

# **INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE CARREGAMENTO E TEMPERATURA NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS RECICLADAS A FRIO COM EMULSÃO ASFÁLTICA E ESPUMA DE ASFALTO**

**Camila Christine dos Santos Antão**

**André Kazuo Kuchiishi**

**Kamilla Vasconcelos**

**Liedi Légi Bariani Bernucci**

Universidade de São Paulo

Escola Politécnica

## **RESUMO**

A reciclagem a frio de pavimentos é uma alternativa sustentável para a redução do consumo de materiais virgens e do descarte inadequado de resíduos gerados em obras de restauração. Entretanto, ainda não há um consenso sobre as propriedades mecânicas das misturas recicladas a frio, principalmente em relação ao comportamento viscoelástico. Por meio de simulações computacionais usando o *software 3D-Move*, este artigo discute a influência que a velocidade dos veículos e a temperatura de trabalho têm sobre as propriedades mecânicas de um pavimento cujas camadas de base são constituídas por misturas recicladas a frio estabilizadas com emulsão asfáltica e com espuma de asfalto. Os resultados mostram que essas misturas possuem comportamento viscoelástico, já que a frequência de carregamento e a temperatura alteram as respostas mecânicas do pavimento no que diz respeito à distribuição de tensões em diferentes profundidades e aos níveis de deformação de tração obtidos para a camada de revestimento.

## **ABSTRACT**

Cold recycling is a sustainable alternative to reduce virgin aggregate consumption and the inadequate disposal of residues produced in restoration undertakings. Meanwhile, there is no agreement under the mechanical properties of cold recycled mixtures, mainly about the viscoelastic behavior. Using computational simulation by 3D-Move software, this article discusses the influence of vehicle velocity and the temperature changing on the mechanical properties of a pavement which base layers are built with cold recycled mixtures stabilized with asphalt emulsion and foamed asphalt. The results show that cold recycled mixtures have viscoelastic behavior, since the loading frequency and the temperature change the mechanical responses of the pavement with regard to tension distribution in different depths and the level of tensile strains level obtained for the surface layer.

## **1 INTRODUÇÃO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Os empreendimentos relacionados à indústria da construção civil consomem de forma excessiva os recursos naturais disponíveis, sendo renováveis ou não. Resíduos provenientes do desperdício e de obras de demolição são igualmente responsáveis pelo impacto ambiental, podendo inclusive ameaçar a saúde pública local, já que são majoritariamente depositados de forma irregular nos ambientes urbanos em nosso país (Schneider, 2003). Sendo assim, as práticas de reuso, reaproveitamento e/ou reciclagem tornam-se importantes para todos os processos construtivos.

Em serviços de manutenção de pavimentos asfálticos, a restauração de estruturas deterioradas pode aumentar a vida útil da rodovia (Costa e Pinto, 2010). Diferentes tecnologias podem ser empregadas para reabilitar vias deterioradas, com o intuito de recuperar total ou parcialmente seu desempenho mecânico. Nos casos em que se faz necessário reconstruir a camada danificada, a reciclagem é uma alternativa viável para a destinação dos resíduos gerados.

A reciclagem do revestimento asfáltico é vantajosa por reutilizar o material da camada existente, o que reduz a geração de resíduos se comparada com a metodologia tradicional de manutenção (Costa e Pinto, 2010). O material obtido no processo de fresagem das camadas asfálticas é denominado de RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*), o qual é incorporado na

composição de novas misturas. O reaproveitamento do RAP permite minimizar o volume de material que seria descartado, além de reduzir o consumo de agregados virgens (ARRA, 2001; Asphalt Academy, 2009; Wirtgen, 2012). A diminuição da necessidade de uso de agregados virgens implica não só na manutenção dos recursos naturais, mas também na redução de custos com transporte de material (Copeland, 2011) e a emissão de gases poluentes na atmosfera (Lee *et al.*, 2012).

Os tipos de reciclagem variam de acordo com sua aplicabilidade. Dentro do processo de reciclagem a frio, no qual a mistura e compactação são realizadas à temperatura ambiente, não há a necessidade de se aquecer o material. Neste caso, a emulsão asfáltica ou a espuma de asfalto geralmente são utilizadas, devido à sua baixa viscosidade à temperatura ambiente, permitindo mistura e dispersão adequadas do ligante asfáltico pela mistura (Diefenderfer *et al.*, 2016). A mistura produzida pela estabilização do RAP com emulsão asfáltica ou espuma de asfalto é denominada *Cold Recycled Asphalt Mixture*, CRAM (Babagoli *et al.*, 2016; Lin *et al.*, 2017; Lin *et al.*, 2015). Estudos publicados no Brasil tratam sobre diferentes misturas recicladas a frio, usando, por exemplo, emulsão modificada por polímero (Silva, 2011) e espuma de asfalto (Guatimosim, 2015). Quando necessário, cimento e cal hidratada também são adicionados como fíleres ativos com objetivo de aumentar a resistência inicial da mistura e facilitar a dispersão do ligante asfáltico (Betti *et al.*, 2016).

Os teores de fíler ativo e estabilizante de asfalto (emulsão ou espuma) estão diretamente relacionados com o comportamento mecânico dos CRAMs (Bocci *et al.*, 2014; Jooste e Long, 2007). Misturas com teor de cimento acima de 2% podem alterar significativamente o comportamento do CRAM (Bocci *et al.*, 2011). Em outros estudos, foi observado que para diferentes tipos e teores de fíler ativo e estabilizantes de asfalto, o módulo de resiliência aumenta progressivamente com o aumento da tensão de confinamento, comportamento este característico de materiais granulares (Fu e Harvey, 2007; Guatimosim *et al.*, 2018). Vale acrescentar que os manuais publicados pela Asphalt Academy (2009) e pela Wirtgen (2012) consideram que as misturas recicladas a frio comportam-se como materiais granulares e devem ser tratados como tais do ponto de vista construtivo, uma vez que apresentam volume de vazios parecido em relação ao de uma camada granular compactada.

As camadas granulares apresentam comportamento mecânico indiferente à variação de temperatura de trabalho, o que se contrapõe às propriedades de materiais viscoelásticos. Neste caso, a variação de temperatura ou de frequência de carregamento são determinantes para as respostas dos materiais estudados. Godenzoni *et al.* (2016) e Dal Ben e Jenkins (2014) afirmam que além de CRAMs possuírem maior coesão que os materiais puramente granulares, a existência de uma parcela viscoelástica é evidente. Estudos mostram que os ângulos de fase dos CRAMs dependem da temperatura e da frequência de repetições de carga dos ensaios. Maiores valores de ângulo de fase foram obtidos com a redução de frequência de aplicação de carga e com o aumento de temperatura. Entretanto, o aumento da frequência de carregamento ou a diminuição de temperatura reduz a resposta viscosa do material, apresentando comportamento parecido com a de um material elástico, ou seja, com valores de ângulos de fase muito baixos ou nulos (Čížková *et al.*, 2015; Godenzoni *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2009).

Observa-se da literatura que não há um consenso relativo ao comportamento mecânico dos CRAMs. Se considerado como material granular, o trincamento por fadiga é pouco provável em termos de ruptura do material. Caso seja tratado como um material coeso, com

propriedades viscoelásticas que se assimilem às de uma mistura asfáltica usinada a quente, a deformação permanente e fadiga devem ser consideradas. Assim, dependendo do tipo de comportamento mecânico adotado para o CRAM, diferentes considerações devem ser feitas, dificultando a proposição e implementação de um método de dimensionamento mecanístico-empírico (Nivedya *et al.*, 2018).

Assim, o objetivo do presente artigo é discutir a influência da variação de frequência de carregamento e da temperatura sobre a resposta mecânica de pavimento asfáltico com camada de base constituída por material reciclado estabilizado com espuma de asfalto ou emulsão asfáltica.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Ensaios laboratoriais

Os materiais utilizados para os ensaios de laboratório foram coletados durante a construção de dois trechos experimentais, localizados na rodovia Fernão Dias (BR-381). Ambos os trechos possuem 125 mm de CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente), composto por CAP 30/45 e utilizado como camada de revestimento, diferenciando-se apenas em relação à camada de base: o primeiro trecho é composto por camada reciclada tratada com (i) emulsão asfáltica (*Asphalt Emulsion Mixture*, AEM) e o segundo tratado com (ii) espuma de asfalto (*Foamed Asphalt Mixture*, FAM). As granulometrias de ambos os materiais de base estão representadas na Figura 1 e, apesar de não respeitarem os limites estabelecidos pela Wirtgen (2012), seguem aquelas que foram aplicadas em campo.

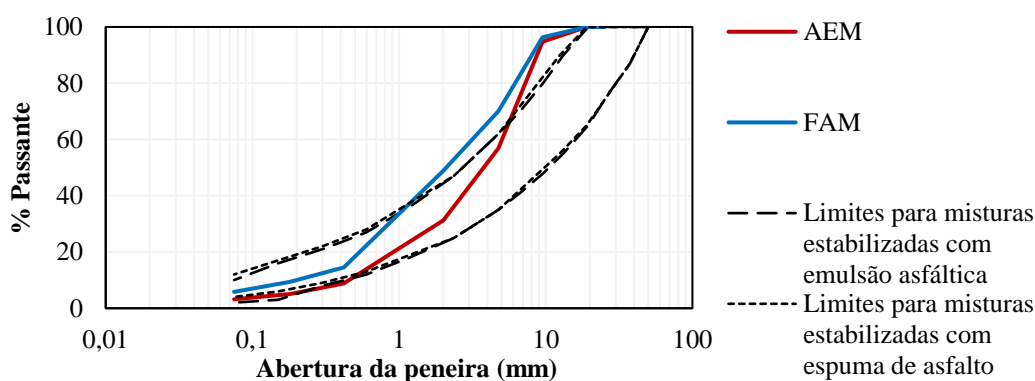


Figura 1: Curvas granulométricas para ambos os materiais de base

Para as amostras de AEM, foi utilizado 3% emulsão catiônica (em relação à massa seca de agregados) de ruptura lenta com teor residual de 62,3%. A porcentagem em massa de RAP aplicada é de 98%, tendo sido adicionados 2% de cimento tipo II 32,5R. Amostras cilíndricas de 100 mm de diâmetro e 150 mm de altura foram compactadas utilizando o compactador Proctor com energia modificada e teor de umidade de 5,5%. Para o procedimento de cura, as amostras de AEM não foram ensacadas durante os 3 primeiros dias, com o objetivo de garantir a saída da água por evaporação (Bessa *et al.*, 2016). Após este período, as amostras foram ensacadas e mantidas a 60 °C por mais 3 dias, com o objetivo de homogeneizar a umidade presente no corpo de prova.

Para as amostras de FAM, um CAP 85/100 foi selecionado. Foi aplicado o teor de 3% de asfalto para espuma e 2,6% de água para espuma. Em relação à granulometria, o teor de RAP é equivalente a 68%, somados com 2% de cimento tipo II 32,5R. Vale ressaltar que foi preciso

adicionar 30% de pó de pedra na mistura tipo FAM para fins de correção da curva granulométrica, tendo em vista que a espuma de asfalto se dispersa preferencialmente pela fração fina dos agregados (Asphalt Academy, 2009). As amostras foram compactadas da mesma forma que as amostras de AEM, porém com teor de umidade equivalente a 6,5%, e curadas a 40 °C até atingir 60% da umidade ótima de compactação (Guatimosim, 2015).

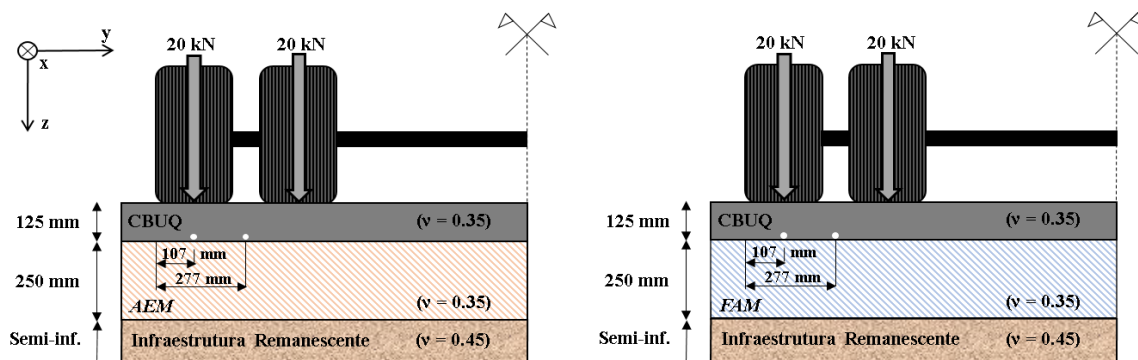
O ensaio de módulo dinâmico foi realizado para amostras de CBUQ, AEM e FAM de acordo com a norma AASHTO TP79-12. A aplicação de carga é axial com variação de frequência de carregamento (25 – 10 – 5 – 1 – 0,5 – 0,1 Hz) e de temperatura (4,4 – 21,1 – 37,8 – 54 °C). Para caracterização reológica dos ligantes asfálticos, um reômetro de cisalhamento dinâmico foi utilizado (*Dynamic Shear Rheometer*, DSR). Amostras em forma de discos com 25 mm de diâmetro e 1 mm de espessura foram moldadas, seguindo o procedimento recomendado pela ASTM D7175-15, e ensaiadas com temperatura variando de 40 a 76 °C. As frequências de cisalhamento variaram de 0,1 a 100 rad/s com taxa de deformação igual a 0,01%, o que garante que a amostra esteja dentro da zona viscoelástica linear durante todo o ensaio. Vale pontuar que a caracterização viscoelástica do ligante do AEM foi feita utilizando apenas o resíduo da emulsão.

## 2.2 3D-Move Analysis

A análise da influência da velocidade de carregamento na resposta mecânica do pavimento foi realizada com o *software 3D-MOVE Analysis*, desenvolvido pela Universidade de Nevada. O *3D-Move* se baseia na teoria das camadas finitas para determinar a resposta mecânica do pavimento a cargas dinâmicas com diferentes velocidades, temperaturas e áreas de contato entre pneu-pavimento (Siddhartham *et al.*, 1998). O *software* vem sendo utilizado para validar tensões e deformações do campo com aqueles obtidos a partir da modelagem computacional (Abdo e Jung, 2016; Siddhartham *et al.*, 2005; Ulloa *et al.*, 2013).

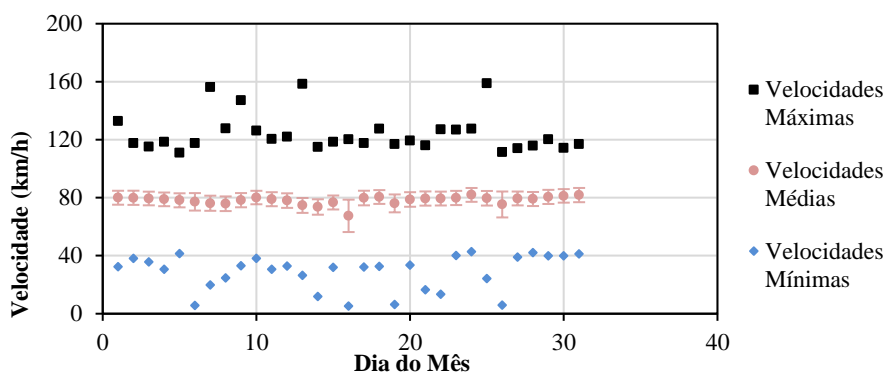
A estrutura do pavimento inserida no *software* corresponde àquela existente em campo e é composta por 3 camadas distintas: concreto betuminoso usinado a quente como revestimento asfáltico (CBUQ), com 125 mm de espessura; camada de base com 250 mm de espessura (AEM ou FAM) e, por fim, a infraestrutura remanescente, camada considerada como semi-infinita. O carregamento adotado para a simulação foi o aplicado por um eixo simples de rodas duplas (ESRD) com 340 mm de espaçamento entre pneus, com 20 kN/pneu e distribuição de pressão de 560 kPa. Essa configuração gera por hipótese uma área circular de aplicação de carga de cada pneu, com raio equivalente a 107 mm.

A influência da velocidade foi avaliada do ponto de vista mecanístico em relação a duas coordenadas distintas. A primeira pertence ao eixo vertical que passa pelo eixo de simetria de carga do pneu externo, e a outra pertence ao eixo situado entre os pneus, sendo que ambos se localizam a uma profundidade de 124 mm, ou seja, no fundo da camada de revestimento. As deformações de tração foram avaliadas em ambas as coordenadas, tendo em vista que a maior parte dos modelos de fadiga de pavimentos flexíveis utiliza a deformação de tração dos revestimentos asfálticos como dado de entrada. A Figura 2 ilustra a estrutura do pavimento, os respectivos materiais e as espessuras. Os coeficientes de Poisson adotados para as camadas de base foram baseados em dados da literatura (GODENZONI *et al.* 2017). Os pontos de análise e sentido dos eixos coordenados também estão apresentados. A direção que indica o sentido de tráfego dos veículos é denominada “x” e corresponde à direção longitudinal.



**Figura 2:** Representação da estrutura do pavimento e dos pontos de análise

A variação da velocidade de carregamento foi baseada em dados de velocidade coletados pelo sistema de pesagem em movimento (*Weigh in Motion*, WIM), instalado no km 948 da Rodovia Fernão Dias, ou seja, muito próximo ao trecho experimental que está sendo estudado e é escopo deste trabalho. Os dados correspondem ao mês de dezembro de 2016 e estão apresentados na Figura 3. Três velocidades foram escolhidas: 30km/h, 80km/h e 120km/h, representando respectivamente os valores de velocidades mínima, média e máxima mais representativas do mês observado. Vale salientar que apesar de ser 80 km/h a velocidade regulamentar na Rodovia neste trecho para veículos comerciais, os registros mostram a velocidade de 120 km/h como a máxima registrada no trecho para esses veículos.



**Figura 3:** Velocidade dos veículos comerciais coletada pelo sistema WIM

A influência do comportamento viscoelástico da camada de base foi discutida a partir do estudo de dois cenários. Primeiramente, partiu-se do pressuposto que esta camada tem comportamento puramente elástico linear, ou seja, assume valor de módulo constante. Em seguida, considerou-se que a camada é viscoelástica e, portanto, depende da frequência de carregamento e da temperatura a qual está submetida. Para as simulações que consideraram o comportamento do material de base como viscoelástico, foram adotadas duas combinações de temperatura: (i) 55 °C para o revestimento e 45 °C para a base (representada pelo código 55/45) e (ii) 30 °C para o revestimento e 20 °C para a base (30/20). Ambas as combinações são baseadas em levantamentos de temperatura de campo obtidos a partir de sensores termorresistores instalados no pavimento em diferentes profundidades. A Figura 4 apresenta um resumo com a sequência de análise para todos os diferentes cenários.

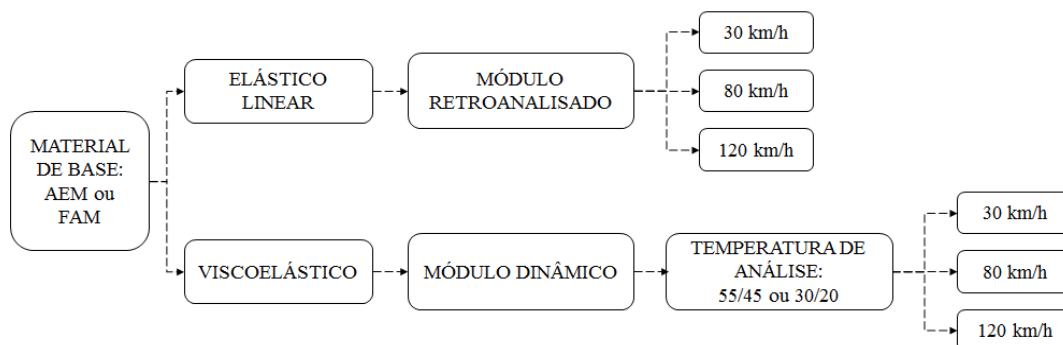


Figura 4: Sequência de análise utilizando o software 3D-MOVE Analysis

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Propriedades viscoelásticas das misturas e ligantes asfálticos

As curvas mestras das misturas ( $T_{ref} = 21,1 \text{ °C}$ ) e dos ligantes ( $T_{ref} = 40 \text{ °C}$ ) estão apresentados respectivamente na Figura 5(a) e na Figura 5(b).

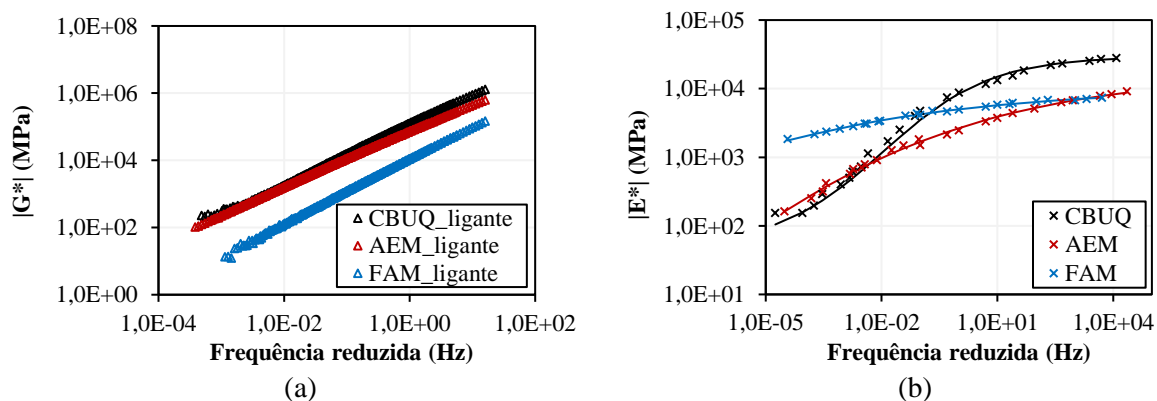


Figura 5: Curvas mestras de módulo dinâmico para (a) ligantes asfálticos e (b) misturas asfálticas

Da Figura 5(a), observa-se que o ligante residual da emulsão e o ligante do CBUQ não apresentam diferenças significativas em relação ao  $|G^*|$ . Essa diferença é mais evidente em relação ao ligante utilizado na espuma, classificado como um ligante de elevada penetração (CAP 85/100). A partir da Figura 5(b), é possível observar que o CBUQ tem comportamento viscoelástico, como esperado, porém que o AEM e o FAM também apresentam comportamento viscoelástico, embora diferentes do CBUQ e diferentes também entre si. Há maior variação de  $|E^*|$  com a frequência pelo CBUQ do que pelas misturas estabilizadas asfálticas, evidenciada pela curva mestra. Outros estudos também obtiveram resultados similares para esses materiais (Ebels, 2008; Leandri *et al.*, 2014). Da Figura 5(b) ainda é possível notar que para altas frequências reduzidas (ou baixas temperaturas) o AEM e FAM apresentam rigidez muito parecidas. Para baixas frequências reduzidas (ou elevadas temperaturas), no entanto, o FAM apresenta rigidez superior, demonstrando menor variação do módulo dinâmico com a variação de frequência (ou de temperatura), resultado bastante positivo quanto ao comportamento mecânico da camada com este material. Uma das razões para tal evidência é que para temperaturas mais altas, a viscosidade do ligante asfáltico diminui e a rigidez do material passa a ser comandada pela granulometria. O FAM apresenta granulometria mais fina, logo o intertravamento nessa mistura é maior em comparação ao AEM, e assim, menos dependente do comportamento do ligante asfáltico.

### 3.2 Ponto de análise

A escolha do ponto de análise foi feita a partir da verificação das deformações longitudinais máximas em dois pontos distintos, um sob o pneu e outro entre pneus, no centro de carga do semi-eixo, como já mencionado anteriormente. Neste caso, a velocidade dos veículos foi fixada em 80km/h e o comportamento mecânico dos materiais de base considerado como sendo viscoelástico. Variando as condições de temperatura, os materiais e o ponto de análise, os valores de deformação foram calculados e estão apresentados na Tabela 1. Os valores positivos de deformação longitudinal presentes na tabela correspondem a respostas obtidas a partir de esforços de tração, e os negativos, de compressão.

**Tabela 1:** Comparação entre deformações sofridas no fundo do revestimento asfáltico pelos pontos escolhidos

Temperatura (°C)		Sob o pneu ( $\mu\epsilon$ )		Entre pneus ( $\mu\epsilon$ )	
CBUQ	Base	AEM	FAM	AEM	FAM
55	45	31,597	-14,219	5,7083	-25,757
30	20	10,623	5,793	6,468	1,917

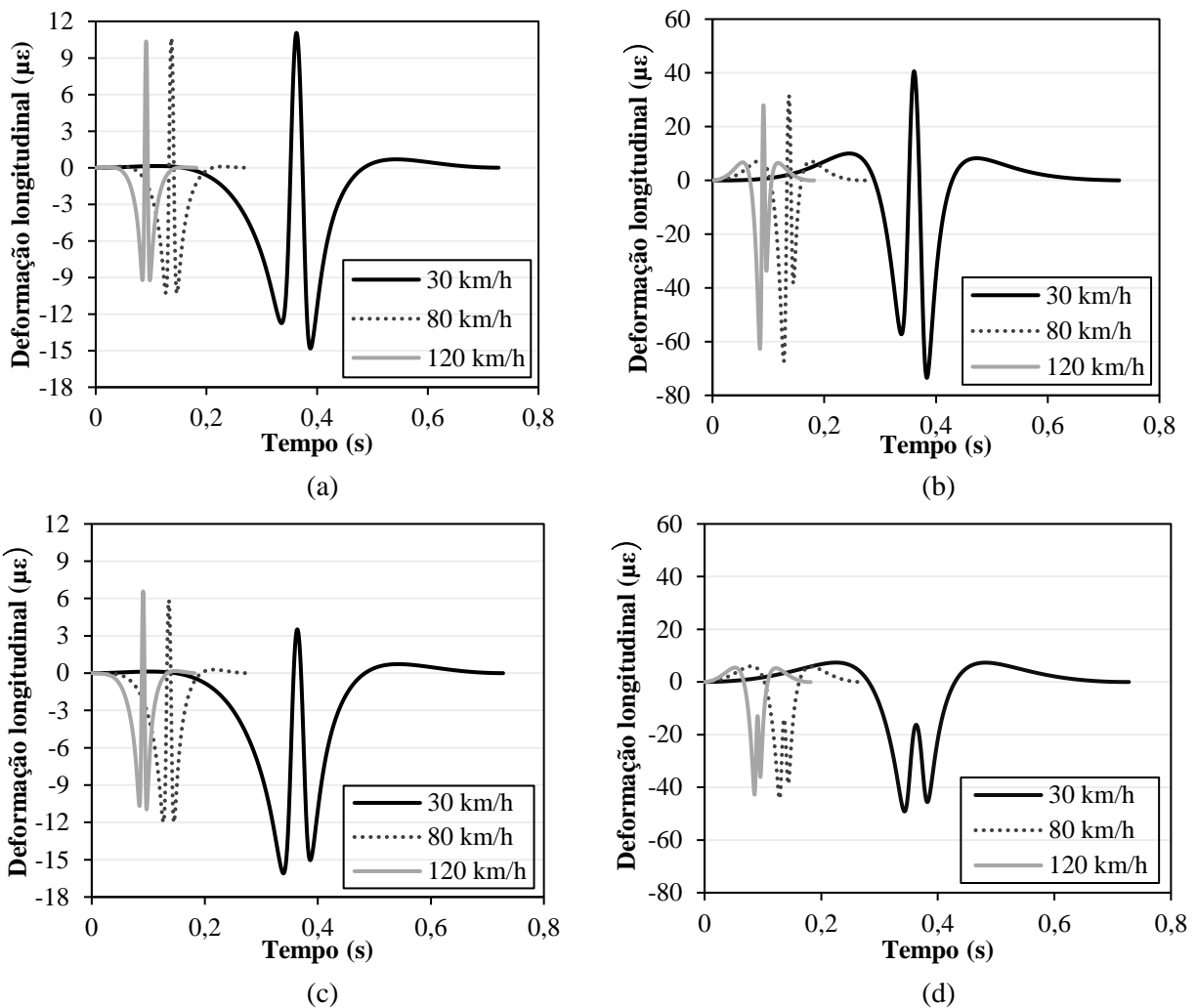
A partir da Tabela 1, pode-se concluir que o ponto sob o pneu apresenta maior deformação em todos os casos, exceto para a mistura estabilizada com espuma inserida num ambiente com temperaturas mais altas. Neste caso, é possível afirmar que toda a camada de revestimento asfáltico está sob compressão. Tendo em vista que a camada de FAM é significativamente menos sensível à variação de temperatura que o CBUQ, o aumento de temperatura pode ter ocasionado uma inversão na rigidez dessas camadas, fazendo com que o FAM se torne mais rígido que o CBUQ para a combinação de temperaturas mais altas, de 55/45. Com a camada de base mais rígida, a linha neutra será transladada para baixo, comprimindo a camada de revestimento. Essa discussão será retomada mais adiante.

Com o objetivo de se avaliar o comportamento desses materiais em seu pior estado de sollicitação, foi fixada a coordenada sob o pneu para as análises que se seguem.

### 3.3 Influência da Velocidade

A influência que a velocidade de passagem dos veículos tem sobre o comportamento da camada de base foi estudada a partir da resposta dada pelas deformações longitudinais no fundo da camada de revestimento asfáltico. As velocidades usadas nas simulações foram iguais a 30 km/h, 80 km/h e 120 km/h, como mostrado na Figura 3. Estão representados na Figura 6 os resultados obtidos para a camada de AEM e FAM com comportamento viscoelástico, considerando ambas as combinações de temperatura (30/20 e 55/45).

A defasagem entre os gráficos pode ser explicada pela diferença entre os intervalos de tempo considerados, que são inversamente proporcionais às velocidades. Para cada uma das curvas obtidas, cinco situações distintas podem ser observadas. Inicialmente, a ausência de sollicitação não provoca nenhuma deformação. Assim que a carga começa a se aproximar do ponto de análise, deformações devido a esforços de compressão surgem no fundo do revestimento. Conforme o carregamento alcança a coordenada longitudinal deste ponto, há uma redução progressiva dos esforços de compressão, dando lugar às deformações de tração, que são maximizadas no momento em que o pneu e o ponto de análise estão alinhados verticalmente. Em seguida, observa-se que o ponto volta a sofrer deformações de compressão, que são aliviadas com a cessão do carregamento, levando o ponto a alcançar seu estado de tensões inicial.



**Figura 6:** Deformações longitudinais para estrutura de pavimento com AEM à temperatura de 30/20 (a) e 55/45 (b), e com FAM à temperatura de 30/20 (c) e 55/45 (d)

Pelo princípio de superposição tempo-temperatura, a redução da velocidade proposta na simulação equivale ao aumento de temperatura da camada estudada, o que provoca efeitos diferentes em cada um dos materiais. Para o AEM, maiores deformações de tração são obtidas com a diminuição da velocidade para as duas temperaturas simuladas, evidenciando que a resposta mecânica do material é mais sensível à alteração da frequência de carregamento.

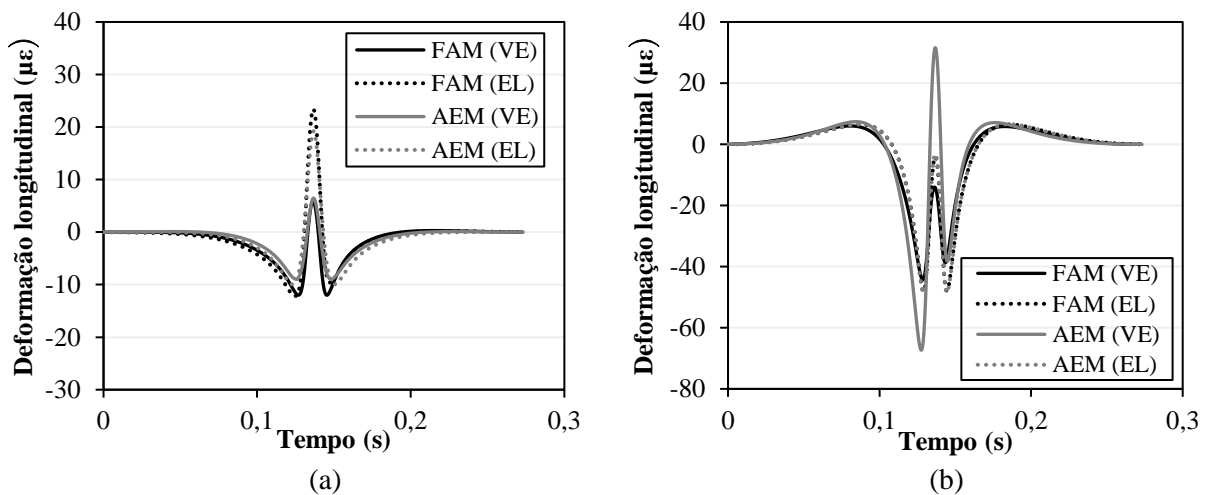
Para o FAM, a menor velocidade de tráfego causa um aumento dos valores de deformação de compressão, entretanto, o mesmo não acontece para os picos de tração na condição de temperatura 30/20. Pode-se inferir que a redução de velocidade equivale ao aumento de temperatura grande o suficiente para provocar quedas mais acentuadas nos valores de módulo da camada de revestimento do que na camada de base. Isto ocorre, pois a camada de FAM é significativamente menos dependente das variações de temperatura ou de frequência que a camada de revestimento, como evidenciado pelas curvas mestras apresentadas na Figura 5(b). Assim, considerando que a camada de FAM se torne progressivamente mais rígida que a de revestimento para menores velocidades dos veículos comerciais, a posição da linha neutra pode se alterar e transladar para maiores profundidades. A Figura 6(d) apresenta os valores de deformação obtidos para a mesma estrutura de pavimento na temperatura de 55/45. Neste



caso é possível observar que a elevação de temperatura pode acarretar em um aumento ainda maior da diferença de rigidez entre as camadas de FAM e de revestimento asfáltico, fazendo com que a última esteja sempre sob compressão para todas as velocidades simuladas. Neste cenário, a linha neutra pode não estar mais na camada de revestimento e sim na camada de base, fazendo com que esta trabalhe não à compressão, mas à flexão. Isto coloca em discussão o pressuposto inicial de vários pesquisadores que aproximam o comportamento desta camada de FAM como de material granular.

### 3.4 Influência do Comportamento Mecânico

A comparação das respostas obtidas para cada um dos materiais foi feita para ambas as condições de temperatura com velocidade de tráfego de 80 km/h. Encontram-se representadas na Figura 7 as deformações longitudinais no mesmo ponto de análise para as estruturas de FAM e AEM, considerando o comportamento elástico (EL) e viscoelástico (VE) para cada uma das combinações. O módulo retroanalísado e o módulo dinâmico foram utilizados como dados de entrada no 3D-Move para a análise elástica e viscoelástica, respectivamente.



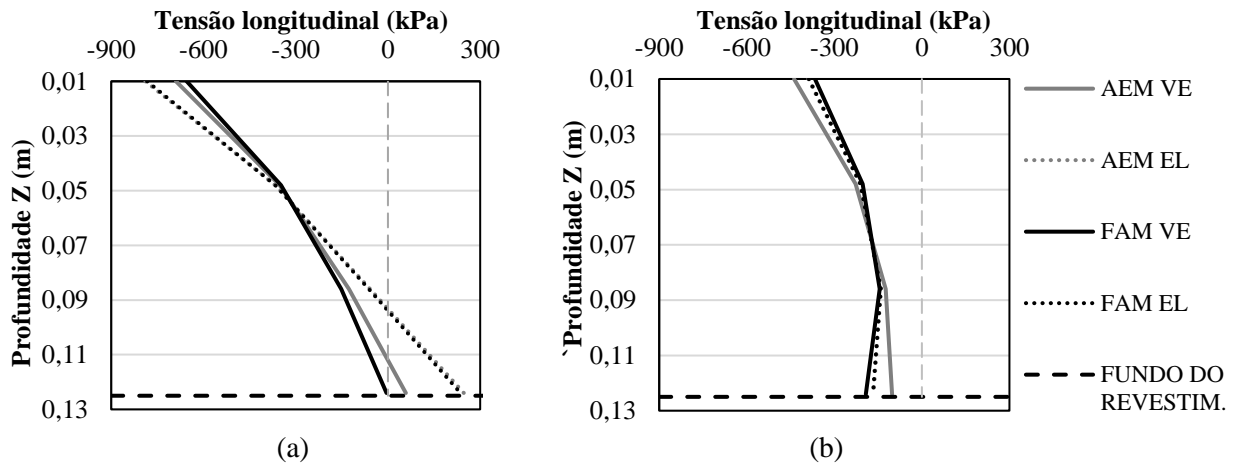
**Figura 7:** Deformações longitudinais no fundo da camada de revestimento a partir da análise elástica e viscoelástica à temperatura de 30/20 (a) e de 55/45 (b)

Os resultados mostram que considerar o comportamento mecânico da camada de base construída com esses materiais como sendo elástico subestima sua capacidade de resistir aos esforços do tráfego. As deformações observadas neste caso para a combinação de temperatura 30/20 são significativamente maiores do que aquelas obtidas no caso viscoelástico, correspondendo a um aumento de aproximadamente 200%. Sendo assim, supor que o comportamento da camada de base é puramente elástico levará ao superdimensionamento do pavimento, o que resulta em desperdício de material e maiores custos construtivos.

Dentro da análise viscoelástica, é possível perceber diferenças entre as deformações sofridas pelos dois materiais. Apesar de tanto o AEM quanto o FAM sofrerem deformações de tração equivalentes, a região comprimida apresenta valores diferentes. Essa divergência também pode estar associada à diferença de rigidez entre as camadas de base, principalmente nas temperaturas mais elevadas (55/45). Nessa condição, o FAM pode estar mais rígido em comparação com o AEM, tendo em vista que o primeiro é menos suscetível à variação de temperatura. Dessa forma, grande parte da tensão gerada pela aplicação de carga é dissipada pela camada de FAM. Para a estrutura com AEM, cuja rigidez é inferior, essa tensão é

dissipada principalmente pela camada de revestimento, tendo a camada de base menor contribuição. Assim, tanto as deformações de tração e quanto a de compressão são maiores para o pavimento com AEM do que com FAM.

A fim de melhor compreender a distribuição de tensões para cada condição simulada, a Figura 8(a) e a Figura 8(b) apresentam as tensões longitudinais para diferentes profundidades na camada de revestimento. Os valores negativos correspondem às tensões de compressão e os positivos à tração. A profundidade na qual cada curva cruza o eixo vertical de tensão nula corresponde à posição da linha neutra, indicada pela reta vertical tracejada.



**Figura 8:** Distribuição de tensões na camada de revestimento com temperatura 30/20 (a) e 55/45 (b)

Da Figura 8(a) é possível observar que, considerando as camadas de base como materiais viscoelásticos, a tensão no fundo do revestimento é significativamente inferior em comparação com a análise elástica. Em outras palavras, ao se utilizar as propriedades viscoelásticas do AEM e do FAM como dados de entrada no *3D-Move*, a linha neutra translada para baixo, aliviando as tensões de tração no fundo do revestimento. Vale ainda acrescentar que no caso elástico, os valores de tensão para o FAM e para o AEM se sobrepõem, o que é condizente, tendo em vista que os valores de módulo retroanalísado pelas bacias de deflexão obtidas por meio de FWD são bastante próximos para ambos os materiais.

Da Figura 8(b), por outro lado, observa-se que no segmento com FAM, todo o revestimento está comprimido, indicando que a linha neutra se encontra na camada de base. Essa distribuição de tensões também ocorre no segmento com AEM, porém, esse comportamento contradiz os resultados obtidos de deformações de tração no fundo do revestimento apresentadas pela Figura 6(b). Uma possível explicação é a de que a caracterização reológica do ligante residual da emulsão como dado de entrada para o *3D-Move* pode não ser a mais adequada. Análises futuras no mesmo *software* devem ser realizadas utilizando os parâmetros reológicos da emulsão em si para comprovar o comportamento contraditório mencionado.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos mostram que existe uma diferença significativa entre considerar o comportamento mecânico da base construída com AEM ou com FAM como sendo viscoelástico, ou puramente elástico. Para a menor combinação de temperatura adotada

(30/20), as deformações longitudinais sofridas pela camada considerada como elástica subestimam a capacidade de resistir ao carregamento a ela imposto.

Dentro do estudo da viscoelasticidade do material, a alteração da frequência da carga aplicada gerou respostas diferentes para cada um dos materiais. A camada construída com AEM sofre maiores deformações de tração para menores velocidades, em ambas as temperaturas. Em oposição, na camada de FAM os picos de tração decrescem com a redução de velocidade para a temperatura de 30/20. Dentro da simulação com temperatura equivalente a 55/45, observam-se apenas tensões de compressão, o que pode ser explicado pelo aumento da diferença de rigidez entre a camada de base e a de revestimento em temperaturas mais elevadas. Para uma mesma velocidade, as deformações longitudinais sofridas por ambos os materiais na temperatura 30/20 são próximas, entretanto, ao se aumentar a temperatura, as deformações sofridas pelo AEM são superiores, resultado este condizente com a menor susceptibilidade do FAM à variação de temperatura e de frequência de carregamento.

Por fim, ao se considerar o comportamento viscoelástico dos materiais estudados, a camada de revestimento fica sujeita a menores tensões de tração, o que é equivalente a dizer que a linha neutra de tensões é transladada para baixo. Assim, a não consideração da presença de comportamento viscoelástico dos materiais estudados pode resultar no superdimensionamento do projeto do pavimento.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdo, A. M. A., e Jung, S. J. (2016) Effects of Asphalt Mix Design Properties on Pavement Performance: A Mechanistic Approach. *Advances in Civil Engineering*, v. 2016, 7 p. doi:10.1155/2016/9354058.
- ARRA - Asphalt Recycling And Reclaiming Association (2001) Basic Asphalt Recycling Manual. Glen Ellyn, 277p.
- Asphalt Academy (2009) Bitumen Stabilised Materials: A *Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials*. Pretoria, 148 p.
- Babagoli, R., Ameli, A., e Shahriari, H. (2016) Laboratory evaluation of rutting performance of cold recycling asphalt mixtures containing SBS modified asphalt emulsion. *Petroleum Science and Technology*, v. 34, n.4, p. 309–313. doi:10.1080/10916466.2015.1135168.
- Bessa, I. S., Almeida, L. R., Vasconcelos, K. L., e Bernucci, L. L. B. (2016) Design of cold recycled mixes with asphalt emulsion and portland cement. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 43, n. 9, p. 773–782. doi:10.1139/cjce-2016-0111.
- Betti, G., Airey, G., Jenkins, K., Marradi, A., e Tebaldi, G. (2016) Active fillers' effect on in situ performances of foam bitumen recycled mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, v. 18, n. 2, p. 281–296. doi:10.1080/14680629.2016.1213486.
- Bocci, M., Grilli, A., Cardone, F., e Ferrotti, G. (2014) Full-depth reclamation for the rehabilitation of local roads: A case study. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 15, n. 3, p. 191–201. doi:10.1080/10298436.2012.657196.
- Bocci, M., Grilli, A., Cardone, F., & Graziani, A. (2011). A study on the mechanical behaviour of cement-bitumen treated materials. *International Journal of Construction and Building Materials*, v. 25, p. 773–778.
- Čížková, Z., Suda, J., Valentin, J., e Krpálek, O. (2015) Complex Modulus and Stiffness Modulus of Cold Recycled Mixes. *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*, v. 4, n. 2, p. 40–53.
- Copeland (2011) Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: *State of the Practice*. Virginia, 60 p.
- Costa, C., e Pinto, S. (2010) O uso de reciclagem de pavimentos como alternativa para o desenvolvimento sustentável em obras rodoviárias no Brasil. *Traço*, v. 12, n. 26, p. 39–58.
- Dal Ben, M. e Jenkins, K. J. (2014) Performance of Cold Recycled Materials With Foamed Bitumen and Increasing Percentage of Reclaimed Asphalt Pavement. *Road Materials and Pavement Design*, v. 15, n. 2, p. 348-371. doi:10.1080/14680629.2013.872051.
- Diefenderfer, B. K., Bowers, B. F., Schwartz, C. W., Farzaneh, A., e Zhang, Z. (2016) Dynamic Modulus of Recycled Pavement Mixtures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2575, p. 19–26. doi:10.3141/2575-03.

- Ebels, L. J. (2008) *Characterisation of Material Properties And Behaviour of Cold Bituminous Mixtures for Road Pavements*. Dissertação de Doutorado - Stellenbosch University, África do Sul, 440 p.
- Fu, P., e Harvey, J. T. (2007) Temperature sensitivity of foamed asphalt mix stiffness: Field and lab study. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 8, n. 2, p. 137–145. doi:10.1080/10298430601149486.
- Godenzoni, C., Graziani, A., Bocci, E. e Bocci, M. (2017) The evaluation of the Mechanical Behavior of Cold Recycled Mixtures Stabilised With Cement and Bitumen: Field and Laboratory Study. *Road Materials and Pavement Design*. doi: 10.1080/14680629.2017.1279073.
- Godenzoni, C., Graziani, A., e Perraton, D. (2016) Complex modulus characterisation of cold-recycled mixtures with foamed bitumen and different contents of reclaimed asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, v. 18, n. 1, p. 130–150. doi:10.1080/14680629.2016.1142467.
- Guatimosim, F. V., Vasconcelos, K. L., Bernucci, L. L. B., e Jenkins, K. J. (2018) Laboratory and field evaluation of cold recycling mixture with foamed asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, v. 19, n. 2, p. 385–399. doi:10.1080/14680629.2016.1261726.
- Guatimosim, F. V. (2015) *Mechanical Behaviour and Structural Performance of Recycled Foamed Bitumen Stabilized Materials*. Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo, São Paulo, 124 p.
- Jooste, F., e Long, F. (2007) *A Knowledge Based Structural Design Method for Pavements Incorporating Bituminous Stabilized Materials*. Technical Memorandum CSIR/BE/IE/ER, 82 p.
- Kim, Y., Lee, H. “David”, e Heitzman, M. (2009) Dynamic Modulus and Repeated Load Tests of Cold In-Place Recycling Mixtures Using Foamed Asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 21, n. 6, p. 279–285. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:6(279).
- Leandri, P., Losa, M., Natale, A. D. (2014) Field Validation of Recycled Cold Mixes Viscoelastic Properties. *Construction and Building Materials*, v. 75, p. 275-282. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.11.028.
- Lee, N., Chou, C.-P., e Chen, K.-Y. (2012) Benefits in Energy Savings and CO<sub>2</sub> Reduction by Using Reclaimed Asphalt Pavement. *TRB 2012 Annual Meeting*, p. 1–18.
- Lin, J., Hong, J., e Xiao, Y. (2017) Dynamic characteristics of 100% cold recycled asphalt mixture using asphalt emulsion and cement. *Journal of Cleaner Production*, v. 156, April, p. 337–344. doi:10.1016/j.jclepro.2017.04.065.
- Lin, J., Wei, T., Hong, J., Zhao, Y., e Liu, J. (2015) Research on development mechanism of early-stage strength for cold recycled asphalt mixture using emulsion asphalt. *Construction and Building Materials*, v. 99, p. 137–142. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.09.019.
- Nivedya, M. K., Veeraragavan, A., Ravindran, P., e Krishnan, J. M. (2018) Investigation on the influence of air voids and active filler on the mechanical response of bitumen stabilized material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 30, n. 3, p. 1–13. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001967.
- Schneider, D. (2003) *Gestão pública de resíduos da construção civil no município de São Paulo Deposições Irregulares de Resíduos da Construção Civil na Cidade de São Paulo*. Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo, São Paulo, 130 p.
- Siddharthan, R. V., Sebaaly, P. E., El-Desouky, M., Strand, D., e Huft, D (2005) Heavy off-road vehicle tire-pavement interactions and response. *Journal of Transportation Engineering*, v. 131, n. 3, p. 239–247. doi: 10.1061/(ASCE)0733-947(2005)131:3(239).
- Siddharthan, B. R. V., Yao, J., Member, S., e Sebaaly, P. E. (1998) Pavement Strain From Moving Dynamic 3D Load Distribution. *Journal of Transportation Engineering*, v. 124, n. 6, p. 557–566.
- Silva, A. H. M. (2011) *Avaliação do Comportamento de Pavimentos com Camada Reciclada de Revestimentos Asfálticos a Frio com Emulsão Modificada por Polímero*. Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo, São Paulo, 164 p.
- Ulloa, A., Hajj, E. Y., Siddharthan, R. V., e Sebaaly, P. E. (2013) Equivalent Loading Frequencies for Dynamic Analysis of Asphalt Pavements. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 25, n. 9, p. 1162–1170. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000662.
- Wirtgen. Cold Recycling: *Wirtgen Cold Recycling Technology*. Windhagen, 2012. 370p.

---

Camila Christine dos Santos Antão (camila.antao@usp.br)

André Kazuo Kuchiishi (kazuo.andre@gmail.com)

Kamilla Vasconcelos (kamilla.vasconcelos@gmail.com)

Liedi Légi Bariani Bernucci (liedi@usp.br)

Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo  
Av. Professor Almeida Prado, Travessa 2, No. 83 – São Paulo, SP, Brasil