

ESTUDO DA APLICAÇÃO DE SOLO EMULSÃO EM VIAS DE BAIXO VOLUME DE TRÁFEGO

STUDY OF THE APPLICATION OF SOIL EMULSION ON TRAFFIC LOW VOLUME ROADS

MÁRIO SILVA NETO

Engenheiro Civil / Universidade Federal de Minas Gerais
mariosn93@gmail.com

JISELA APARECIDA SANTANNA GRECO

Doutora e Docente da Universidade Federal de Minas Gerais
jisela@etg.ufmg.br

Resumo: A busca pelo desenvolvimento de técnicas alternativas de pavimentação, que apresentem bom desempenho estrutural e sejam mais vantajosas em outros aspectos, tem motivado pesquisadores e empresas envolvidas no setor. Nesse trabalho foi estudada a viabilidade da técnica solo emulsão em vias de baixo volume de tráfego, a qual consiste no melhoramento das propriedades do solo no local de obra a partir do uso de emulsão asfáltica. Primeiramente foram analisados estudos laboratoriais que constataram o incremento das propriedades de resistência do solo com o uso de emulsão asfáltica, como tração e compressão, além da variabilidade dessas conforme as condições de realização do ensaio. Em seguida, foram estudadas aplicações experimentais da técnica em vias de baixo volume de tráfego, as quais apresentaram bom desempenho e boas condições de tráfego após anos de utilização. Foi possível averiguar a presença de algumas falhas que poderiam ter sido reduzidas se houvesse maior instrução técnica da equipe executiva, além da influência de fatores climáticos na construção. Por último, foi avaliada a viabilidade do solo emulsão conforme os parâmetros econômicos e ambientais. Foi constatado o expressivo aumento do custo da técnica ao longo dos anos, sendo ainda mais econômica que a pavimentação convencional. O solo emulsão é mais sustentável que outras técnicas de pavimentação, possuindo maior eficiência energética e emitindo menos gases de efeito estufa. A partir desse trabalho foi possível atestar a viabilidade técnica, econômica e ambiental do uso de solo emulsão em vias de baixo volume de tráfego.

Palavras-chave: Solo emulsão. Pavimentação. Viabilidade econômica. Impactos ambientais.

Abstract: The search for the development of alternative paving techniques, which present good structural performance and are more advantageous in other aspects, has motivated researchers and companies involved in the sector. In this work the soil emulsion viability was studied in low volume traffic routes. This technique consists in the improvement of the soil properties in the site of the work from the use of asphalt emulsion. Firstly, laboratory studies were carried out to verify the increase of soil resistance properties with the use of asphalt emulsion, such as traction and compression, as well as their variability according to the conditions of the test. Then, experimental applications of the technique in low volume traffic routes were studied, which presented good performance and good traffic conditions after years of use. It was possible to verify the presence of some flaws that could have been reduced if there was greater technical instruction of the executive team, besides the influence of climatic factors in the construction. Finally, the viability of the emulsion soil was evaluated according to the economic and environmental parameters. It was verified the significant increase in the cost of the technique over the years, being even more economical than conventional paving. Emulsion soil is more sustainable than other paving techniques, having higher energy efficiency and emitting less greenhouse gases. From this work it was possible to attest the technical, economic and environmental viability of the use of emulsion soil in low volume traffic routes.

Keywords: Soil emulsion. Paving. Economic viability. Environmental impacts.

INTRODUÇÃO

A construção de rodovias é um ramo da Engenharia Civil que necessita do emprego de uma grande quantidade de materiais geotécnicos, os quais demandam a realização de diversas etapas, desde a extração do material até o transporte para o local de uso, além do descarte.

Dessa forma, a pavimentação é uma atividade de custo elevado, principalmente quando a região da obra não possui proximidade de jazidas para fornecimento do material requerido. Assim, uma alternativa econômica e ambientalmente amigável é a utilização do próprio solo existente no local da obra, eliminando as etapas envolvidas na obtenção e transporte do material, e ao mesmo tempo facilitando a logística do empreendimento.

O solo presente no local de obra com capacidade limitada pode ter suas características mecânicas melhoradas através de técnicas de estabilização, agregando maior resistência aos fenômenos erosivos e às solicitações impostas pelo tráfego de veículos na via.

O presente trabalho tem como assunto principal a estabilização de solos com emulsões asfálticas (solo emulsão). Essa técnica é empregada desde meados dos anos 1930 em bases e sub-bases de pavimento, sendo ainda utilizada de forma pontual no Brasil. Porém, o conhecimento alavancado acerca desse método pelas pesquisas e testes experimentais pode contribuir para o maior emprego do mesmo no futuro.

Entre os ligantes asfálticos, as emulsões asfálticas são as menos danosas ao meio ambiente, fato que contribui ainda mais com a sustentabilidade ambiental dessa técnica e, conseqüentemente, aumentando o interesse das empresas e da sociedade como um todo.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (DNIT, 2006), os pavimentos são classificados, de forma geral, em flexíveis, semirrígidos e rígidos. Os pavimentos flexíveis são aqueles nos quais todas as camadas sofrem deformação elástica significativa com o carregamento solicitado e, assim, a carga se distribui de forma aproximadamente equivalente; os pavimentos semirrígidos são caracterizados por uma base cimentada por aglutinante com propriedades cimentícias e os pavimentos rígidos são aqueles nos quais os revestimentos têm elevada rigidez em relação às camadas inferiores, de forma a absorver praticamente todas as tensões provenientes dos carregamentos aplicados.

A Confederação Nacional do Transporte realiza desde 1995 a Pesquisa CNT de Rodovias, retratando as condições de infraestrutura do sistema rodoviário brasileiro. De acordo com o Sistema Nacional de Viação, a malha rodoviária nacional compreende 212.866km de rodovias pavimentadas e 1.365.426 km de rodovias não pavimentadas. Mesmo apresentando certo crescimento, a densidade de malha rodoviária pavimentada no Brasil é limitada, correspondendo a, aproximadamente, 24,8 km de rodovia para cada 1.000 km² de área (CNT, 2017).

O levantamento apontou, quanto à qualidade da pavimentação, que metade dessa malha rodoviária pavimentada apresenta qualidade regular, ruim ou péssima. O Plano CNT de Transporte e Logística estima que são necessários 293,8 bilhões de reais para dotar o país com uma infraestrutura rodoviária adequada à demanda nacional (CNT, 2017).

Nas obras de pavimentação, o solo obtido nas proximidades do local de obra nem sempre possui as características desejadas para a sua utilização, demandando o transporte de material de outras jazidas mais distantes. No entanto, uma alternativa econômica e ambientalmente positiva é a melhoria dos atributos do solo no local de obra, realizando a estabilização do mesmo.

De forma mais específica, a estabilização de um solo é o tratamento ao qual se submete o mesmo, no intuito de melhorar as características de desempenho do material, como a resistência ao cisalhamento, a diminuição da compressibilidade e o controle da permeabilidade (MOREIRA, 2010).

A estabilização mecânica dos solos envolve mecanismos que mudam o arranjo das partículas ou a sua granulometria sem que sejam adicionados aditivos químicos no processo. Os métodos mecânicos mais utilizados na pavimentação são a compactação e a estabilização granulométrica.

A estabilização química consiste na utilização de agentes estabilizantes que, quando misturados ao solo, reagem e alteram as propriedades físicas do mesmo, resultando no aperfeiçoamento das suas características de desempenho. Nesse processo, usualmente ocorre a aglutinação do solo pelo aditivo incorporado (GONDIM, 2008).

Entre os aglutinantes mais utilizados no mercado estão o solo-cal, o solo-cimento e a emulsão asfáltica.

O asfalto é um dos materiais de construção mais antigos, sendo as misturas asfálticas a principal forma de revestimento de rodovias no mundo. Porém, o cimento asfáltico de petróleo (CAP) é um material de difícil trabalhabilidade devido a sua propriedade de viscosidade elevada, sendo necessário reduzir a sua viscosidade para que o mesmo possa

recobrir de forma eficiente os agregados. Esse resultado pode ser alcançado através do aquecimento do CAP até temperaturas apropriadas, sendo a viscosidade ideal de aproximadamente 0,2 Pa.s.

A emulsão é definida como uma dispersão de dois ou mais líquidos imiscíveis. A Norma DNIT 165 define como emulsão asfáltica um sistema constituído pela dispersão de uma fase asfáltica em uma fase aquosa, ou então de uma fase aquosa dispersa em uma fase asfáltica (DNIT, 2013).

A dispersão ocorre com a quebra do asfalto líquido aquecido em dispositivos mecânicos, como moinhos coloidais, formando os glóbulos micrométricos. Em seguida, são misturados com uma solução composta de água, emulsificante e outros aditivos.

O agente emulsificante tem como função principal reduzir a tensão interfacial entre as fases asfáltica e aquosa, fixando-se na periferia dos glóbulos dispersos do asfalto, impedindo assim a sua coalescência e estabilizando a emulsão.

A ruptura da emulsão ocorre após um período de tempo devido ao contato com os agregados, à evaporação de água ou ao desequilíbrio eletroquímico, separando assim a água dos glóbulos e permitindo a aglutinação. O tempo de ruptura é uma das formas de classificação da emulsão, que pode ser lenta, média ou rápida (PACHECO, 2011).

Outra forma de classificação é quanto à natureza elétrica do emulsificante, que ao se misturar com a água se dissocia em cátions e ânions. A parte apolar da cadeia do emulsificante tem afinidade com o betume, enquanto a parte polar tem afinidade com a água (GONDIM, 2008).

Dessa forma, o emulsificante impõe a mesma natureza elétrica entre as partículas de betume causando repulsão entre as mesmas. Se as partículas de asfalto forem carregadas positivamente, a emulsão é dita catiônica, se negativamente, a emulsão é dita aniônica.

A classificação das emulsões ocorre segundo as propriedades de tempo de ruptura, viscosidade, teores de solvente e de resíduo asfáltico. As siglas RR, RM e RL, se referem ao tempo de ruptura, isso é, rápido, médio ou lento, respectivamente. Os números 1 e 2 indicam a viscosidade, sendo o maior número indicativo de uma maior viscosidade. Já a presença da letra C indica se a emulsão é catiônica (MOREIRA, 2010).

O rompimento das emulsões catiônicas ocorre pela adsorção da parte polar da molécula de emulsificante pelo agregado natural, sem depender das condições de umidade e tampouco das condições climáticas, de forma a gerar um revestimento hidrófobo nos agregados que promoverão a repulsão da água e a fixação do ligante asfáltico (SENÇO, 1997).

No Brasil, a emulsão de ruptura lenta catiônica, a RL-1C, é a mais empregada de acordo a Associação Brasileira de Asfaltos. As emulsões lentas são mais utilizadas no método solo-emulsão, uma vez que um tempo de ruptura mais elevado propicia uma mistura mais eficiente entre solo e betume, permitindo uma estabilização mais eficaz (PACHECO, 2011).

ANÁLISE DE ESTUDOS LABORATORIAIS

Com o intuito de conhecer a capacidade do material de suportar as solicitações que serão impostas pelo tráfego durante a sua vida útil, foram analisados dois estudos realizados em laboratório envolvendo a obtenção de parâmetros de resistência da técnica solo emulsão em obras de pavimentação.

O primeiro estudo denominado “Solos estabilizados com emulsão asfáltica para uso em pavimentação: Estudo laboratorial” foi realizado pela engenheira Lysiane Menezes Pacheco (PACHECO, 2011). Nesse estudo foram utilizados o solo 1, de caracterização fina e siltosa, e o solo 2, de caracterização granular e composto de pedregulhos finos e areia. A emulsão asfáltica utilizada era neutra e foi fornecida por uma empresa produtora de materiais asfálticos, não sendo necessário realizar ensaio de carga de partícula.

Após a determinação dos teores de projeto foram realizados os ensaios mecânicos de resistência à tração (RT), resistência à compressão (RCS) e módulo de resiliência (MR) (PACHECO, 2011).

No ensaio de resistência à tração, a estabilização do solo 1 acarretou num acréscimo de RT de 442,9%, partindo de 0,07 MPa para 0,38 MPa. Já o solo 2 não possuía RT em sua condição inicial já que se trata de um solo granular, sendo que a parcela de argila, que é responsável pela propriedade aglutinante do material, não é significativa. Após a realização da estabilização do solo 2, a mistura alcançou uma RT de 0,12 Mpa (PACHECO, 2011).

Posteriormente foi realizado o ensaio de resistência à compressão em ambos os solos. Para a primeira mistura o acréscimo de RCS foi de 16,2%, partindo de 1,30 MPa para 1,51 MPa. No solo 2 o aumento de RCS foi de 30%, partindo de 0,20 MPa para 0,26 MPa.

Quanto ao ensaio de módulo de resiliência, é possível observar que a estabilização de ambos os solos para utilização em base de pavimentos eleva o valor do MR nessa camada, ocasionando, conseqüentemente, no aumento da rigidez da estrutura e diminuindo assim as tensões transmitidas ao subleito. Dessa forma, a estrutura fica menos suscetível à ocorrência de trincas e imperfeições ocasionadas por deformações plásticas, aumentando assim a durabilidade da mesma (PACHECO, 2011).

O segundo estudo analisado foi realizado pelo autor David Alex Arancibia Suárez (ARANCIBIA SUÁREZ, 2008), e analisa o comportamento mecânico de dois solos lateríticos, um argiloso e outro arenoso, ao variar propriedades como teor de emulsão, tempo de cura, tipo de emulsão utilizada e realização ou não de imersão prévia do corpo de prova em água.

No ensaio de compressão simples é observado, no solo arenoso, um decréscimo de RCS com o aumento do teor de emulsão para as amostras não imersas em água. Esse resultado é diferente quando as amostras são imersas previamente, observando-se um acréscimo de resistência conforme aumento do percentual de emulsão (ARANCIBIA SUÁREZ, 2008).

Para o solo argiloso é observada a evolução das resistências das misturas solo emulsão não imersas, havendo perdas de resistência para os teores de 2 e 4% de emulsão nos tempos de cura de 3, 7 e 28 dias. Já para os solos imersos são observados ganhos de RCS com o aumento do teor de emulsão, com destaque para o aumento da resistência em maiores tempos de cura como 14 e 28 dias.

Nesse trabalho foram realizados ensaios de compressão diametral nas amostras de solos. Para o solo argiloso foram observados efeitos positivos na resistência com o aumento de teor de emulsão e no tempo de cura nas duas condições, imersa e não imersa (ARANCIBIA SUÁREZ, 2008).

Para o solo argiloso não imerso previamente em água, a RT aumenta com o teor de emulsão para os tempos de cura de 14 e 28 dias. Nos demais casos, ocorre a diminuição da resistência com a adição de emulsão. Quando imersas, as amostras apresentaram aumento de RT proporcional ao aumento de emulsão, com exceção para o tempo de cura de 7 dias, no qual os valores de resistências foram aproximadamente iguais nas amostras.

Os padrões comportamentais de resistência são aproximados para os dois tipos de emulsão, com resultados mais significativos para a emulsão dosada, que apresenta valores superiores à emulsão convencional de em média 30% (ARANCIBIA SUÁREZ, 2008).

No ensaio de compressão triaxial para determinação dos módulos de resiliência, foi observado que o ganho de rigidez foi mais significativo para as amostras de solo argilosas. Considerando ambas as condições, com e sem imersão, as amostras compostas de solo arenoso e emulsão dosada possuíam valores superiores de MR em comparação com o solo argiloso. Mas com a utilização da emulsão convencional, as amostras de solo argiloso apresentaram valores superiores de MR nas amostras com imersão prévia (ARANCIBIA SUÁREZ, 2008).

ANÁLISE DE ESTUDOS EXPERIMENTAIS

As condições reproduzidas em laboratório não representam fielmente as condições do meio de implementação, seja na fase inicial de construção até o seu uso final. Dessa forma, visando obter um estudo mais completo, considerando fatores e condições reais impostas ao meio asfáltico, é relevante realizar estudos experimentais da implementação da técnica de solo emulsão em vias de baixo volume de tráfego.

O primeiro estudo analisado foi realizado pelo Doutor Walter Canales Sant'Ana, denominado "Contribuição ao estudo de solo-emulsão em pavimentos de rodovias de baixo volume de tráfego para o Estado do Maranhão" (SANT'ANA, 2009).

No trecho analisado o levantamento do tráfego registrou um total de 116 veículos, entre veículos de passeio, caminhões leves, ônibus e caminhões, caracterizando-se como uma via de baixo volume de tráfego. Foram realizados, então, ensaios de caracterização das camadas existentes no local, detectando-se a presença de cascalhos lateríticos provenientes da jazida e quantidade expressiva de areia média e fina no subleito (SANT'ANA, 2009).

As etapas construtivas foram iniciadas partindo da regularização e alargamento da plataforma existente, além da execução da camada de base. Durante o período de execução das obras houve incidência de chuva, sendo necessário assegurar declividades transversais para assegurar o escoamento das águas pluviais. A sequência de construção envolveu etapas de escarificação, umedecimento, homogeneização com grade de disco, aplicação de emulsão em taxas crescentes, regularização com motoniveladora, compactação com rolo liso e aplicação de capa selante. No primeiro dia as obras foram realizadas nos 100 m iniciais e no dia seguinte nos 100 m finais.

A emulsão utilizada nas obras é do tipo RL-1C, isso é, uma emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta. O autor destaca a inevitabilidade nos sulcos da escarificação, sendo esses devido a fatores como irregularidades do equipamento, inclinação transversal da via, diâmetros dos agregados graúdos, dentre outros (SANT'ANA, 2009).

Nos dias seguintes foi consolidada a compactação e distribuição mais homogênea da areia da capa selante nos 100 m finais. Durante os dias seguintes à conclusão dessa etapa de construção não houve presença de tráfego no local, o que garantiu um efeito positivo na finalização do pavimento. De acordo com o autor, o trecho apresentou uma boa aparência visual final, apesar das condições precárias de trabalho, sendo notável a presença de alguns afundamentos localizados.

O controle deflectométrico foi realizado em dois períodos, sendo o primeiro 12 dias após a conclusão das obras e o segundo 20 meses depois, em outubro de 2018. O autor destaca que nesse intervalo houve dois períodos de chuvas intensas, sendo o último de grande intensidade. As deflexões recuperáveis máximas (D_0) foram inferiores no segundo levantamento devido a fatores como a cura da emulsão e a época mais seca em outubro. O primeiro levantamento apresenta uma grande variação das deflexões, as quais são justificadas pela existência de capa selante mais espessa na primeira metade do trecho, além do período chuvoso em curso e do tempo de cura reduzido. Os raios de curvatura foram superiores no segundo levantamento, estando em acordo com os resultados obtidos de deflexão (SANT'ANA, 2009).

Da mesma forma, foram realizados levantamentos dos defeitos apresentados nos trechos em duas datas diferentes, sendo a primeira 10 meses após a realização das obras, em dezembro de 2007, e 19 meses após a conclusão das obras, em setembro de 2008. Entre os defeitos encontrados mais recorrentes na análise do pavimento, se destacam o pó, a perda de agregado por desgaste, a drenagem inadequada e as panelas. Outros defeitos como trincas e segregação de material também foram observados no local. O autor avalia que a evolução dos defeitos foi baixa no que se refere à quantidade, apresentando um pequeno aumento na severidade em alguns casos. Há um aumento, de modo geral, de panelas e de perda de agregados por desgaste (SANT'ANA, 2009).

É necessário destacar que as condições de realização desse projeto não foram ideais, sem a presença de profissionais com experiência nesse tipo de construção. Foi observado também a importância do fator climático durante o período de execução das obras, seja durante a estação chuvosa ou no período de estiagem. Ainda assim, o autor avalia que o trecho permaneceu em boas condições de tráfego, mesmo sem manutenção, após 2 anos de sua construção (SANT'ANA, 2009).

Uma contribuição interessante ao estudo de solo emulsão em vias de baixo volume de tráfego foi realizada por Moreira (2010), na qual a técnica foi utilizada em dois trechos experimentais, o primeiro em Brejo do Amparo, com extensão de 4,3 km, e o segundo no Distrito de Riacho da Cruz, com 5,2 km de extensão, ambos localizados no município de Januária (MOREIRA, 2010).

No primeiro trecho foi executada a pavimentação, durante os meses de setembro e outubro de 1996, com solução de base estabilizada com betume e capa selante do tipo Tratamento Anti-Pó (TAP). Foram realizadas inspeções no período inicial, nos meses seguintes, e após um ano de construção, as quais avaliaram a condição do pavimento como

boa. No ano 2000, aproximadamente quatro anos após a construção, foram detectados alguns poucos buracos em pontos aleatórios do trecho. Algumas das causas prováveis para a ocorrência desses defeitos foram atribuídas ao período de fortes chuvas na região, ao aumento relativo do tráfego e, principalmente, às deficiências executivas na mistura de solo emulsão pela equipe pouco experiente (MOREIRA, 2010).

No segundo trecho foi realizado o mesmo tipo de pavimento, isso é, com a utilização de solo emulsão na base e capa selante e TAP. Em julho de 2009, após cerca de 10 anos de uso, a pista apresentava boa conformação da superfície, mesmo sem ter recebido nenhum recapeamento, apenas operações regulares de correção dos buracos realizadas pela Prefeitura Municipal de Januária (MOREIRA, 2010).

ESTUDO DE VIABILIDADE DA TÉCNICA SOLO EMULSÃO

Viabilidade econômica

O estudo de viabilidade econômica foi realizado com base no trecho experimental em Januária – MG (MOREIRA, 2010). No estudo realizado por Moreira (2010), o custo estimado da pavimentação convencional foi 1,5 vezes maior que o da pavimentação com estabilização betuminosa, no ano de 2010.

Para o mesmo trecho, foram realizados cálculos dos custos considerando os dados da Tabela Referencial de Obras Rodoviárias de 2018 do DEER/MG (DEER, 2018). Os dados referentes aos preços do material betuminoso foram retirados da tabela de Preços de Distribuição de Produtos Asfálticos da ANP (ANP, 2018).

O custo total estimado para a pavimentação com solo emulsão foi de R\$114.779,01/km. Em 2010 esse valor era de R\$ 80.334,21/km, isso é, em apenas 8 anos houve um aumento de aproximadamente 43% do custo, equivalente ao acréscimo de R\$34.444,80.

O custo total estimado para a pavimentação convencional foi de R\$ 142.516,50/km. Esse valor sofreu um aumento de 17% em relação a 2010, o qual era estimado em R\$122.167,50/km.

Em comparação com o preço da estabilização através da técnica solo emulsão, baseado nos preços de mercado atuais, a pavimentação convencional é, aproximadamente, 1,2 vezes mais custosa. Essa relação era equivalente a 1,5 em 2010.

A partir desse estudo comparativo é possível observar o quão susceptível o custo da implementação de diferentes técnicas de pavimentação é em relação às variações de mercado ao longo dos anos, implicando diretamente na viabilidade da mesma. A variação de preços de materiais betuminosos apresenta o maior peso sobre o custo final, sendo que esses foram afetados pelo reajuste recente da Petrobrás, a qual aumentou em 12% o preço sobre os produtos asfálticos.

Nessa comparação com o estudo realizado em 2010, é possível observar que houve uma redução da diferença entre o custo da técnica solo emulsão e a pavimentação convencional, sendo que a primeira ainda é mais vantajosa, economicamente, para o trecho em questão. Não é possível afirmar se essa condição será mantida ao longo dos anos devido às variações de mercado, como foi observado nesse estudo.

Implicações ambientais

A utilização de solo emulsão possui potencial de favorecer o desenvolvimento sustentável, através da redução de consumo energético, redução de emissão de gases de efeito estufa (GEE) e na otimização do uso de materiais ao utilizar o solo presente no local de obra.

Um estudo realizado por Chappat e Bilal (2003) estima a quantidade de energia consumida pelo produto utilizado na pavimentação em megajoule por tonelada. Da mesma forma, também são calculadas as quantidades de emissões de GEE por cada produto de pavimentação (CHAPPAT e BILAL, 2003).

A utilização de concreto betuminoso demanda uma quantidade elevada de energia nos processos de fabricação e de usinagem à quente do mesmo, necessitando em média de 680 MJ/t. Em contrapartida, técnicas que dispensam o processo de aquecimento do concreto asfáltico precisam de menores quantidades de energia, no caso do solo emulsão, a demanda é de aproximadamente 139 MJ/t.

Da mesma forma, o concreto betuminoso é responsável por emitir uma quantidade significativa de GEE, principalmente na etapa de fabricação, liberando cerca de 54 kg/t. A utilização de solo emulsão possui a menor parcela de emissão entre todas as técnicas apuradas, equivalente a 10 kg/t, que se deve aos fatos de que a mesma não emite GEE durante o processo de fabricação e emite quantidade reduzida durante o transporte, já que é uma técnica que envolve o uso do material no local de obra.

O solo emulsão aparece como uma técnica promissora na contribuição por um desenvolvimento mais sustentável na área de pavimentação, possuindo maior eficiência

energética e emitindo menos GEE. Essa condição deve servir como incentivo para que essa metodologia ganhe mais atenção do poder público e das empresas do setor.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse estudo permitiu a observação de pontos importantes que envolvem a utilização de solo emulsão, incluindo desde aspectos técnicos até implicações ambientais.

Os estudos laboratoriais demonstraram o acréscimo das propriedades de resistência estrutural com a utilização de emulsão. O Estudo 1 demonstrou, a partir de um teor de emulsão pré-definido, o ganho em resistência à compressão, módulo de resiliência e, principalmente, o aumento de resistência à tração dos materiais. Já no Estudo 2, foi observada a variabilidade do acréscimo dessas propriedades em função das condições de execução do ensaio.

Os estudos experimentais de solo emulsão apresentaram bons resultados mesmo após períodos longos de utilização das vias de baixo volume de tráfego. Apesar do trecho construído no Maranhão ter apresentado alguns defeitos no pavimento, o autor o considera em boas condições de tráfego após 2 anos de utilização, mesmo sem manutenções. Já os dois trechos executados em Januária apresentaram boas condições mesmo após períodos longos de utilização, de 10 e 11 anos, sendo constatados poucos buracos na pista, os quais eram corrigidos por operações da prefeitura.

Em todos os estudos experimentais avaliados, os autores destacam a significância dos fatores climáticos e da falta de experiência técnica das equipes construtivas nos resultados finais obtidos.

O estudo econômico foi feito através da comparação dos custos de construção do trecho em Januária com os preços atuais de implementação do mesmo. A pavimentação com solo emulsão ainda possui custo menor em relação à pavimentação convencional, porém o seu custo aumentou de forma expressiva em apenas 8 anos, com uma variação de 43% do custo em 2010. A pavimentação convencional apresentou um aumento de 17% do seu custo nesse mesmo intervalo de tempo.

As implicações ambientais são os aspectos mais notórios e vantajosos que a utilização de solo emulsão apresenta. A partir da análise de consumo energético e de emissão de GEE, é evidente a redução de tais parâmetros com a técnica de estabilização estudada nesse trabalho, reduzindo os impactos no meio ambiente.

CONCLUSÃO

A partir desse estudo foi possível observar vários aspectos que tangem a viabilidade da técnica solo emulsão em vias de baixo volume de tráfego, incluindo aspectos técnicos, experimentais, financeiros e ambientais.

Logo na Revisão Bibliográfica é apresentado o panorama da pavimentação no Brasil, o qual demonstra uma situação precária da malha rodoviária pavimentada do país. Dos 1.578.292 km de rodovias no país, apenas 212.866 km são constituídos por rodovias pavimentadas. O levantamento apontou ainda que metade dessa rede pavimentada está em condições regular, ruim ou péssima.

Dessa forma, fica evidenciada a importância do investimento e do estudo de metodologias alternativas de pavimentação para suprir esse déficit. Esse trabalho objetivou demonstrar a viabilidade da técnica solo emulsão sob a ótica dos tópicos mais relevantes que envolvem a sua implementação.

Foram analisados estudos laboratoriais que mostraram aumentos significativos de resistência à tração com a estabilização dos solos com emulsão asfáltica. Para solos de caracterização fina e siltosa, a estabilização com emulsão acarretou aumentos de resistência à tração de mais de 400%. Mesmo solos de caracterização granular, que não possuíam resistência à tração em sua condição inicial, passaram a apresentar resistência à tração superior a 0,10 Mpa após a estabilização com emulsão asfáltica.

Análises de trechos experimentais realizados com solo emulsão em rodovias com baixo volume de tráfego mostraram baixa evolução dos defeitos, mesmo sem manutenção, após o período de 2 anos de construção. Foi constatado nas análises de trechos experimentais que essa técnica possui boa aplicabilidade em vias de baixo volume de tráfego, mesmo considerando as deficiências técnicas dos profissionais executantes dessas experimentações no Brasil. É possível assumir, a partir disso, que os resultados seriam ainda mais promissores com a participação de trabalhadores qualificados e experientes a essa tecnologia.

Essa falta de investimento e pesquisa não ocorre exclusivamente no Brasil, sendo que ainda há uma resistência forte às técnicas alternativas de pavimentação no mundo todo. Essa barreira constitui o maior empecilho para o desenvolvimento e a implementação efetiva dessas tecnologias.

Estudos de viabilidade econômica realizados no presente estudo mostraram que em apenas 8 anos houve um aumento de 43% no custo para a pavimentação com solo emulsão, ao passo que o aumento do custo da pavimentação convencional foi de 17%. Percebe-se assim

que embora a pavimentação com solo emulsão continue economicamente mais vantajosa que a pavimentação convencional, as variações de mercado ao longo dos anos impactam diretamente na viabilidade da implementação de técnicas alternativas de pavimentação.

Por outro lado, quando são analisadas as implicações ambientais da utilização do solo emulsão, ficam evidentes as vantagens dessa utilização. O emprego de concreto betuminoso convencional demanda em média um consumo energético de 680 MJ/t. No caso do solo emulsão, esse consumo cai para aproximadamente 139 MJ/t. Quanto à emissão de GEE, enquanto o concreto betuminoso emite cerca de 54 Kg/t, a utilização da técnica de solo emulsão emite o equivalente a 10 Kg/t.

Dessa forma, foi possível observar a viabilidade técnica, financeira e ambiental do solo emulsão em vias de baixo volume de tráfego, de forma que o interesse para a sua utilização deve crescer com o aperfeiçoamento de estudos acadêmicos laboratoriais e experimentais. O desenvolvimento da técnica solo emulsão, de forma a apresentar padrões de desempenho estrutural equivalentes às técnicas convencionais, pode garantir a expansão dessa tecnologia, garantindo benefícios financeiros e ambientais, trazendo retorno para a sociedade.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) pelo apoio recebido.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Preços médios de distribuição de produtos asfálticos ponderados mensais por produto e região geográfica.** Disponível em: <www.anp.gov.br/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/precos-de-distribuicao>. Acesso em: 14 Maio 2018.

ARANCIBIA SUÁREZ, D. A. **Estudo do comportamento mecânico de dois solos lateríticos do Estado de São Paulo com adição de emulsão asfáltica.** 2008. 144 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

CHAPPAT, M.; BILAL, J. **The environmental road of the future: life cycle analysis, Energy consumption and greenhouse gas emissions.** Colas Group, Setembro 2003. Disponível em: <https://www.colas.com/sites/default/files/publications/route-future-english_1.pdf>. Acesso em: 14 Maio 2018.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES. **Pesquisa CNT de Rodovias 2017:** relatório gerencial. – Brasília: CNT : SEST : SENAT, 2017. 403 p.

DEPARTAMENTO DE EDIFICAÇÕES E ESTRADAS DE RODAGEM DE MINAS GERAIS. **Tabela Referencial de Obras Rodoviárias de 2018.** Belo Horizonte, 2018. 84 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação.** 3^a ed. – Rio de Janeiro, 2006. 274 p.

GONDIM, L. M. **Estudo experimental de misturas solo-emulsão aplicado às rodovias do agropólo do Baixo Jaguaribe - Estado do Ceará.** 2008. 213 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS. **Norma DNIT 165/2013:** Emulsões asfálticas para pavimentação – Especificação de material. Rio de Janeiro. 2013. 5p.

MOREIRA, E. D. **Desempenho de dois trechos de solo-emulsão em vias de baixo volume de tráfego.** 2010. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

PACHECO, L. M. **Solos estabilizados com emulsão asfáltica para uso em pavimentação: estudo laboratorial.** 2011. 94 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SANT'ANA, W. C. **Contribuição ao estudo de solo-emulsão em pavimentos de rodovias de baixo volume de tráfego para o Estado do Maranhão.** 2009. 341 p. Tese de Doutorado (Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação.** 1^a ed. São Paulo: Pini, 1997.