

Influência de um solo expansivo de subleito na ocorrência precoce de trincas em um pavimento asfáltico reconstruído

Ítalo Miller Machado Pereira

Mestrando, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, Brasil,
italomillermachado@hotmail.com

Mario Sergio de Souza Almeida

Docente, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, Brasil, mario.almeida@ufrb.edu.br

Maria do Socorro Costa São Mateus

Docente, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, Brasil, socorro@uefs.br

Weiner Gustavo Silva Costa

Docente, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Brasil, weiner@ufrb.edu.br

Nádgyla Layana Tófolo Silva

Graduanda, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Brasil, tofolo.nadgyla@hotmail.com

RESUMO: A ocorrência de solos expansivos é comum em diversos países, como África do Sul, Austrália, China, Estados Unidos da América, Israel, Índia e Brasil. São solos com variações significativas de volume quando submetidos a processos de umedecimento ou secagem, apresentando elevada deformabilidade, acompanhada de perda de resistência na presença de água. Este trabalho, ainda na fase preliminar, busca correlacionar o desempenho de um pavimento asfáltico flexível na BR-110, município de Olindina, estado da Bahia, reconstruído sobre subleito expansivo, numa extensão de 760 m. O comportamento mecânico do solo de subleito foi inicialmente determinado por ensaios de *California Bearing Ratio* (CBR), incluindo a obtenção da expansão com sobrecarga, cuja caracterização foi complementada com a determinação da pressão de expansão com aplicação de um método baseado no procedimento denominado *Soil Volume Change Meter* (*Federal Housing Administration*). Os resultados preliminares indicam que o solo apresenta valores de CBR e expansão que não atendem os limites estabelecidos pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) para subleito, com pressão de expansão medida, da ordem de 28 kPa, que aponta para o risco de ocorrência de uma carga resultante ascendente, com potencial de ocasionar danos precoces no revestimento. Este potencial expansivo do solo de subleito, associado a posterior caracterização não saturada do comportamento mecânico, em termos de módulo de resiliência deformação permanente, permitirão compreender as causas da ocorrência precoce de trincas no segmento avaliado, apenas 4 meses após a reconstrução do pavimento.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimento flexível, Solo Expansivo, Segmento Experimental.

ABSTRACT: Expansive soils are prevalent in numerous countries, including South Africa, Australia, China, the United States of America, Israel, India, and Brazil. These soils exhibit significant volume changes when exposed to wetting or drying processes, demonstrating high deformability and reduced resistance in the presence of water. This study, still in its preliminary phase, aims to assess the performance of a flexible asphalt road on the BR-110 highway in the municipality of Olindina, Bahia state, constructed on expansive subgrade spanning 760 meters. The mechanical behavior of the subgrade soil was initially evaluated through California Bearing Ratio (CBR) tests, which included measuring overburden expansion. Characterization of the soil's expansion pressure was further determined using a method based on the Soil Volume Change Meter (Federal Housing Administration). Preliminary findings indicate that the soil's CBR and expansion values exceed the limits set by the National Department of Transportation Infrastructure (DNIT) for subgrade materials, with a measured expansion pressure of approximately 28 kPa, suggesting a risk of upward pressure, potentially causing early damage to the surface. Understanding this expansive potential, along with subsequent characterization of the soil's mechanical behavior in terms of resilience modulus and permanent deformation, will shed light on the underlying causes of early crack formation observed in the segment, just 4 months after the road surface reconstruction.

KEYWORDS: Flexible Pavement, Expansive Soil, Experimental Segment.

1 INTRODUÇÃO

Os solos expansivos são solos argilosos não saturados, caracterizados pela sua capacidade de variação volumétrica em resposta às mudanças das condições ambientais. Na Engenharia Rodoviária, esse tipo de material pode ser altamente prejudicial e se mostra um desafio na construção de pavimentos asfálticos. De acordo com Nelson e Miller (1992), a variação de volume nos solos pode ocorrer por diversos fatores, mas principalmente devido a mineralogia da fração argila, condições iniciais de umidade, variações climáticas, carregamentos externos e nível d'água. Esse tipo de solo já foi identificado em diversas regiões do mundo. Nos EUA, estima-se um prejuízo anual de cerca de 15 milhões de dólares, em anos atípicos esse valor chega a ultrapassar perdas por catástrofes naturais como tornados, terremotos e tsunamis (NELSON e MILLER, 1992). Na China, os solos expansivos alcançam cerca de 600.000 km², mais de 6% do seu território, e geram 1 bilhão de dólares/ano, no Reino Unido esse valor pode chegar a 500 milhões de dólares/ano (SHI et al, 2002; JONES, TERRINGTON, 2011). No Brasil não há dados específicos dos custos causados pela presença de solos expansivos (PAIVA, FERREIRA, FERREIRA, 2016). Segundo Puppala *et al.*, (2011), outros países, incluindo Israel, Índia e África do Sul relataram danos em pavimentos causados por solos expansivos.

Um estudo na China, conduzido por Zheng, Zhang e Yang (2009), realizou intensa investigação em uma rodovia construída sobre solo expansivo, na bacia de Ningming. Os autores investigaram propriedades geotécnicas e mineralógicas, bem como capacidade de expansão e de suporte do solo. O material foi considerado altamente expansivo, com valores de pressão de expansão entre 125 kPa e 150 kPa e expansão livre em torno de 65 % a 75%. Após estudo laboratorial, esse comportamento foi associado à elevada superfície específica e presença de diferentes argilominerais, como Ilita e Montmorilonita. Para uso do solo como camada de aterro, algumas técnicas de estabilização química, com uso cal e cimento, foram testadas. No entanto, devido à inviabilidade financeira e os impactos ambientais associados a operação de execução, decidiu-se pela substituição do solo expansivo como solução.

No Brasil, os solos expansivos estão presentes em diferentes locais do país. Na região Nordeste, especificamente, aparecem em camadas de formação cretácea, ao longo do meridiano da Bahia, passando pelo estado de Pernambuco até chegar ao Ceará (PRESA, 1980; SIMÕES, 1991). Na região Sul e centro Sul do país foram encontrados solos expansivos nas Formações Passa Dois e Tubarão, em São Paulo, Paraná e Santa Catarina e também na Formação Santa Maria, no Rio Grande do Sul, e outros estados como Rio Grande do Norte, Maranhão, Alagoas, Sergipe, Mato Grosso (VILAR e FERREIRA, 2015).

Barbosa *et al.* (2022) registraram a presença de solo expansivo na região do Acre e estudaram a possibilidade de uso desses solos em pavimentação. Os autores identificaram agravantes regionais para a expansão do solo, como presença de cursos de água e a variação sazonal, com períodos secos e quentes, causando retração e fissuras no solo, aberturas que facilitam a entrada de água nos períodos chuvosos. As amostras estudadas pelos autores foram avaliadas em relação ao índice de consistência, granulometria e análise mineralógica. As amostras mostraram propriedades semelhantes, com frações passantes, na peneira #200, próximas a 100%. A análise mineralógica mostrou presença da montmorilonita em todas as amostras. Os resultados apontaram, portanto, materiais com alto potencial expansivo, os autores destacam a necessidade de estudos mais abrangentes, que forneçam parâmetros para um dimensionamento mais eficaz de obras rodoviárias na região.

Neste contexto, no presente estudo será realizada a caracterização geotécnica de diferentes amostras do solo de subleito de um segmento reconstruído de 760 m de extensão da BR-110/BA, com vistas a avaliar sua expansibilidade e sua influência no comportamento do pavimento executado no local.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O segmento de rodovia selecionado para o estudo faz parte de um plano anual de manutenção rodoviária do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), o qual contemplou a reconstrução de locais específicos da BR-110/BA. Historicamente, o pavimento entre o km 239,60 e o km 240,36, com extensão de 760 m, passou repetidamente por um processo de deterioração precoce e severo, pouco tempo após as diversas obras de restauração já executadas no local. Este segmento está localizado na região litoral norte e Agreste da Bahia, no município de Olindina, em direção ao município de Nova Soure (Figura 1).

O município em que o local de estudo se desenvolveu está localizado na Bacia de Tucano, Sub-bacia Tucano Sul, e apresenta rochas selantes como folhelhos de origem lacustres (LOUREIRO e SAUDINO, FREITAS, 2021). O Mapa de Geodiversidade do Estado da Bahia (CARVALHO e RAMOS, 2010) alerta para existência de argilominerais expansivos que se alteram para solos argilosos na região do município de

Olindina. Quando na forma de solo, o material é descrito como aderente e escorregadio na presença de água e se desagrega em pequenas pastilhas, tornando-se erosivo e colapsável.

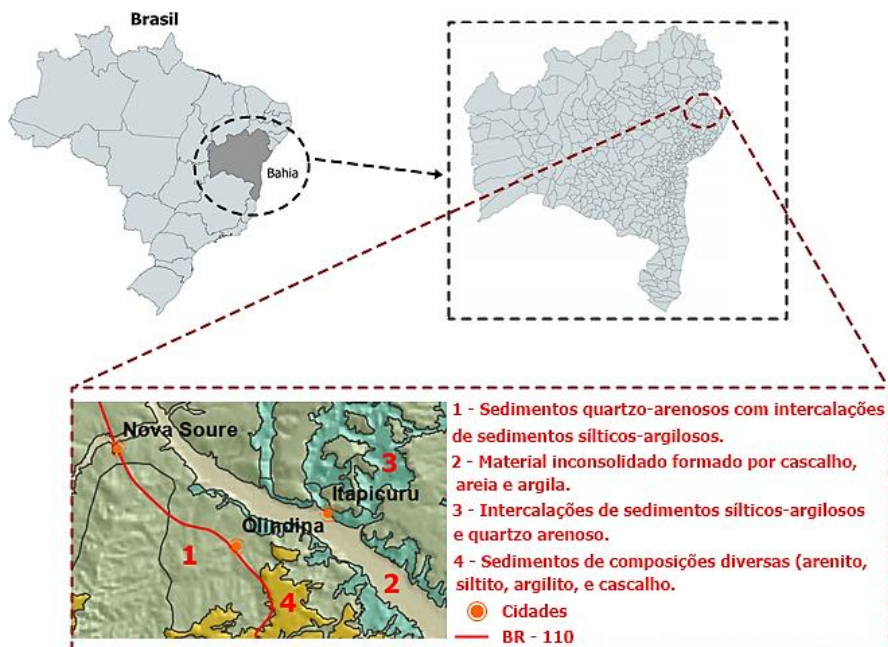


Figura 1 - Localização do segmento e contexto geológico. Fonte: Modificado do Mapa de Geodiversidade do Estado da Bahia (CARVALHO e RAMOS, 2010).

Na tentativa de mitigar de forma definitiva os problemas associados a expansibilidade do subleito desde a implantação da rodovia, foi previsto no plano de manutenção do DNIT para o ano de 2023 a reconstrução do pavimento, cujo projeto contemplou a execução de uma camada de reforço do subleito, na espessura de 15 cm, composta pela reciclagem da camada de revestimento e base existentes, camada de sub-base em Macadame seco com 25 cm, base de brita graduada simples (BGS) com 20 cm e o revestimento em concreto asfáltico. Na iminência da execução, observou-se que esta solução não seria capaz de mitigar os efeitos da existência de solo expansivo na camada de subleito e, por isso, duas alternativas de solução foram delineadas: i) a primeira contemplava a remoção de, no mínimo, 1 m do pavimento existente e substituição por material não expansivo para, posteriormente, executar-se o projeto original proposto; ii) a segunda envolvia a elevação do greide em 1 m, com a utilização pedregulho, para, em seguida, executar-se a camada de base em BGS com 20 cm e o revestimento, com 6 cm. No entanto, por limitações orçamentárias do contrato vigente, apenas foi possível aumentar a espessura da camada de sub-base em Macadame seco para 40 cm, conforme apresentado na Figura 2.

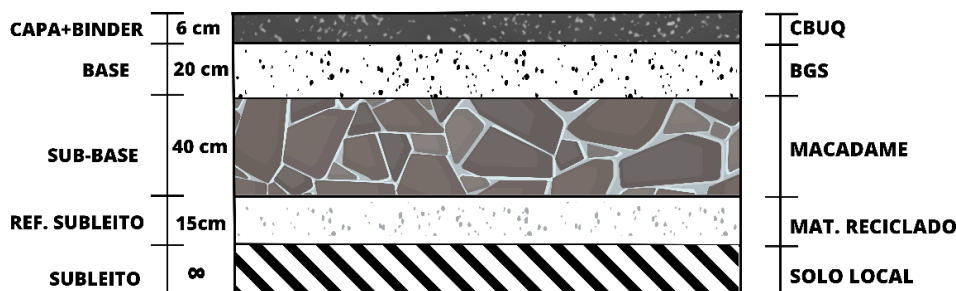


Figura 2 - Estrutura do pavimento executado.

2.1 Ensaios de Caracterização

A realização dos ensaios de caracterização contou com uma campanha de prospecção Geotécnica do pavimento antigo, pouco antes do início da obra, com abertura de cinco janelas (Figura 3) para determinação da massa específica aparente seca (ρ_d) e a umidade do topo da camada de subleito, com a aplicação dos métodos de ensaio do frasco de areia e do *Speedy*, de acordo com as normas ME DNER 92 (DNER, 1994a) e ME DNER 52 (DNER, 1994b), respectivamente. Nesta mesma campanha foram coletadas amostras em cada janela (J1 a

J5). Os teores de umidade determinados no campo com uso do *Speedy* foram confirmados no laboratório com amostras levadas para a estufa.

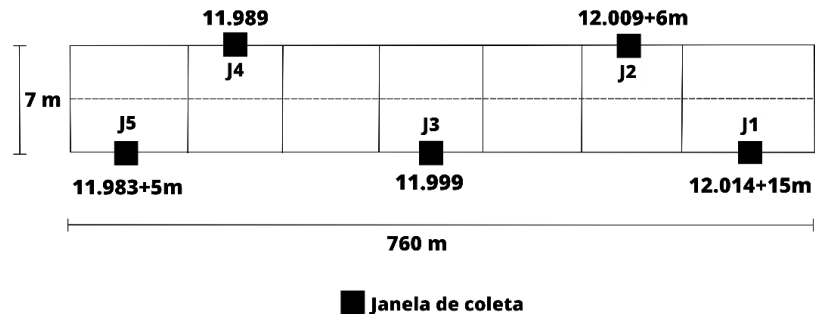


Figura 3 - Localização das janelas de coleta do material de subleito.

As amostras coletadas do solo de subleito nas respectivas janelas começaram a ser preparadas, de acordo com o método de ensaio (ME) DNER 41 (DNER, 1994a), com secagem ao ar seguida de destorroamento. A caracterização inicial contempla a determinação de parâmetros como granulometria conjunta, por peneiramento e sedimentação, ME DNER 51 (DNER, 1994b), determinação da densidade real (ρ_s), ME DNER 93 (DNER, 1994c), Limite de Plasticidade (LP) e Limite de Liquidez (LL) e CBR, ME DNER 82 (DNER, 1994d), ME DNER 122 (DNER, 1994e) e ME DNIT 172 (DNIT, 2016), respectivamente (Figura 4). Com os resultados destes ensaios iniciais será possível classificar as amostras com emprego das metodologias da *Transportation Research Board (TRB)* e Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). Para o presente estudo foram caracterizadas as janelas 1, 2 e 3.



a) Destorroamento do solo de subleito. b) Sedimentação para determinação da granulometria.
 c) Determinação da densidade real. d) Compactação para ensaio de CBR.

Figura 4 - Ensaios de caracterização.

2.2 Pressão de expansão

O método utilizado no presente estudo para determinação da pressão de expansão do solo de subleito foi baseado *Guide to Use of Federal Housing Administration (HENRY e DRAGOO, 1965)*. Para aplicação do referido método, o solo foi devidamente preparado de acordo com a norma do DNER 041 (DNER, 1994a). Em seguida, o material foi quartado para obtenção de amostras representativas e passado na peneira #10. Após isso, a amostra foi umedecida até a umidade ótima (w_{ot}) e compactado estaticamente. Ao final da compactação os corpos de prova (CP) moldados ficaram com cerca de 70 mm de diâmetro e 20 mm de altura. O parâmetro utilizado como controle de compactação foi o atingimento da $\rho_{dm\acute{a}x}$, obtida da curva de compactação do material.

Após a moldagem, cada amostra foi posicionada na base de uma prensa, entre duas pedras porosas. A caixa da prensa de ensaio é inundada, onde deve permanecer por 4 horas. Durante esse período, a pressão de expansão é determinada com auxílio de um anel dinamométrico acoplado na prensa.

3 RESULTADOS

3.1 Ensaios de Caracterização

Os resultados de granulometria das amostras do solo de subleito estão mostrados na Figura 5, referentes às janelas J1, J2 e J3.

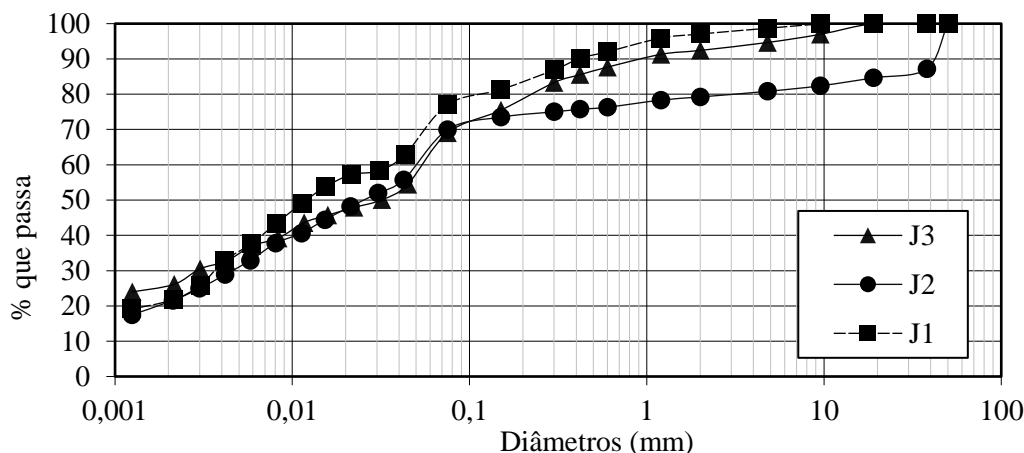


Figura 5 - Curvas granulométricas das amostras do subleito.

As curvas granulométricas obtidas para as três amostras de solo indicam tratar-se de materiais bastante semelhantes, apresentando distribuição granulométrica com predominância de finos, com teores de argila variando de 20% a 25% e teores de silte entre 40% a 50%, de acordo com a classificação granulométrica da NBR 6502 (ABNT, 1995).

A Tabela 1 exibe os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais das janelas J1, J2 e J3, incluindo, de campo, a massa específica aparente seca e teor de umidade, e de laboratório, CBR, massa específica dos grãos (ρ_s), limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP), índice de plasticidade (IP), fração de argila além das respectivas classificações pelas metodologias da *Transportation Research Board* (TRB) e Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS).

Tabela 1 - Características dos materiais de subleito.

| Janela | J1 | J2 | J3 |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|
| ρ_d campo (g/cm ³) | 1,90 | 1,82 | 1,85 |
| w (%) | 14,40 | 14,20 | 10,00 |
| ρ_s (g/cm ³) | 2,71 | 2,72 | 2,71 |
| CBR (%) | 1,29 | 1,43 | 0,91 |
| LL (%) | 37 | 44 | 36 |
| LP (%) | 23 | 24 | 19 |
| IP (%) | 14 | 20 | 17 |
| Passante #200 (%) | 71,43 | 64,56 | 63,40 |
| Fração de argila <0,002 mm (%) | 20,60 | 20,30 | 25,40 |
| TRB | A-6 | A-7-6 | A-6 |
| SUCS | CL | CL | CL |

De acordo com a classificação TRB, o solo foi categorizado como A-6 e A-7-6, um material argiloso de comportamento como subleito sofrível a mal e sujeito a variações de volume entre os estados seco e úmido. A classificação SUCS enquadrou o material como CL, uma argila pouco plástica (LL < 50%). Os ensaios de CBR apontam para um material inadequado para uso como camada de subleito, com valores abaixo de 2%, que seria o mínimo preconizado de acordo com o Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis (DNER, 1981). Portanto, as propriedades apresentadas nos ensaios de caracterização apontam, sobretudo com base na TRB, para um solo de comportamento inadequado para uso em camada de subleito.

3.2 Efeitos da Pressão de Expansão no Pavimento

Na Tabela 2 são apresentados os resultados da pressão de expansão do solo do subleito, da amostra coletada na Janela J3. Até o momento, apenas um corpo de prova foi analisado, mas, para o estudo completo

serão testados 3 CP para cada uma das amostras de subleito coletadas nas janelas J1, J2 e J3. As leituras foram realizadas no início e, em seguida, a cada 30 minutos após a saturação da amostra, totalizando 4 horas de ensaio.

Tabela 2. Pressão de expansão do subleito, janela J3.

| Ref. | Leitura (0,001mm) | Força (N) | Pressão (KPa) |
|--------|-------------------|-----------|---------------|
| 0:00 h | 0 | 0,00 | 0,00 |
| 0:30 h | 108 | 86,71 | 22,56 |
| 1:00 h | 126 | 101,26 | 26,35 |
| 2:00 h | 131 | 105,31 | 27,40 |
| 3:00 h | 131 | 105,31 | 27,40 |
| 4:00 h | 132 | 106,12 | 27,61 |

Conforme evidenciado na Tabela 2, o valor total obtido para a pressão de expansão foi de 27,61 kPa, sendo que a evolução dessa pressão atinge uma estabilização na primeira hora após a saturação da amostra em água. Aproximadamente 80% da pressão total foi alcançada nos primeiros 30 minutos, e 95% foi atingida dentro da primeira hora do ensaio. Esse resultado indica que uma chuva de curta duração já seria o suficiente para mobilizar a expansibilidade desse material.

De posse dos valores da pressão de expansão medidos em laboratório, foi possível estimar, por equilíbrio entre os esforços verticais, devidos à expansão e devido ao peso próprio das camadas do pavimento, respectivamente, a pressão resultante no revestimento asfáltico. A Tabela 3 apresenta os valores de espessura e massa específica aparente de cada camada, utilizados para estimativa do esforço resultante gerado, considerando o esforço de cima para baixo como de compressão no subleito (-) e de baixo para cima, devido a expansão, como de tração na parte superior do revestimento (+).

Tabela 3. Estimativa da pressão de expansão resultante do subleito.

| Camada | (a) Espessura (m) | (b) Massa específica aparente (t/m ³) | (c) = (a) x (b) Sobrecarga (t/m ²) |
|------------------------|----------------------|--|---|
| Rev. Asfáltico | 0,06 | 2,31 | -0,14 |
| Base | 0,20 | 2,17 | -0,43 |
| Sub-base | 0,40 | 1,60 | -0,64 |
| Ref. Subleito | 0,15 | 2,00 | -0,30 |
| Esforço - Peso próprio | - | - | -1,51 |
| Esforço - Expansão | - | - | +2,75 |
| Resultante | - | - | +1,24 |

A representação gráfica idealizada neste trabalho da sobrecarga produzida pelo peso próprio das camadas e pela pressão de expansão do subleito está apresentada na Figura 6.

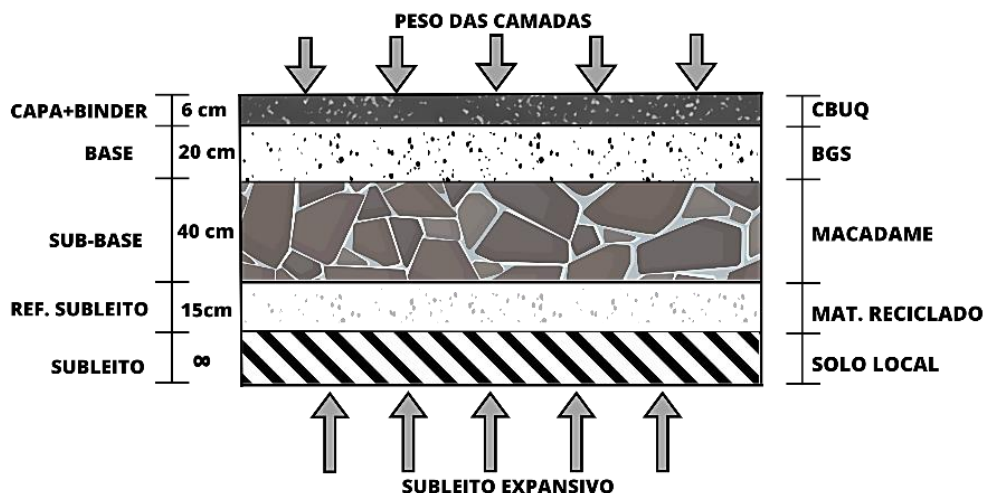


Figura 6 - Equilíbrio de esforços referentes ao peso próprio das camadas e pressão de expansão do subleito.

3.3 Inventário mensal de defeitos no pavimento reconstruído

Foi estabelecido um cronograma mensal para a realização de inventários de defeitos no pavimento reconstruído, para determinação da evolução da área trincada (AT) e afundamento da trilha de rodas (ATR), utilizando os procedimentos DNIT 007 (DNIT, 2003). No quarto mês de inventário já foi possível observar o início da ocorrência de trincas, de forma precoce, atingindo, já neste mês, AT da ordem de 9% (Figura 7).

A estratégia adotada após o aparecimento das trincas no revestimento asfáltico, foi a de extrair, com uso de sonda rotativa, testemunhos para avaliação de duas hipóteses: i) ocorrência de trincas de baixo para cima, normalmente relacionada a fenômeno de fadiga da mistura asfáltica; ii) ocorrência de trincas de cima para baixo, a qual poderia ser associada a movimentação ascendente do pavimento por conta do subleito expansivo. Ao analisar-se os testemunhos a “olho nu”, notou-se a presença de trincas na superfície superior do revestimento asfáltico, sem sinais de surgimento de trincas na parte intermediária e inferior do CP, indicando a ocorrência de trincamento do tipo de cima para baixo. Posteriormente, após uma análise minuciosa dos testemunhos coletados do revestimento com uso de imagens de ultrassom, será possível reavaliar estas observações preliminares.



a) Observação das trincas no pavimento. b) Extração de testemunhos para observação.

Figura 7 – Aparecimento de trincas no pavimento.

Na hipótese de ocorrência das trincas de cima para baixo admite-se que o valor estimado de $1,24 \text{ t/m}^2$ de pressão resultante no pavimento no sentido ascendente (Tabela 3) seria o responsável por mobilizar uma movimentação sempre que o subleito entra em contato com água em abundância, gerando esforços de tração nas camadas da estrutura, sobretudo no topo do revestimento asfáltico. Este movimento ascendente poderia ser o responsável, em grande medida, para o nível de trincamento já observado. Por fim, entende-se que caso as imagens de ultrassom não sejam suficientes para alcançar-se uma confirmação dessa primeira hipótese, os testes em andamento, que contemplam a caracterização físico-química deste solo, associada à caracterização não saturada, com a determinação da curva de retenção, módulo de resiliência e deformação permanente, em diferentes umidades, servirão para complementar a compreensão desse fenômeno.

4 CONCLUSÕES

Os solos expansivos podem apresentar comportamento nocivo às estruturas rodoviárias, no entanto, em alguns casos, a solução definitiva para esse tipo de problema se torna financeiramente inviável. Por isso, deve-se investigar o potencial expansivo do material para a aplicação de soluções com capacidade de mitigar a deterioração precoce. O material estudado no presente trabalho foi descrito nas classificações TRB e SUCS como inadequado no uso em camada de subleito, o que foi corroborado pelos resultados obtidos no ensaio de pressão de expansão no laboratório e pelas observações de campo que demonstraram o aparecimento precoce de defeitos no revestimento asfáltico após o processo construtivo. As análises complementares sobre o material de subleito, juntamente com a continuação dos levantamentos de campo irão complementar as informações já obtidas e verificar a validade da hipótese inicialmente estipulada de que o surgimento precoce de defeitos no pavimento está diretamente relacionado ao subleito expansivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. *Solos e Rochas – Terminologias*. NBR 6502, 1995. 18 p.
- Barbosa, V. H. R.; Marques, M. E. S.; Guimarães, A. C. R.; Baia, M. V. M.; Almeida, D. J. Avaliação do Potencial expansivo de solos da Formação Solimões no Estado do Acre para uso em Pavimentação. *Revista Matéria*, Rio de Janeiro. v. 27, 2022.
- Carvalho, L. M.; Ramos, M. A. B. Geodiversidade do estado da Bahia. 2010. Disponível em: http://dspace.cprm.gov.br/bitstream/doc/16625/1/Geodiversidade_BA.pdf. Acesso em: dez. 2023.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis. Rio de Janeiro, 1981. 34p.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER 041/94 ME - Solos - Preparação de amostras para ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1994a. 4 p.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER 051/94 ME - Solos - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1994b. 12 p.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-ME 082/94. Solos - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1994d. 3p.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER 093/94 ME - Solos – Determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1994c. 4 p.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER 122/94 ME. Solo - Determinação do Limite de Liquidez – método de referência e método expedito. Rio de Janeiro, 1994e. 7 p.
- Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes. DNIT 007/2003 PRO – Levantamento para avaliação da condição de superfície de subtrecho homogêneo de rodovias de pavimentos flexíveis e semi-rígidos para gerência de pavimentos e estudos e projetos - Procedimento. Brasília, 2003. 11 p.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 172/2016 ME - Solos - Determinação do Índice de Suporte Califórnia Utilizando Amostras Não Trabalhadas. Brasília-DF, 2016. 17 p.
- Henry, E. F.; Drago, M. C. *Guide to Use of the FHA Soil PVC Meter: Including Results of Nationwide Soil Tests and Correlation with Climatic Factors*. Federal Housing Administration, 1965.
- Jones, L.D.D, Terrington, R. Modelling Volume Change Potential in the London Clay. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. 44 (1): 109–22. doi:10.1144/1470-9236/08-112, 2011.
- Loureiro, E.; Saudino, C.; Freitas, I. A. Bacia do Recôncavo e Sub-Bacia Tucano Sul: Sumário Geológico e Setores em Oferta, Agência Nacional Do Petróleo, Gás Natural E Biocombustíveis Oferta Permanente, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/rodadas-anp/oferta-permanente/opc/arquivos/sg/tucano-reconcavo.pdf>. Acesso em: dez. 2023.
- Nelson, J.; Miller, D. J. *Expansive soils: problems and practice in foundation and pavement engineering*. John Wiley & Sons, 1997.
- Paiva, S. C. Propriedades geotécnicas de um solo expansivo tratado com cal. *Revista Matéria*, Rio de Janeiro. v. 21, p. 437-449, 2016.
- Presa, E. P. Parâmetro Convenientes para Projetos de Rodovias em Solo Expansivo. II Seminário Regional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, p. 83-106, 1980.
- Puppala, A. J.; Manosuthkij, T. Nazarian, S.; Laureano, R. H. Threshold moisture content and matric suction potentials in expansive clays prior to initiation of cracking in pavements. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 48, n. 4, p. 519-531, 2011.
- Shi, B.; Jiang, H.; Liu, Z.; Fang, H.Y. Engineering Geological Characteristics of Expansive Soils in China. *Engineering Geology* 67 (1–2): 63–71. Doi:10.1016/S0013-7952(02)00145-X, 2002.
- Simões, P. R. M. *Mecanismos de Instabilização dos Taludes Naturais das Formações Expansivas da Bacia Sedimentar do Recôncavo Baiano*. Tese (Doutorado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.
- Vilar, O. M.; Ferreira, S. R. M. Solos colapsíveis e expansivos. Solos não saturados no contexto geotécnico, São Paulo, SP: ABMSEG, v. 1, p. 415-436, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Silvio-Ferreira-6/publication/333444268_Capitulo_15-Livro_Solos_Nao_Saturados/links/5d72ad4a299bf1cb808b49d1/Capitulo-15-Livro-Solos-Nao-Saturados.pdf. Acesso em: dez. 2023.
- Zheng, J. L.; Zhang, R.; Yang, H. P. Highway subgrade construction in expansive soil areas. *Journal of materials in civil engineering*, v. 21, n. 4, p. 154-162, 2009.