

SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS INSTRUMENTADOS SUBMETIDOS A DIFERENTES CONDIÇÕES DE SATURAÇÃO

Gustavo Adolfo Badilla Vargas
Francisco Thiago Sacramento Aragão
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Programa de Engenharia Civil UFRJ/COPPE

RESUMO

O objetivo principal desta pesquisa é contribuir com o entendimento sobre o comportamento global dos materiais e estruturas de pavimentos considerando a variação do nível do lençol freático, uma das principais variáveis associada às condições climáticas. Para isto, foi utilizado um modelo físico em uma escala de verdadeira grandeza com perfis reais de campo. Além disso, o comportamento mecânico dos materiais que compõem as camadas de quatro estruturas de pavimentos rodoviários costarriquenhos foi avaliado a partir de ensaios de laboratório. Estas características foram usadas como parâmetros de entrada para simular o comportamento das estruturas de pavimentos em um programa de elementos finitos. A partir dos resultados, verificou-se que o teor de umidade dos materiais granulares afeta significativamente a deflexão superficial e as deformações críticas da estrutura. Este estudo corresponde a uma análise paramétrica inicial e faz parte de uma pesquisa ampla, que permitirá a modelagem avançada de pavimentos asfálticos considerando a anisotropia e o comportamento não linear de materiais granulares.

ABSTRACT

The main objective of this research is to contribute with the understanding of the global behavior of the materials and pavement structures taking into account the water table level, which is one of the main variables associated to the climatic conditions. For this, a physical model was used on a real scale with real field profiles. Also, the mechanical behavior of the materials of four Costa Rican road pavement structures was evaluated based on laboratory testing. These characteristics were used as input parameters to simulate the behavior of the pavement structures in a finite element program. From the results, it was verified that the moisture content of unbound granular materials significantly affects the surface deflections and the critical strains of pavement structures. This study corresponds to an initial parametric analysis and is part of a broad research that will allow the advanced modeling of asphalt pavements considering the anisotropy and the nonlinear behavior of granular materials.

1. INTRODUÇÃO

Os pavimentos são estruturas de múltiplas camadas destinadas a resistir aos esforços do tráfego de veículos e do clima, melhorando as condições de rolamento, conforto e segurança dos usuários.

Em métodos modernos de dimensionamento deste sistema de camadas, o módulo de resiliência tem sido usado como parâmetro de entrada, já que considera o efeito da ação de cargas repetidas, correspondentes a cargas em movimento, sobre os materiais das estruturas dos um pavimento.

O dimensionamento das camadas de um pavimento depende em grande parte da seleção adequada do módulo de resiliência do subleito. Daí a importância de estudar os principais fatores que podem afetar o comportamento do solo: a) propriedades (mineralogia das argilas, sucção, plasticidade, densidade seca, estrutura, etc.); b) condições ambientais (condição de umidade inicial, clima, profundidade do nível freático, temperatura, drenagem); c) estado de tensões (solos adensados ou sobre adensados, tensões efetivas iniciais, ciclos de umidade e secagem, perfil do solo).

Hoje, no Brasil e no mundo, a maioria dos projetos de estruturas de pavimentos ainda são

elaborados com base no comportamento mecânico de solos saturados, que tende a não ser a condição mais otimizada. No caso da variação do módulo de resiliência com a variação do teor de umidade, alguns estudos e resultados obtidos por Fredlund e Rahardjo (1993), Rodrigues (1997), Gu (2015), entre outros autores, indicam que, em geral, o aumento de umidade pode ocasionar queda significativa no módulo de resiliência.

No entanto, não existem na literatura modelos consagrados para a previsão do módulo de resiliência que considerem a influência da sucção do solo de forma direta. Portanto, a literatura ainda carece de pesquisas neste assunto para incluir as variações do módulo de resiliência com a umidade como parâmetro prático para o dimensionamento de pavimentos usando métodos mecanístico - empíricos.

2. OBJETIVO

O objetivo principal desta pesquisa é contribuir com o entendimento mais aprofundado sobre o comportamento global de estruturas de pavimentos de acordo com a variação do nível de saturação dos materiais que compõem estas estruturas. Para isso, foi avaliado o comportamento mecânico dos materiais constituintes das camadas de quatro estruturas de pavimentos típicos rodoviários costarriquenhos, sob condições controladas de laboratório, frente à oscilação de umidade de suas camadas, a partir da variação do nível do lençol freático. Foi utilizado um modelo físico em uma escala de verdadeira grandeza com perfis reais de campo. As características mecânicas de cada material foram determinadas em ensaios de laboratório. Estas propriedades foram adotadas como parâmetros de entrada para simular o comportamento da estrutura do pavimento, por meio de um programa de elementos finitos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Influência do clima no desempenho do pavimento

Os pavimentos, além de resistirem aos esforços do tráfego de veículos, devem ser projetados e construídos para resistir às variações sazonais do clima. Os principais fatores ambientais que têm influência no desempenho da estrutura do pavimento são: a precipitação, a temperatura, a radiação solar, a nebulosidade, a velocidade do vento, a profundidade do lençol freático e a umidade relativa

Dos fatores mencionados, a precipitação, a temperatura e a radiação solar são os fatores que podem influir mais no desempenho do pavimento (Medina e Motta, 2015). A água e o calor podem afetar a intemperização dos agregados minerais, materiais betuminosos, concreto e misturas cimentadas, o que pode ser intensificado pela ação desagregadora do tráfego. Nos trópicos, é comum que os meses mais quentes também sejam os mais chuvosos, o que ativa a intemperização química. Além disso, a resistência à derrapagem diminui quando as superfícies estão molhadas ou cobertas de gelo. Também é possível observar migrações de sais do solo ou dos agregados das camadas de pavimentos que se depositam nas superfícies do revestimento devido à capilaridade ascensional da água com sais dissolvidos.

Segundo Medina e Motta (2015), os solos nunca são encontrados totalmente secos em estado natural e sempre apresentam uma quantidade de água retida nos vazios, correspondente à umidade de equilíbrio, definida como o valor médio da gama de variação do teor de umidade do solo do subleito ao longo do ano, após a fase de acomodação dos primeiros meses de serviço.

A água produz grande efeito nas propriedades mecânicas dos materiais constituintes e no desempenho do pavimento em longo prazo. No Brasil, segundo Medina e Motta (2015) e Franco (2007) os métodos de projeto não incorporam de maneira sistemática fatores que considerem o efeito de drenagem no desempenho. Diversos estudos de campo indicam que subleitos e rodovias bem projetadas e construídas com dispositivos de drenagem (superficial e profunda) eficientes permitem adotar o critério de correspondência entre a umidade de compactação das amostras de solo nos ensaios e a umidade de equilíbrio das camadas de pavimentos. Além disso, como não há grandes variações sazonais, esta umidade é tipicamente considerada a mesma ao longo de toda a análise de dimensionamento.

3.2. Mecânica de solos não saturados

Os conceitos da mecânica de solos clássica foram desenvolvidos e apresentados por Terzaghi em 1943, considerando solos saturados. No entanto, a condição de não saturação pode ser encontrada em solos naturais ou artificiais (solos compactados), solos naturais de origem sedimentar (aluviais, colúvios e eólicos) e de origem residual (lateríticos e saprolíticos) onde os vazios do solo não estão totalmente preenchidos por água, mas por água e ar. Nestas condições, são necessárias novas formulações para entender o comportamento dos solos e novas metodologias para ensaiar esses solos.

De modo geral, o que difere um solo não saturado de um solo saturado é o número de fases presentes: em um solo saturado, há duas fases: água e partículas de solo; já para o caso dos solos não saturados, podem ser distinguidas quatro fases: água, ar, solo e a membrana contrátil (interface ar- água) (Fredlund e Rahardjo, 1993).

A membrana contrátil age como uma fina membrana elástica situada na fronteira entre o ar e a água ao longo dos vazios do solo. O mecanismo responsável por este efeito é a tensão superficial. A membrana puxa as partículas umas contra as outras causando até mesmo o trincamento da camada. As alterações no estado de tensões desta fase podem gerar mudanças no teor de umidade, no volume e na resistência ao cisalhamento dos solos (Fredlund et al. 2012).

3.3. Módulo de resiliência

Para a determinação do módulo de resiliência de materiais de pavimentação, têm-se utilizado equipamentos de carga repetida em laboratório. Nestes ensaios, a força aplicada atua sempre no mesmo sentido de compressão, de zero a um máximo, e depois diminui até anular-se ou atingir um patamar inferior, para atuar novamente após um pequeno intervalo de repouso (fração de segundo). A amplitude e o tempo de pulso dependem da velocidade do veículo e da profundidade em que se calculam as tensões e deformações produzidas.

Em geral, para simular o carregamento correspondente à passagem de roda, é aplicada uma carga semi-senoidal, com um tempo de duração de aplicação total de 0,1 segundo e um repouso de 0,9 segundo. São utilizados diferentes estados de tensões, aplicando diferentes tensões de confinamento, σ_3 , e tensões de solicitantes, σ_1 . Durante os ciclos de repetição de carga, são produzidos deslocamentos no corpo de prova e, nesses deslocamentos, uma parcela é recuperável e a outra é acumulada ou permanente, sendo desejável que os deslocamentos permanentes sejam de pequena magnitude.

Por definição, o módulo de resiliência é determinado pela Equação (1):

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (1)$$

em que: $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$: tensão desvio aplicada repetidamente no eixo axial [MPa];

σ_1 : tensão principal maior [MPa];

σ_3 : tensão principal menor ou tensão de confinamento [MPa];

ε_r : deformação específica axial resiliente (recuperável) [mm/mm];

sendo: $\varepsilon_r = \frac{\delta_r}{L}$, ou seja, deslocamento recuperável (δ_r) pela altura ou espessura (L) do corpo de prova submetido às tensões [mm/mm].

2.3.1. Fatores que influenciam o módulo de resiliência

O módulo de resiliência depende da natureza e constituição do solo, das condições de estado e das solicitações das tensões. É afetado por vários fatores (Rodrigues, 1997; Medina e Motta, 2015): (a) número de repetições da tensão desvio; (b) duração e frequência do carregamento; (c) método de compactação e peso específico aparente seco; (d) condição de umidade.

4. MATERIAIS E METODOLOGIA

4.1. Seleção de materiais

Na Costa Rica, pelas condições típicas de clima tropical, tipo de solo, regime de chuvas e topografia, faz-se necessário estudar e entender melhor o comportamento dos solos não saturados na estrutura do pavimento. Situação parecida acontece em regiões do Brasil, especialmente nas com ambientes de clima úmido - perúmido (característico da floresta amazônica e pinheiral) e alguns pontos da região centro-oeste (pantanal), onde existem elevados teores de umidade de equilíbrio das camadas do pavimento ou ainda grandes e frequentes variações dos teores de umidade de equilíbrio associadas com variações sazonais no nível do lençol d'água. Tais condições não acontecem na maioria dos solos onde foram construídas as principais estradas e rodovias do Brasil (Franco, 2007).

4.2. Pistas experimentais

Para o desenvolvimento de modelos de previsão, foram construídas e instrumentadas quatro pistas experimentais de estruturas de pavimentos flexíveis nas instalações do PaveLab do Laboratório Nacional de Materiais e Modelos Estruturais da Universidade da Costa Rica (LanammeUCR). Estas pistas têm sido ensaiadas fazendo uso de um Simulador de Tráfego tipo HVS (*Heavy Vehicle Simulator*, Mark VI, DYNATEST).

Os simuladores de tráfego tipo HVS são grandes equipamentos de campo que permitem fazer de forma acelerada a avaliação do desempenho estrutural de seções de pavimentos para a determinação da vida de fadiga e da resistência à deformação permanente em condições muito mais próximas da situação real do tráfego e dos materiais do que os ensaios de laboratório. Estes equipamentos fazem atuar uma ou duas rodas de caminhão sobre uma curta seção do pavimento mediante ciclos de carga contínuos durante várias horas por dia. Assim, reproduz-se, em curto espaço de tempo, o número de passagens de eixos previstos no projeto da estrutura ensaiada.

A Figura 1 e a Tabela 1 apresentam as características das estruturas de pavimentos que foram construídas em maio de 2013, as espessuras obtidas utilizando um radar de penetração no solo (*Ground Penetrating Radar*, GPR), assim como os resultados dos módulos de resiliência

retroanalizados a partir dos deslocamentos elásticos obtidos do equipamento de impacto por queda (*falling weight deflectometer, FWD*).

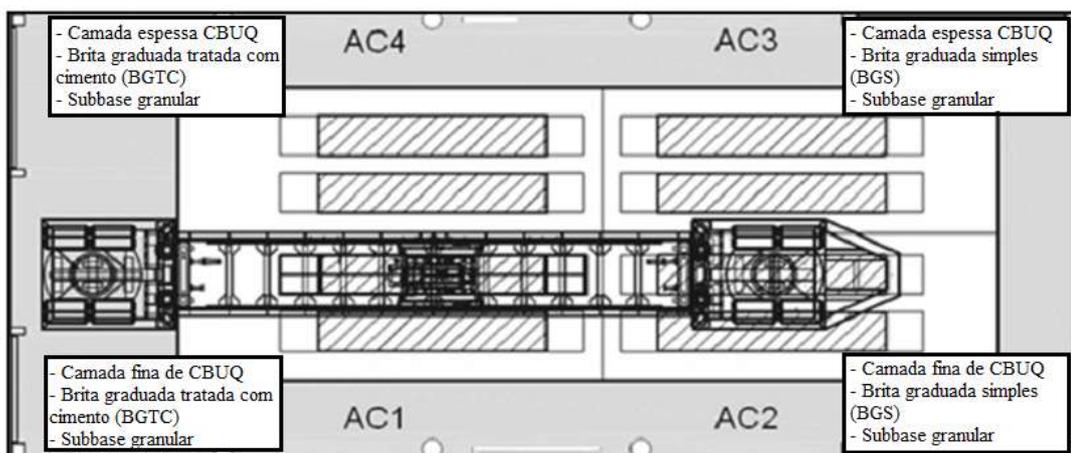


Figura 1: Pistas experimentais do PaveLab

Tabela 1: Relação volume-velocidade medida no local

Propriedade	Pista			
	AC1	AC2	AC3	AC4
Espessura da camada de CBUQ (H1), cm	6,1	6,3	13,2	13,2
Espessura da camada de base BGTC/BGS (H2), cm	21,9	21,2	31,0	24,9
Espessura da camada de sub-base (H3), cm	30,1	30,1	30,1	30,1
Módulo da camada de CBUQ para 25°C (E1), MPa	3800	3800	3800	3800
Módulo da camada de base BGS/BGTC (E2), MPa	1200	170	170	1200
Módulo da camada de sub-base (E3), Mpa	140	140	140	140
Módulo da camada de subleito (E4), Mpa	70	70	70	70

A camada superior é composta por concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), com tamanho de agregado nominal de 19,0 mm, teor ótimo de ligante de 4,9%, com relação à massa total da mistura, dosado usando o método de Marshall (ASTM D-1559). O ligante usado foi um AC 30 (conforme as especificações costarriquenhas), classificado pela metodologia Superpave como PG 64-22. Nota-se que “22” corresponde à temperatura intermediária e não à temperatura baixa especificada pela norma AASHTO M320.

A brita graduada tratada com cimento (BGTC) usou agregado extraído da jazida Tapezco, província de Alajuela, Costa Rica, com o cimento costarriquenho Sansón UG, e foi dosada para suportar 35 kg/cm², com teor de cimento de 1,7% por volume de agregado e densidade máxima de 2013 kg/m³.

Os materiais de brita graduada simples (BGS) e sub-base granular foram extraídas da jazida Tapezco, província de Alajuela, Costa Rica, e tiveram densidade máxima de 2217 kg/m³ e teor de umidade ótima de 8,6%. O material de sub-base tem um índice de suporte de Califórnia, ISC, de 95%.

Finalmente, a camada de subleito foi composta por um solo típico da região onde foram construídas as pistas experimentais e classificado como MH (segundo a Classificação Unificada de Solos) ou A-7-5 (segundo o sistema de classificação rodoviária dos solos da AASHTO). Foi

construída com uma densidade máxima de 1056 kg/m³, um teor de umidade ótima de 52% e um ISC de 6,6% (Leiva et al., 2016).

Segundo Camacho-Garita et al. (2017), para o controle do lençol d'água, foi desenvolvido um sistema de distribuição de água por gravidade com a construção de um reservatório adjacente às pistas experimentais.

4.3. Modelagem numérica

A modelagem numérica é uma poderosa ferramenta que permite a avaliação das respostas dos pavimentos asfálticos considerando as diferentes propriedades dos materiais componentes da sua estrutura, as suas geometrias e as condições de carregamento impostas pela ação do tráfego.

Entre os programas comerciais de elementos finitos disponíveis, foi utilizado o ABAQUS, por sua grande versatilidade e por permitir customizações de acordo com características específicas de materiais e estruturas a partir da criação de sub-rotinas programadas pelo próprio usuário.

4.3.1. Modelagem numérica incorporando propriedades anisotrópicas transversalmente

Segundo Maina et al. (2017), a anisotropia transversal (*cross-anisotropy*, em inglês) é uma das características mais prevalentes dos materiais utilizados nas camadas dos pavimentos asfálticos. No entanto, esse tipo de comportamento muitas vezes não é considerado. Assim, ao invés de as propriedades elásticas na direção horizontal e vertical serem consideradas diferentes, geralmente é adotada a hipótese simplificadora de isotropia.

Masad et al. (2006), demonstraram a importância de incorporar nos materiais as propriedades anisotrópicas transversalmente na análise do comportamento do pavimento. Os resultados mostraram como a precisão dos deslocamentos melhoraram quando foi incorporada a anisotropia transversal na análise. Segundo Oh et al. (2006), a principal motivação de considerar o uso da anisotropia transversal nos materiais granulares e solos, na modelagem das camadas na estrutura do pavimento, é a eliminação das tensões de tração que são estimadas quando se opta por uma análise isotrópica. Na prática, é sabido que os materiais granulares não têm resistência à tração.

O modelo constitutivo para materiais elásticos com anisotropia transversal requer a definição de cinco parâmetros: a) módulo de Young vertical, E_y ; b) módulo de Young horizontal, E_x ; c) módulo de cisalhamento, G_{xy} ; d) módulo de Poisson para caracterizar o efeito nas deformações horizontais pelas deformações verticais, ν_{xy} ; e) o módulo de Poisson para caracterizar o efeito nas deformações horizontais pelas deformações horizontais, ν_{xx} .

No caso de um problema axissimétrico, considerando a anisotropia transversal, a lei de Hooke generalizada pode ser definida como:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & -\frac{\nu_{xx}}{E_x} & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & 0 \\ -\frac{\nu_{xx}}{E_x} & -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_x} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (2)$$

No ABAQUS, esse modelo constitutivo precisa ser arranjado como uma relação de deformação-tensão. Desta maneira, a Equação 2 pode ser redefinida como:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E_y}{\alpha\beta} \begin{bmatrix} n(1 - nv_{xy}^2) & nv_{xy}\alpha & n(v_{xx} + nv_{xy}^2) & 0 \\ nv_{xy}\alpha & 1 - v_{xx}^2 & nv_{xy}\alpha & 0 \\ n(v_{xx} + nv_{xy}^2) & nv_{xy}\alpha & n(1 - nv_{xy}^2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m\alpha\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Onde $n = \frac{E_x}{E_y}$; $m = \frac{G_{xy}}{E_y}$; $\alpha = 1 + v_{xx}$; $\beta = 1 - v_{xx} - 2nv_{xy}^2$.

A relação deformação-tensão apresentada na Equação 3 pode ser utilizada para os cálculos incrementais das tensões devidas aos aumentos incrementais de deformação no ABAQUS. Por outro lado, a magnitude do módulo de Young, ou módulo de elasticidade, pode depender do estado de tensões e/ou do conteúdo de umidade no caso de materiais granulares e solos.

Com a finalidade de caracterizar a sensibilidade à umidade e o comportamento não linear anisotrópico transversalmente dependente do estado de tensões dos materiais granulares, autores como Oh et al. (2006), Gu (2015) e Gu et al. (2016) propuseram a implementação do modelo constitutivo proposto por Lytton (1996), que considera o estado de tensões e sucção matricial, por meio de uma rotina UMAT (user subroutine to define a material's mechanical behavior) para a definição de comportamentos mecânicos específicos dos materiais e programada na linguagem de Fortran, para incorporação no software ABAQUS.

Implementações similares têm sido realizadas por outros autores como Maina et al. (2017) para considerar propriedades anisotrópicas transversais para superfícies de contato. No entanto, não foram encontradas na literatura pesquisas que considerem uma simulação do estado de tensões associado aos fenômenos de sucção e capilaridade prévia à caracterização mecânica do comportamento da estrutura do pavimento. Desta forma, esta pesquisa corresponde a uma análise paramétrica inicial que eventualmente permitirá a implementação de uma modelagem acoplada em duas etapas. Inicialmente, será feita a simulação dos fenômenos de sucção e capilaridade das camadas granulares para a definição do estado de tensões iniciais na estrutura. Este estado de tensões será usado como condição inicial nas simulações do comportamento mecânico das camadas dos pavimentos, avaliados a partir de simulações em que serão consideradas a anisotropia transversal e o comportamento não linear dos materiais granulares e solos.

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O LanammeUCR tem realizado ensaios de laboratório para a caracterização do comportamento mecânico dos materiais compósitos das estruturas do pavimento, os quais formam parte dos parâmetros de entrada nas simulações realizadas. A seguir são apresentados alguns dos ensaios que já foram realizados.

5.1. Sub-base e BGS

Foram realizados ensaios para a determinação do módulo de resiliência utilizado equipamentos de carga repetida em laboratório para a determinar propriedades mecânicas elásticas do material de sub-base e BGS no teor ótimo de umidade de compactação, segundo a norma AASHTO

T307.

5.2. Subleito

Foram realizados ensaios para a determinação do módulo de resiliência utilizando equipamentos de carga repetida em laboratório (segundo a norma AASHTO T307), considerando 5 condições de umidade diferentes: a) no teor ótimo de umidade de compactação; b) compactação no teor ótimo de umidade e saturação por capilaridade por 24 horas; c) compactação no teor ótimo de umidade e 2 dias seco ao ar; d) compactação no teor ótimo de umidade e 7 dias seco ao ar; e) compactação no teor ótimo de umidade e 2 dias dentro de uma câmara de umidade controlada. Com esses resultados, é possível avaliar a sensibilidade do módulo de resiliência com a umidade.

O LanammeUCR também tem realizado ensaios para a determinação da curva característica do subleito, além de ensaios de resistência ao cisalhamento e ensaios triaxiais não adensados e não drenados, que podem ser utilizados para a definição de critérios de ruptura ou falha do subleito.

5.3. Resumo das modelagens feitas no ABAQUS

5.3.1 Avaliação da influência das variações do teor de umidade

Para avaliar a influência das variações do teor de umidade nas propriedades mecânicas dos materiais constituintes das camadas, inicialmente foi simulada uma estrutura axissimétrica representativa das espessuras da estrutura AC2 apresentada na Tabela 1 (ver Figura 2). A seção analisada corresponde a uma camada de CBUQ de 6,3 cm, uma camada de BGS de 21,2 cm e uma sub-base de 30,1 cm de espessura. Para o modelo, foram empregados elementos de 4 nós axissimétricos sem integração reduzida (CAX4) do ABAQUS no domínio completo do modelo. As camadas foram consideradas totalmente aderidas entre elas.

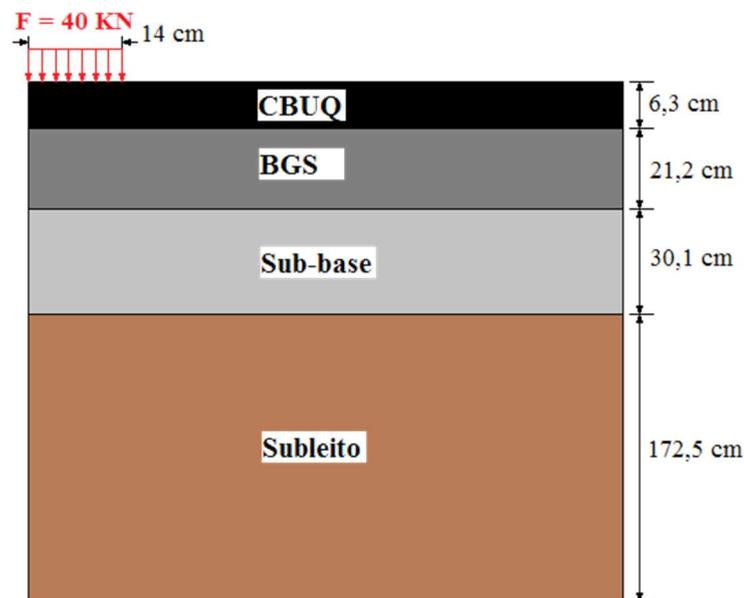


Figura 2: Representação esquemática da estrutura simulada no ABAQUS

A Tabela 2 apresenta as massas específicas e os coeficientes de Poisson dos diferentes materiais simulados. A Tabela 3 apresenta os módulos de resiliência usados nas simulações para duas condições de umidade do subleito, que são representativos dos valores obtidos nos ensaios de laboratório realizados.

Tabela 2: Massas específicas e coeficientes de Poisson utilizados nas simulações

Camada	γ_d^{max} (kg/m ³)	ν
CBUQ	2336	0,30
BGS	2217	0,35
Sub-base	2217	0,35
Subleito	1056	0,45

Tabela 3: Módulos de resiliência usados nas simulações para diferentes condições de umidade

Descrição da simulação	Módulo de resiliência (MPa)			
	CBUQ	BGS	Sub-base	Subleito
Geoestática: Modelo que utiliza propriedades mecânicas elásticas lineares e isotrópicas do material compactado na umidade ótima. As tensões iniciais são aquelas originadas pelo peso próprio dos materiais das camadas.	3800	170	140	70
Subleito sat 24 h capilaridade: Modelo isotrópico linear com o subleito saturado por capilaridade por 24 h; materiais da BGS e sub-base compactados na umidade ótima.	3800	170	140	91
Subleito seco 7 dias: Modelo isotrópico linear com o subleito seco por 7 dias ao ar. Materiais BGS e sub-base compactados na umidade ótima.	3800	170	140	490

Os resultados da bacia de deflexão, deformações horizontais e verticais em pontos específicos obtidos para a definição dos parâmetros mostrados nas Tabelas 2 e 3, são apresentados nas Figuras 3 e 4. Pode-se observar que, na bacia de deflexão, as deformações horizontais na parte inferior da camada de CBUQ, assim como as deformações verticais à compressão no topo das camadas de subleito, sub-base e BGS apresentaram variações significativas associadas com a condição de umidade. Houve uma diminuição das deflexões quando o módulo de resiliência do subleito aumentou.

No caso da deformação E11 (horizontal) na parte inferior da camada de CBUQ, parâmetro utilizado para a previsão do desempenho à fadiga da camada de CBUQ, os resultados indicam que diminuição na umidade do subleito resultou em deformações menores e, portanto, em vidas de fadiga do pavimento maiores. Por sua vez, os valores da deformação à compressão vertical no topo das camadas de subleito e BGS, parâmetros utilizados para a previsão do afundamento de trilha de roda, também foram menores maiores quando se teve uma diminuição na umidade do subleito.

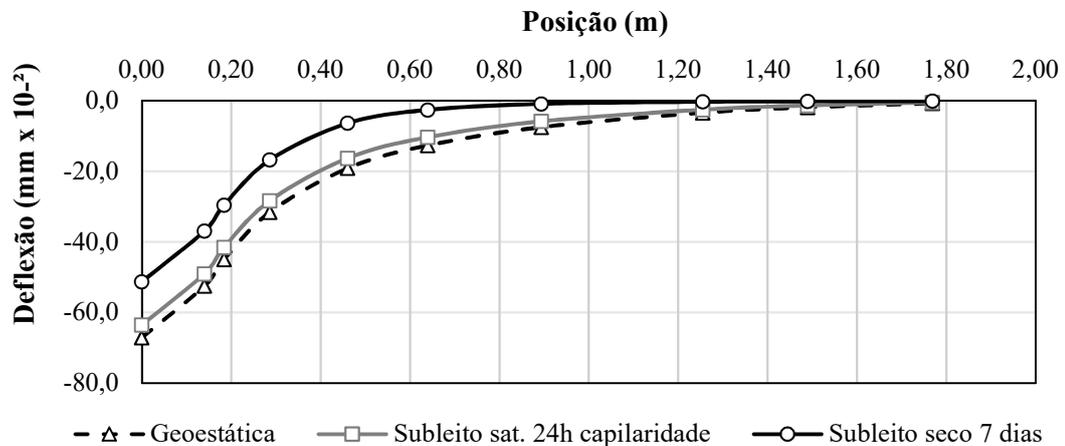
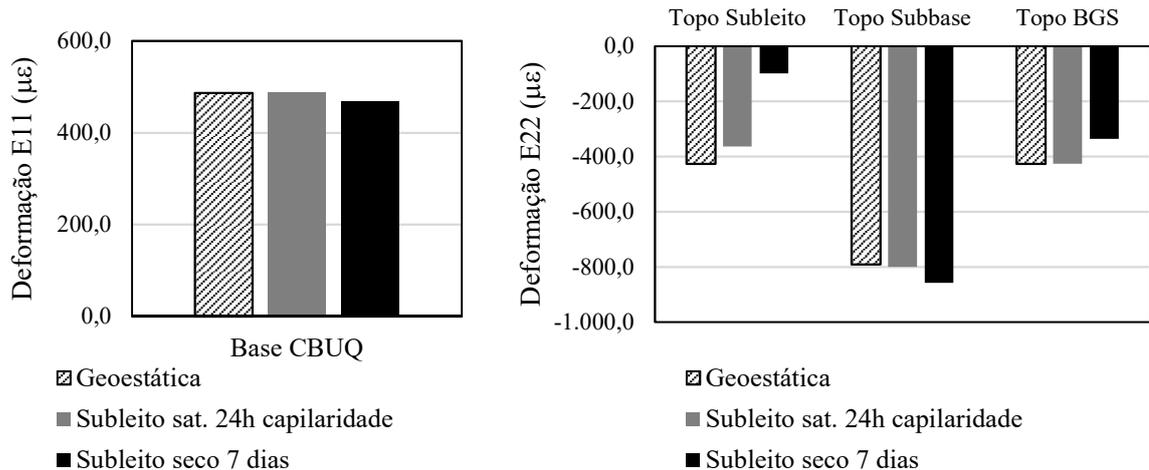


Figura 3: Deflexão na superfície para diferentes condições de saturação



(a) Deformação E11 na fibra inferior da camada de CBUQ (b) Deformação E22 (vertical) à compressão no topo das camadas granulares

Figura 4: Deformações em pontos específicos da estrutura de pavimento para diferentes condições de saturação

5.3.2 Avaliação da influência da anisotropia transversal na resposta da estrutura do pavimento

Para avaliar a influência da anisotropia transversal na resposta da estrutura do pavimento, foi usada a mesma estrutura apresentada na Figura 2. Além disso, foi programada uma sub-rotina UMAT na linguagem Fortran, que foi posteriormente incorporada ao ABAQUS para a consideração das propriedades anisotrópicas transversais, seguindo as Equações 2 e 3 e as considerações feitas por Gu (2015), Gu et al. (2016) e Maina et al. (2017). Para estas simulações, foram empregados os valores apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros empregados nos modelos

Camada	γ_d^{\max} (kg/m ³)	MR inicial (MPa)	E_h/E_v	ν_{xx}	ν_{xy}
Geoestática: Simulação utilizando propriedades mecânicas elásticas lineares e isotrópicas do material compactado na umidade ótima. As tensões iniciais são aquelas originadas pelo peso próprio dos materiais das camadas.					
CBUQ	2336	3800	-	0,30	0,30
BGS	2217	170	-	0,35	0,35
Sub-base	2217	140	-	0,35	0,35
Subleito	1056	70	-	0,45	0,45
UMAT isotrópico: Simulação utilizando UMAT com propriedades anisotrópicas transversais, mas com a consideração de propriedades isotrópicas ($E_h/E_v=1,0$).					
CBUQ	2336	3800	1,0	0,30	0,30
BGS	2217	170	1,0	0,35	0,35
Sub-base	2217	140	1,0	0,35	0,35
Subleito	1056	70	1,0	0,45	0,45
UMAT anisotrópico transversal: Simulação utilizando UMAT com propriedades anisotrópicas transversais em todas as camadas da estrutura.					
CBUQ	2336	3800	0,3	0,30	0,30
BGS	2217	170	0,3	0,35	0,35
Sub-base	2217	140	0,3	0,35	0,35
Subleito	1056	70	0,3	0,45	0,45

Como esperado, nas Figuras 5 e 6, não foram observadas diferenças entre os resultados de simulações para os casos em que foram consideradas propriedades mecânicas elásticas lineares

e isotrópicas na implementação do ABAQUS (Geoestática) e em que foram consideradas propriedades elásticas lineares isotrópicas transversais na implementação da UMAT com a seleção de $E_h/E_v = 1,0$ (UMAT isotrópico).

Pode-se observar que a consideração da anisotropia transversal na implementação da UMAT com $E_h/E_v \neq 1,0$ resultou em valores muito maiores para a previsão de deflexão superficial comparado ao caso isotrópico. No caso da deformação horizontal na parte inferior da camada de CBUQ, parâmetro utilizado para a previsão do desempenho à fadiga da camada de CBUQ, os resultados indicam que a consideração da anisotropia resultou em deformações maiores e, portanto, em vidas de fadiga do pavimento menores. Por sua vez, os valores da deformação à compressão vertical no topo das camadas de subleito, sub-base e BGS, parâmetros utilizados para a previsão do afundamento de trilha de roda, foram maiores quando foi considerada a anisotropia transversal.

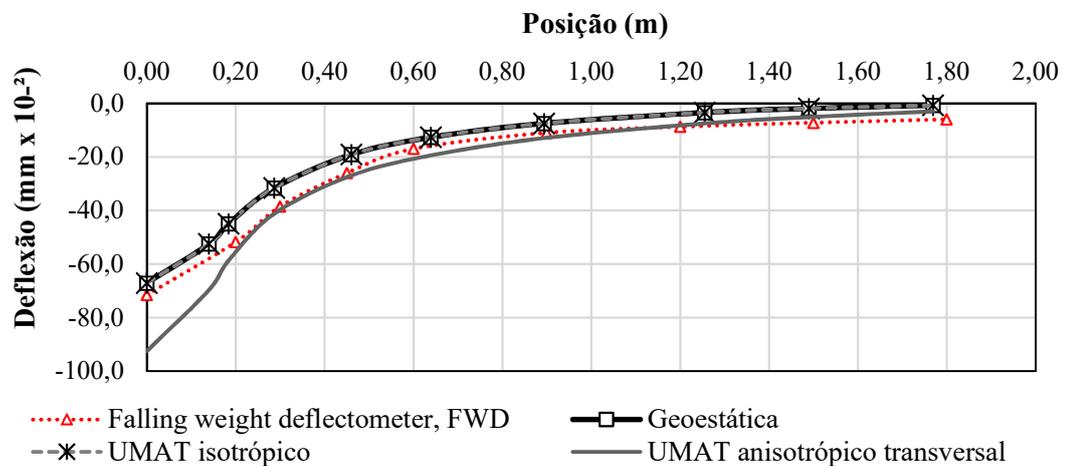
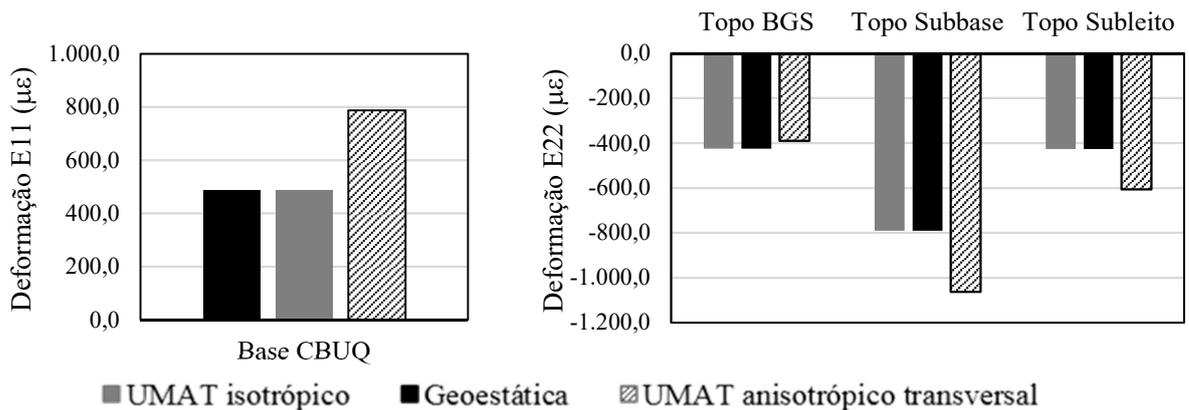


Figura 5: Deflexão na superfície para avaliar a influência da anisotropia transversal



(a) Deformação E11 na fibra inferior da camada de CBUQ (b) Deformação E22 (vertical) à compressão no topo das camadas granulares

Figura 6: Deformações em pontos específicos da estrutura de pavimento para avaliação da influência da anisotropia transversal

6. CONCLUSÕES

Com este estudo, pretende-se contribuir para o avanço da modelagem computacional e simulação do comportamento mecânico das estruturas de pavimentos asfálticos. O entendimento do processo de saturação das camadas inferiores de solo, sub-base, e base é fundamental para a geração de previsões mais precisas de deformação permanente e fadiga que acontecem nas estruturas de pavimentos.

Os resultados preliminares na bacia de deflexão, as deformações horizontais na parte inferior da camada de CBUQ, assim como as deformações verticais à compressão no topo das camadas de subleito, sub-base e BGS apresentaram variações significativas associadas com a condição de umidade. Por sua vez, os resultados sugerem que o uso de modelos anisotrópicos pode gerar resultados mais conservadores para os métodos de dimensionamento mecânico - empíricos, observação que coincide com as de Gu et al. (2016) e Maina et al. (2017).

As comparações dos resultados obtidos do monitoramento de trechos com os resultados obtidos na modelagem computacional podem ajudar na compreensão sobre o efeito das características dos materiais constituintes das camadas dos pavimentos no seu comportamento global. Para isso, um modelo numérico-experimental em desenvolvimento considerará características complexas dos materiais granulares, tais como a anisotropia transversal, o comportamento não linear, a heterogeneidade, a distribuição de vazios, o comportamento inelástico, a sucção, a dependência do estado de tensões, entre outras. Espera-se que a versão final do modelo sirva como uma ferramenta eficiente de previsão do comportamento mecânico de estruturas de pavimentos e que eventualmente contribua para o desenvolvimento de versões futuras de métodos de dimensionamento mecânico-empíricos de pavimentos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Laboratório Nacional de Materiais e Modelos Estruturais da Universidade da Costa Rica (LanammeUCR) pelo apoio financeiro para esta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Camacho-Garita, E.; Arias-Barrantes, E.; Aguiar-Moya, J.P.; Loria-Salazar, L.G. (2017). Efecto de la humedad en ensayos a escala real de pavimentos. XIX Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. Medellin.
- Franco, F. A. C. (2007). Método de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos asfálticos – SisPav. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, Brasil.
- Fredlund, D. G.; Rahardjo, H. (1993). Soil Mechanics for Unsaturated Soils. John Wiley&Sons, New York.
- Fredlund D.G.; Rahardjo, H.; and Fredlund, M. (2012). Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Gu, F. (2015). Characterization and performance prediction of unbound granular bases with and without geogrids in flexible pavements. Tese de doutorado. Texas A&M University. Texas. United States.
- Gu, F.; Luo, X.; Zhang, Y.; Lytton, R.L.; Sahin, H. (2016). Modeling of unsaturated granular materials in flexible pavements. 3rd European Conference on Unsaturated Soils.
- Leiva, F.; Vargas, A.; Aguiar, J.P.; Loria, L.G. (2016). Development and calibration of permanent deformation models. The Roles of Accelerated Pavement Testing in Pavement Sustainability.
- Maina, J.W.; Kawana, F.; Matsui, K. (2017). Numerical modelling of flexible pavement incorporating cross-anisotropic material properties. J. South African Institution of Civil Engineering. Vol. 59. No. 1. pp. 22-27.
- Masad, S.; Little, D.; Masad, E. (2006). Analysis of flexible pavement response and performance using isotropic and anisotropic material properties. Journal of Transportation Engineering, ASCE, 132(4). pp. 342–349.
- Medina, J.; Motta, L. M. (2015). Mecânica dos pavimentos. 3. ed. Rio de Janeiro, RJ. Brasil.
- Oh, J.; Lytton, R.L.; Fernando, E.G. (2006). Modeling of pavement response using nonlinear cross-anisotropy approach. Journal of Transportation Engineering (132). pp. 458-468.
- Rodrigues, M. R. (1997). Influência da sucção no módulo de resiliência de solos típicos de subleito de pavimentos do Rio Grande do Sul. Dissertação de mestrado. UFRGS. Porto Alegre, Brasil.