerômetros ou geofones de HWD, FWD e LWD medem apenas a componente elástica, que é a resposta vertical do pavimento a ação de uma carga. Embora esses equipamentos de medição registrem apenas essa deformação na superfície do pavimento, a deflexão representa a resposta vertical de todas as camadas estruturais e do subleito à aplicação da carga [5].

B. Módulo de Resiliência

O Módulo de Resiliência (MR) é uma propriedade mecânica fundamental para a compreensão do comportamento de solos e de materiais de pavimentação, sendo definido como a razão entre a tensão cíclica aplicada e a deformação elástica recuperável após um determinado número de ciclos de carga [8]. Como a maioria dos materiais não é perfeitamente elástico e acumula deformações plásticas sob repetidas aplicações de carga, o MR isola a parcela de deformação recuperável, descrevendo o comportamento não linear e dependente do estado de tensões típico desses materiais sob a ação transiente do tráfego. No âmbito da avaliação estrutural e do dimensionamento mecanístico-empírico, o MR tornou-se o parâmetro central de entrada para o cálculo do estado de tensões, deformações e deflexões no sistema de múltiplas camadas [8].

A determinação laboratorial do MR, para solos e materiais granulares, apoia-se em ensaios triaxiais de cargas repetidas, essenciais para desvincular a resposta elástica da componente plástica [5]. Já para a avaliação de pavimentos em serviço com fins de restauração, o MR é obtido por meio da retroanálise de bacias de deflexão, obtidas por deflectômetros de impacto, como o LWD, o FWD e o HWD [5]. A determinação desses módulos *in situ* atua como uma radiografia da rigidez real das camadas deterioradas, permitindo diagnosticar a fadiga das camadas asfálticas e dimensionar os reforços estruturais.

C. Caracterização dos Materiais

A avaliação estrutural de pavimentos exige a compreensão da capacidade de suporte das camadas que o compõem, tornando a caracterização física dos materiais uma etapa indispensável para essa análise. A coleta de dados sobre as propriedades dos solos - como a granulometria, os limites de liquidez e de plasticidade, o teor de umidade e a espessura das camadas - é fundamental para mapear as causas de eventuais deteriorações [5]. Essas características físicas interferem de modo direto no atrito, na permeabilidade, no intertravamento e na trabalhabilidade do material no estado compactado, governando assim a resposta conjunta de toda a estrutura frente à aplicação do tráfego. Portanto, são as propriedades físicas dos agregados e dos solos que determinam a sua adequação e resistência para o uso na pavimentação [2].

Além de atuar como ferramenta básica de diagnóstico e de classificação, a caracterização física serve como alicerce para a abordagem mecanístico-empírica moderna de avaliação estrutural, que é pautada na rigidez dos materiais. Embora os métodos atuais priorizem ensaios focados no MR, o comportamento mecânico dos materiais granulares e asfálticos não é constante e apresenta altíssima dependência do seu estado físico. O MR, por exemplo, sofre flutuações em virtude de alterações na densidade alcançada na compactação e em função das variações no teor de umidade do material no campo. Essa interdependência é tão marcante que na literatura há diversos modelos de regressão que correlacionam o módulo de resiliência diretamente com as propriedades físicas dos solos [8]. Por essa razão, mesmo com a consolidação da mecânica dos pavimentos, que avalia tensões e deformações, os ensaios clássicos destrutivos e as caracterizações físicas mantêm aplicabilidade para que se possa prever o desempenho e a durabilidade da estrutura ao longo de sua vida útil.

Nessa pesquisa estão sendo utilizados dois tipos de material, com comportamentos geotécnicos distintos. O Material 1 é um solo fino, com 58,70% de material passante na peneira nº 200, LL de 44%, LP de 33% e IP de 11%, classificado como A-7-5 pela Transportation Research Board (TRB). O Material 2 é comparativamente mais grosso, com 42,69% passante na nº 200, LL de 42%, LP de 28% e IP de 14%, classificado como A-7-6.

No ensaio de compactação na energia Proctor intermediária, o Material 1 apresentou umidade ótima de 19,95% e massa específica aparente seca máxima de 1,663 g/cm³, CBR de 27,84% e Mini-MCV de 15, sendo classificado pela metodologia MCT como LG' (laterítico argiloso). O Material 2 apresentou umidade ótima de 15,16% e massa específica aparente seca máxima de 1,776 g/cm³, CBR de 39,26% e Mini-MCV de 10, classificado como NG (não-laterítico). O Material 2 destaca-se pelo maior índice de suporte e maior densidade, porém apresenta maior perda por imersão no Mini-MCV.

D. Efeitos de borda e de fundo

O rigor experimental na engenharia de pavimentos exige que as condições de contorno de modelos em escala reduzida simulem exatamente as mesmas características de campo.

Estudos anteriores demonstram que o efeito de borda e o confinamento lateral são variáveis críticas que distorcem os resultados do módulo de elasticidade e das deflexões obtidas pelo LWD, e por isso devem ser consideradas [6]. Se as dimensões do modelo reduzido forem insuficientes, o bulbo de tensões gerado pelo impacto do LWD propaga-se até as paredes laterais ou o fundo do recipiente aumentando artificialmente a tensão de confinamento e a rigidez do material [6].

Deste modo, a zona de influência do bulbo de tensões deve estar totalmente contida no volume de solo que está sendo ensaiado. Adicionalmente, a interação entre as camadas granulares e o subleito precisa ser controlada para evitar o *back-effect* - efeito de fundo -, caso em que a rigidez da base do recipiente influencia a deflexão medida na camada ensaiada [6]. A fundamentação deste trabalho baseia-se na calibração de parâmetros de rigidez e na busca pela redução dessas influências físicas com a utilização de um arranjo experimental dimensionado para a obtenção de dados de deflexão com a utilização do LWD, conforme critérios da mecânica dos solos e dos pavimentos.

A utilização de equipamentos portáteis para realização dos ensaios para determinação do módulo de elasticidade *in situ* e da deflexão sob carga dinâmica vêm sendo estudada para alternativamente ser usada em detrimento dos já consagrados FWD e ensaio de placa [9]. Estudos indicam que o LWD pode fornecer resultados confiáveis para camadas granulares e subleitos, desde que as condições de contorno laboratoriais consigam contornar o problema do confinamento de campo e que o bulbo de tensões seja integralmente contido no volume ensaiado [3,9]. Segundo Betti et al. [3], a sensibilidade térmica e a rigidez das camadas adjacentes influenciam diretamente a deflexão medida, exigindo arranjos experimentais que isolem as variáveis de interesse.

III. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para contornar a propagação do bulbo de tensões sobre as paredes do modelo reduzido, propõe-se a construção de um tronco de pirâmide com 62,5 cm de altura e bases superior e inferior quadradas com 75 cm e 80 cm de lado, respectivamente. Desse modo, a deflexão medida pelo LWD tende a ser isenta do efeito borda, refletindo a rigidez real do material ensaiado [4].

Nessa caixa metálica, as camadas granulares com os materiais selecionados serão construídas sob uma base rígida de concreto, enquanto que no cilindro sua parte inferior pode ser retirada após a compactação dos materiais. Dessa forma, ele pode ser apoiado sob a mesma superfície de concreto e reproduzir as mesmas condições de apoio da caixa, e possibilitar a relação dos dados de deflexões nos cenários. Essa configuração permite uma calibração mais precisa de modelos computacionais em softwares de elementos finitos, como o PLAXIS-2D, tornando mais fácil a obtenção de correlações entre as deflexões medidas no LWD, os dados do DCP e os resultados de ensaios triaxiais de carga cíclica [4], [1].

Deste modo, a metodologia proposta divide-se:

1) na caracterização dos materiais a serem ensaiados
2) na construção de dois aparatos metálicos nos quais os materiais serão compactados e ensaiados com o DCP e com o LWD e
3) na modelagem numérica baseada no MEF.

A. Ensaios para determinação do MR e da densidade "in situ" dos materiais no experimento

Para a caracterização dos materiais foram executados ensaios laboratoriais de: granulometria, limites de Atterberg, compactação, CBR na energia intermediária e mini-MCV, como já exposto anteriormente. Complementarmente, os ensaios triaxiais de cargas cíclicas serão realizados para os dois tipos de solo da pesquisa e para três condições de umidade (ótima -2%, ótima e ótima +2%), totalizando 12 ensaios, já que cada um possuirá duas réplicas. Todos os ensaios seguirão as normas técnicas vigentes (ABNT/DNIT/ASTM), fato que garante a replicabilidade dos resultados e fornece a base técnica para a definição dos parâmetros de entrada no modelo computacional.

Já a verificação do grau de compactação das camadas no tronco de pirâmide e no cilindro metálico será realizada através do ensaio de densidade *com auxílio do anel biselado*, a fim de verificar a homogeneidade do material compactado, uniformidade que também poderá ser verificada por meio dos resultados do ensaio do DCP.

B. Descrição da Caixa Metálica Experimental (tronco de pirâmide)

O aparato principal consiste em uma caixa metálica em formato de tronco de pirâmide com 62,5 cm de altura e base quadrada cujos lados inferior e superior são de 75 cm e 80 cm, respectivamente, conforme Figura 2. A estrutura, que está em processo de confecção, será fabricada com chapas de aço SAE 1020, com espessura de 3mm, unidos por cantoneiras aparafusadas nas chapas com parafusos sextavados. Para suportar as pressões laterais, exercidas durante o processo de compactação, a caixa será dotada de reforços estruturais compostos por cintas de fixação com catracas de capacidade nominal de 3 toneladas. Este dimensionamento visa impedir a deformabilidade das paredes laterais, fornecendo condições para o confinamento necessário com objetivo de simular o pavimento.

Na caixa serão realizados ensaios com o LWD e com o DCP, além de ensaios para determinação da umidade e de densidade *in situ* para avaliar se compactação produzida por meio do compactador de solos está atingindo a energia pretendida. São pretendidos dois cenários, com a construção de quatro camadas de 9 cm cada, resultando em um perfil de profundidade 36 cm, executados na condição de umidade ótima do material e na energia Proctor Intermediária.

O LWD será utilizado para determinar as deflexões na área central, de forma a manter uma distância para a lateral da caixa objetivando evitar o efeito borda. De forma complementar, o DCP será empregado para a obtenção da taxa de penetração dos materiais, avaliar a uniformidade e identificar possíveis variações de compactação do solo, em especial a diferença de densidade entre a borda e o centro da caixa.

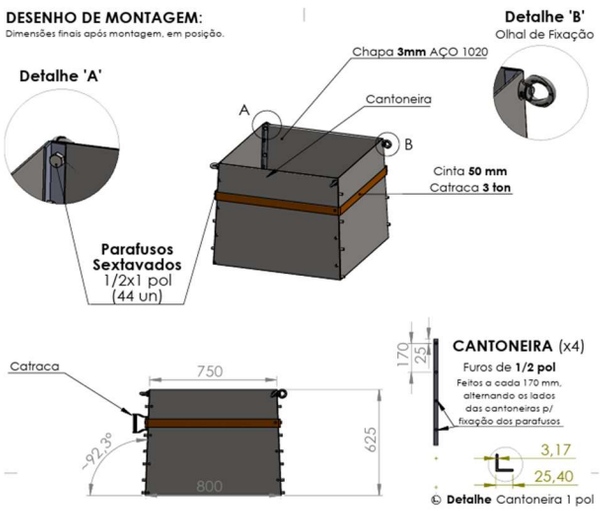

Fig. 2. Desenho técnico da caixa metálica.

C. Cilindro Metálico e Controle de Variáveis

Para avaliar a resposta dos materiais aos ensaios de DCP e de LWD, empregando placas de 150mm e de 300mm de diâmetro, foi desenvolvido um equipamento específico para complementar o aparato experimental: um cilindro metálico, já produzido, com 35 cm de diâmetro e 50 cm de altura, conforme Figura 3. Por ser um molde de menores dimensões e permitir a compactação estática com auxílio de macaco hidráulico, esse equipamento possibilita variar a umidade e as espessuras dos materiais, aumentando a extensão da pesquisa. Adicionalmente, o cilindro metálico permite a quantificação do efeito de borda em escalas menores, possibilitando ainda a correlação das leituras do LWD nas mesmas condições do solo na caixa metálica.

Assim, no cilindro metálico, estão sendo realizados ensaios com o LWD e com o DCP para avaliação do perfil de resistência do solo e ensaios de umidade e de densidade *in situ*. Serão procedidos 6 cenários, a fim de analisar os dois materiais compactados na energia Proctor Intermediária, em três teores de umidade (Ótima – 2%, Ótima e Ótima + 2%) com a construção de quatro camadas de 9 cm de espessura, de forma idêntica aos perfis que serão construídos na caixa metálica.

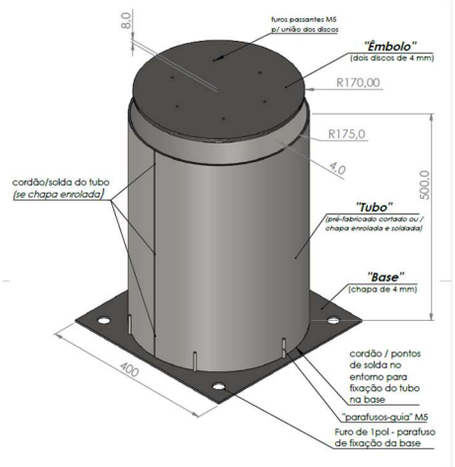

Fig. 3. Desenho técnico do cilindro metálico.

D. Modelagem Numérica

A abordagem numérica será desenvolvida utilizando o PLAXIS-2D, software no qual será feita a simulação do comportamento do pavimento sob o carregamento do LWD. A geometria do modelo numérico replicará as dimensões e espessuras das camadas do modelo de pavimento experimental tanto da caixa quanto do cilindro. Os parâmetros de entrada para os modelos constitutivos serão baseados nos resultados obtidos por meio da caracterização laboratorial dos materiais e nas condições de execução das camadas. Serão simuladas as condições de carregamento impostas pelo LWD para predizer as deflexões e as respostas de tensões e deformações nas camadas do pavimento. Além disso, o modelo computacional será ajustado para que a deflexão obtida nos ensaios de laboratório seja projetada numericamente.

O objetivo desta abordagem é validar os modelos do PLAXIS por meio da comparação entre os resultados das deflexões simuladas e os resultados obtidos experimentalmente no laboratório. Com essa validação, será possível estabelecer correlações entre as deflexões medidas e os valores do MR. Discrepâncias serão analisadas para refinar os modelos constitutivos ou os parâmetros de entrada, buscando uma calibração que permita ao modelo numérico representar fidedignamente o comportamento real do pavimento sob a carga do LWD. Este modelo validado poderá, então, ser utilizado para análises de sensibilidade e exploração de uma grande quantidade de cenários que seriam inviáveis experimentalmente.

IV. GANHOS OPERACIONAIS ESPERADOS

Para as Forças Armadas, a vantagem operacional será a obtenção de uma metodologia de análise estrutural de pavimentos baseada em equipamentos de pequeno porte, possibilitando que equipes técnicas de engenharia realizem avaliações em pistas de pouso em pelotões de fronteira ou em bases aéreas isoladas com rapidez e precisão, possibilitando obter valores de MR através de correlações com as deflexões no cilindro metálico, além de um modelo preditivo para obtenção desse parâmetro.

Dessa forma, possuir técnicas capazes de estimar a vida útil e de projetar as intervenções necessárias para a recuperação de um pavimento eleva a capacidade técnica das equipes de engenharia nas tropas em cenários de defesa e de segurança nacional.

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A expectativa é que a pesquisa permitirá a proposição de modelos preditivos para a estimativa do MR, com a análise dos dados obtidos na caixa e no cilindro metálico. As projeções obtidas no modelo computacional, calibrado com os dados dos ensaios de caracterização e com os resultados dos ensaios com o LWD permitirá ainda obter correlações para a obtenção do MR. Cabe reforçar que a metodologia proposta visa estabelecer um protocolo técnico simplificado e de baixo custo logístico para a avaliação de pavimentos em áreas de interesse da Defesa, como pelotões de fronteira e aeródromos remotos.

REFERÊNCIAS

[1] BALBO, J. T., "Pavimentação Asfáltica: Materiais, Projeto e Restauração", Oficina de Textos, São Paulo, 2007.

[2] BERNUCCI, Liedi Bariani *et al.* "Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros". 2ª ed. Rio de Janeiro: Petrobras, 2022.

[3] BETTI, G. et al., "Active fillers' effect on in situ performances of foam bitumen recycled mixtures", Road Materials and Pavement Design, vol. 18, nº 2, pp. 281-296, 2017.

[4] CHOKKERD, J. et al., "Recalibrated Correlations between Dynamic Cone Penetrometer (DCP) Data and California Bearing Ratio (CBR) in Subgrade Soil", Eng, vol. 5, pp. 1173-1182, 2024.

[5] DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. *Manual de Restauração de pavimentos asfálticos*. 2ª ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

[6] ELHAKIM, A. F. et al., "The use of light weight deflectometer for in situ evaluation of sand degree of compaction", HBRC Journal, nº 10(3), pp. 298-307, 2014. https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2013.12.003

[7] HUANG, Yang H. "Pavement analysis and design". 2nd. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall; Pearson Education, 2009.

[8] MOHAMMAD, Louay N. *et al.* "Development of Models to Estimate the Subgrade and Subbase Layers' Resilient Modulus from In situ Devices Test Results for Construction Control (FHWA/LA/406)". Washington, D.C.: FHWA, U.S. Department of Transportation, 2008.

[9] NAZZAL, M. D. et al., "Evaluating the Light Falling Weight Deflectometer Device for In Situ Measurement of Elastic Modulus of Pavement Layers", Transportation Research Record, nº 2016, pp. 13-22, 2007. https://doi.org/10.3141/2016-02