

# 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<sup>1</sup>, André Kazuo Kuchiishi<sup>2</sup>, Kamilla Vasconcelos<sup>3</sup>,  
Liedi Légi Bariani Bernucci<sup>4</sup>

<sup>3</sup>Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, camila.anta@usp.br

<sup>3</sup>Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, kazuo.andre@gmail.com

<sup>3</sup>Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, kamilla.vasconcelos@gmail.com

<sup>3</sup>Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, liedi@usp.br

## Recebido:

22 de abril de 2019

## Aceito para publicação:

28 de outubro de 2019

## Publicado:

12 de novembro de 2019

## Editor de área:

Jorge Barbosa Soares

## Palavras-chaves:

Misturas recicladas a frio,  
Emulsão asfáltica,  
Espuma de asfalto,  
Viscoelasticidade,  
3D-Move Analysis.

## Keywords:

Cold recycled asphalt mixtures,  
Asphalt emulsion,  
Foamed asphalt,  
Viscoelasticity,  
3D-Move Analysis.

DOI:10.14295/transportes.v27i3.2026

## 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 Analysis*, avaliou-se 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 (AEM) ou com espuma de asfalto (FAM). Com o objetivo de estudar como variam as deformações longitudinais para um ponto localizado no fundo do revestimento asfáltico, observou-se que os materiais reciclados a frio apresentam comportamento viscoelástico, pois diferentes combinações de velocidade e de temperatura resultam em diferentes distribuições de tensão e deformação na camada de revestimento. Dessa forma, observou-se que a não consideração da presença de viscoelasticidade linear para estes materiais pode vir a subestimar a capacidade de suporte da estrutura.

## ABSTRACT

Cold recycling is a sustainable alternative to reduce virgin aggregate consumption and the inadequate disposal of residues produced in restoration undertakings. However, there is no agreement under the mechanical properties of cold recycled mixtures, mainly about the viscoelastic behavior. Using computational simulation by means of the 3D-Move software, this article discusses the influence of vehicle speed and the temperature variation on the mechanical properties of a pavement with cold recycled asphalt mixtures stabilized with asphalt emulsion (AEM) or foamed asphalt (FAM) as base layer materials. With the purpose of evaluating the longitudinal strains at the bottom of the asphalt concrete layer, it was observed that the cold recycled asphalt mixtures exhibit a viscoelastic behavior, since different combinations of vehicle speed and temperature result in different stresses and strains distributions in the wearing course layer. Besides, it was shown that when the viscoelastic properties of these materials are neglected the bearing capacity of the pavement structure is underestimated.



## 1. INTRODUÇÃO

Os empreendimentos relacionados à indústria da construção civil consomem de forma excess-

siva os recursos naturais disponíveis, sejam 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. No processo de reciclagem a frio, a mistura e a compactação são realizadas à temperatura ambiente, não havendo a necessidade de aquecer o material. Nesse 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) conforme apresentado por Babagoli *et al.* (2016), Lin *et al.* (2017) e 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). De acordo com Bessa *et al.* (2016) e Kuchiishi *et al.* (2017), CRAMs com 1% de cimento apresentaram comportamento similar ao de misturas cimentadas, com módulo constante para diferentes estados de tensões. Já outros estudos observaram 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 se comportam como materiais granulares e devem ser tratados como tais do ponto de vista construtivo, uma vez que possuem volume de vazios semelhante ao de uma camada granular compactada.

Porém, materiais granulares apresentam comportamento mecânico indiferente à variação de temperatura, o que se contrapõe às propriedades de materiais viscoelásticos. Quando consideradas as propriedades viscoelásticas dos CRAMs, a variação de temperatura ou de frequência de carregamento são determinantes para as respostas dos materiais. 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 perceptível. 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 (Kim *et al.*, 2009; Čížková *et al.*, 2015; Godenzoni *et al.*, 2016;).

Leandri *et al.* (2015) realizaram ensaios de módulo dinâmico em CRAMs estabilizados com emulsão asfáltica e espuma de asfalto. Os resultados foram, então, utilizados como dados de entrada para análise de tensões e deformações da estrutura de um pavimento simulado com o *software* ViscoRoute 2.0. Além de apresentarem comportamento viscoelástico, foi observado que quando as propriedades viscoelásticas dos CRAMs eram consideradas, os valores calculados de tensão e deformação se aproximavam mais daqueles medidos em campo, especialmente para a estrutura com base estabilizada com emulsão asfáltica. Ebels (2008) também realizou ensaios de módulo dinâmico com amostras de CRAMs e observou que apesar de serem menos susceptíveis à variação de temperatura do que uma mistura asfáltica usinada a quente, o comportamento viscoelástico dessas misturas é evidente.

Observa-se 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. Ensaio 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 CA (Concreto Asfáltico), 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. Esta escolha pode vir a gerar impactos nos resultados obtidos, entretanto, este trabalho tem por interesse estudar o desempenho das misturas recicladas a frio presentes nos trechos experimentais existentes. Dessa forma, optou-se por respeitar a granulometria de campo, mesmo essa não atendendo às exigências da norma vigente.

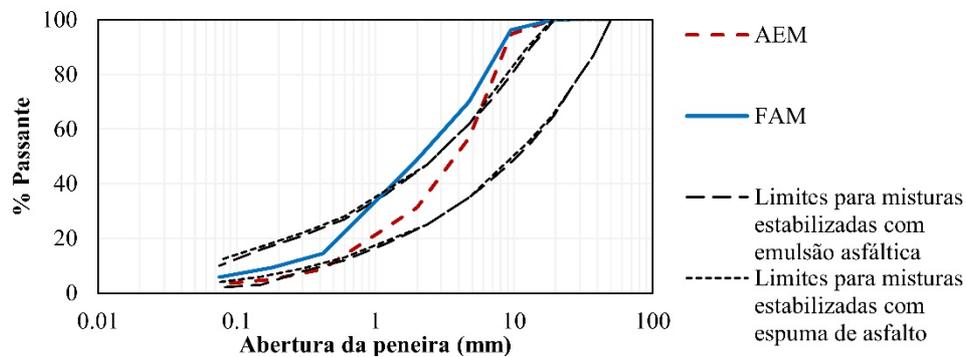


Figura 1. Curvas granulométricas para ambos os materiais de base

Para as amostras de AEM, foram elaboradas duas réplicas com 3% de emulsão catiônica (em relação à massa seca de agregados) de ruptura lenta com teor residual de 62,3%, o que resulta em um teor efetivo de ligante asfáltico de 1,9%. A porcentagem em massa de RAP aplicada foi 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%, sendo que este valor contabiliza tanto a água adicionada na mistura quanto a água presente na emulsão asfáltica. 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 fim 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 durante 3 dias até atingir 60% da umidade ótima de compactação (Guatimosim, 2015). Vale ressaltar que foram usadas duas réplicas, assim como feito para as amostras de AEM.

O ensaio de módulo dinâmico foi realizado para amostras de CA, AEM e FAM de acordo com a norma AASHTO T 342-11. 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 asfáltico como revestimento (CA), 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, como indicado a seguir.

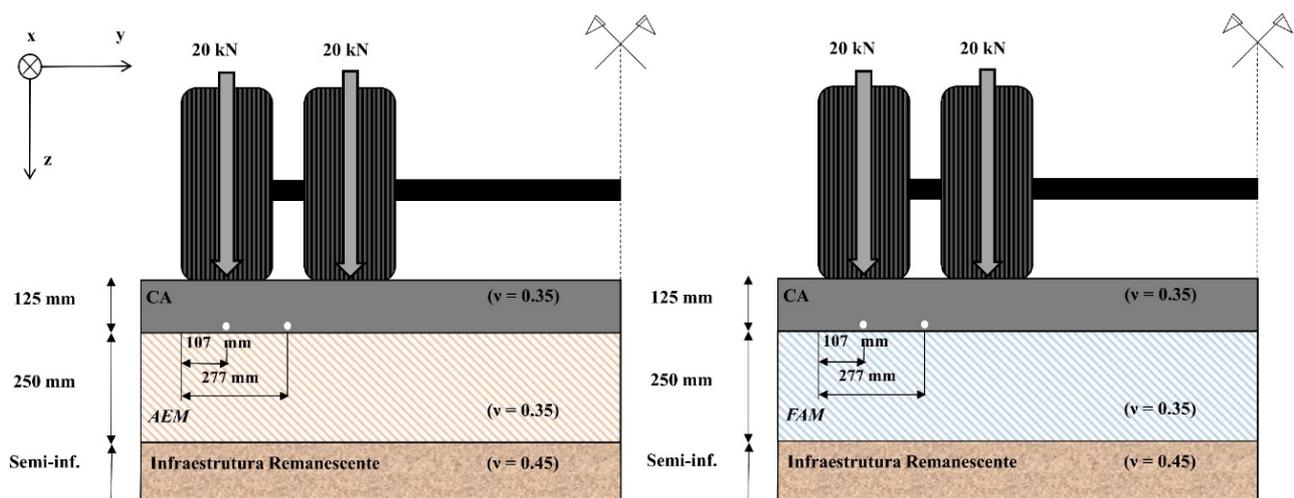


Figura 2. Representação da estrutura do pavimento e dos pontos de análise

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: 30 km/h, 80 km/h e 120 km/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.

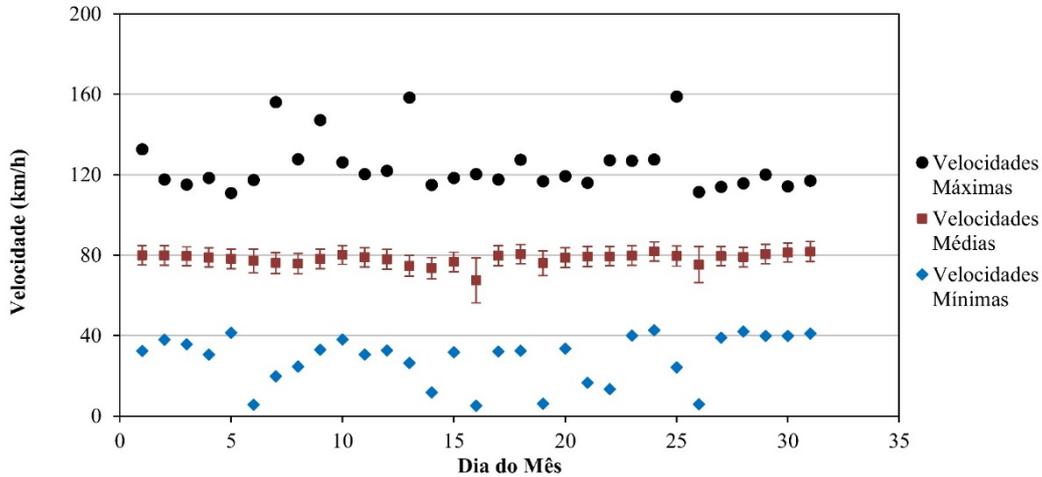


Figura 3. Velocidade dos veículos comerciais coletada pelo sistema WIM

O comportamento mecânico da camada de base foi discutido 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 linear e, portanto, depende da frequência de carregamento e da temperatura à qual está submetida.

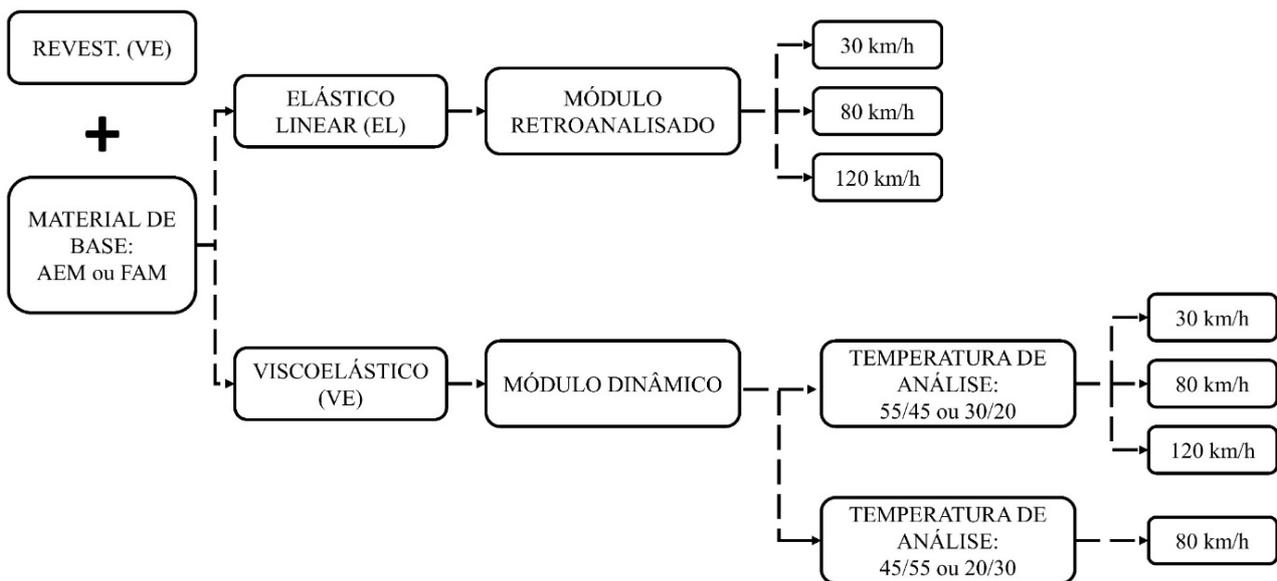


Figura 4. Sequência de análise utilizando o software 3D-MOVE Analysis

Para as simulações que consideraram o comportamento do material de base como viscoelástico, foram adotadas quatro combinações de temperatura: (i) 30 °C para o revestimento e 20 °C para a base (denominada 30/20); (ii) 55 °C para o revestimento e 45 °C para a base (55/45); (iii) 20 °C para o revestimento e 30 °C para a base (20/30) e (iv) 45 °C para o revestimento e 55 °C para a base (45/55). Todas 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 os cenários propostos e a descrição de cada condição de análise está apresentada separadamente no item 3.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1. Propriedades viscoelásticas dos ligantes e das misturas asfálticas

As curvas mestras obtidas para os ligantes ( $T_{ref} = 40\text{ °C}$ ) estão apresentadas na Figura 5. Observa-se que o ligante residual da emulsão e o ligante do CA 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 (85/100).

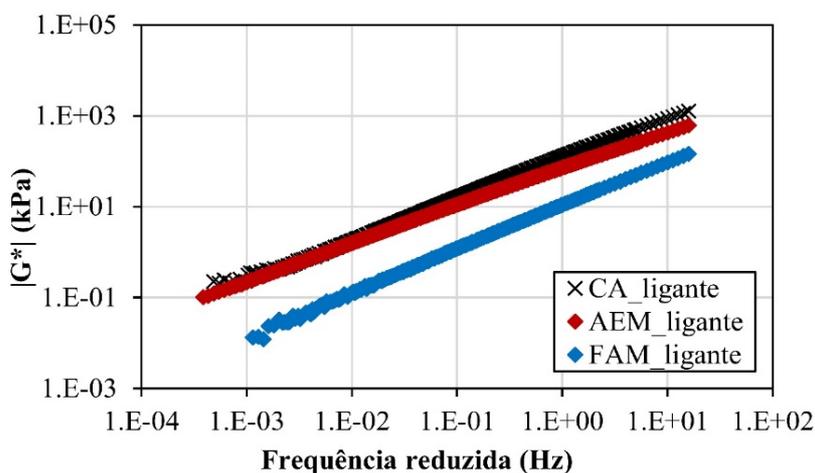


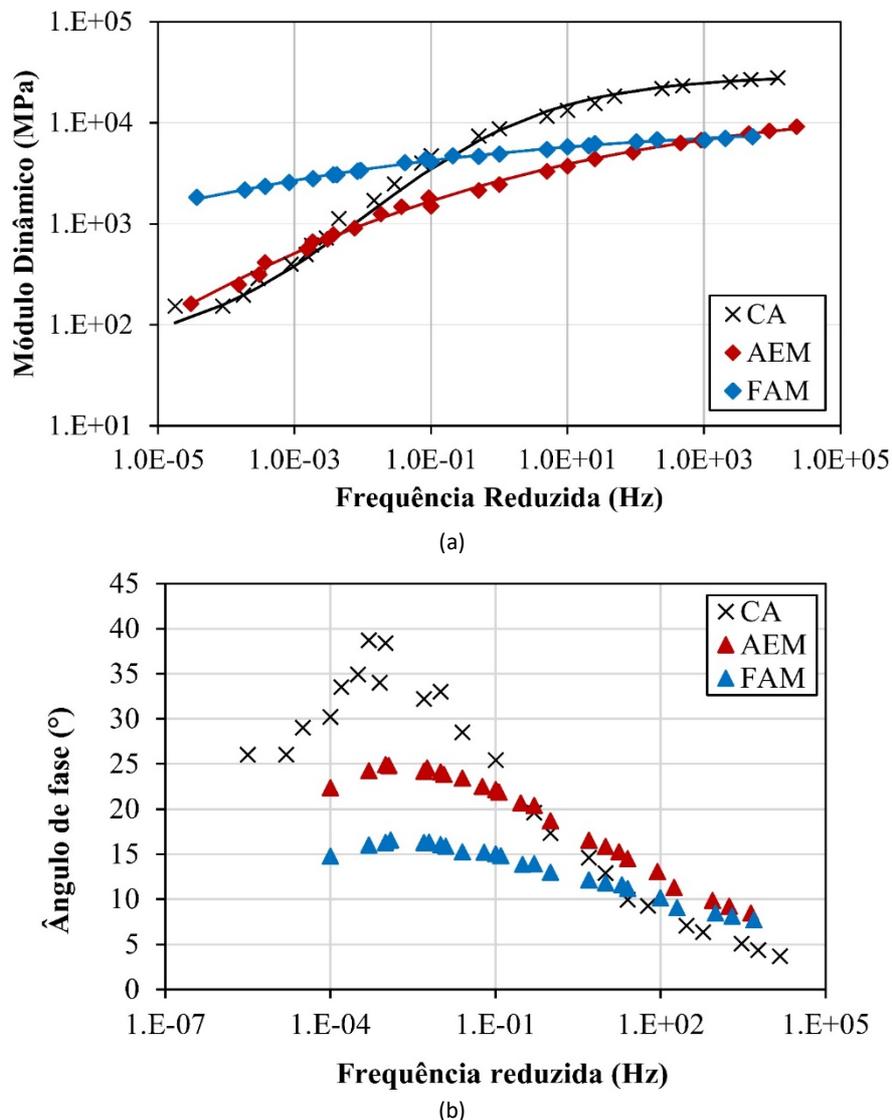
Figura 5. Curvas mestras de módulo de cisalhamento dinâmico para temperatura de referência de 40 °C

Para ajuste dos resultados de módulo dinâmico das amostras de CA, AEM e FAM, o modelo sigmoidal proposto por Pellinen *et al.* (2004) foi utilizado, sendo o módulo dinâmico ( $|E^*|$ ) descrito como função da frequência reduzida ( $f_r$ ) e dos parâmetros  $\delta$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  (Equação 1). A Figura 6(a) apresenta as curvas mestras do módulo dinâmico enquanto que a Figura 6(b) mostra os ângulos de fase tanto para o CA, quanto para os materiais de base (AEM e FAM).

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta - \gamma \times \log(f_r)}} \quad (1)$$

A partir da Figura 6(a), é possível observar que o CA tem comportamento viscoelástico, como esperado. Porém, a variação do módulo dinâmico em função da frequência reduzida é maior para a mistura de CA do que para as misturas recicladas estabilizadas com ligante asfáltico. Esta diferença em relação às propriedades viscoelásticas também pode ser observada pelas curvas mestras de ângulo de fase (Figura 6 (b)). Apesar de apresentarem dependência da variação de temperatura e frequência de carregamento, as misturas AEM e FAM possuem menores valores de ângulo de fase, indicando menor susceptibilidade térmica em comparação ao CA. Isto pode

ser justificado pelo maior teor de ligante asfáltico do CA em relação ao teor da emulsão asfáltica e da espuma de asfalto. Apesar da presença do ligante do RAP nas misturas AEM e FAM contribuir para um maior teor total de ligante asfáltico, o processo de envelhecimento do mesmo pode conferir menor sensibilidade da mistura à variação de temperatura em comparação ao CA, o qual possui apenas ligante virgem em sua composição. Outros estudos também obtiveram resultados similares para materiais estabilizados com emulsão asfáltica ou espuma de asfalto (Ebels, 2008; Leandri *et al.*, 2015).



**Figura 6.** Curvas mestras do módulo dinâmico (a) e ângulo de fase (b) para CA, AEM e FAM à temperatura de referência de 21,1 °C

Da Figura 6(a), ainda é possível notar que para altas frequências reduzidas (ou baixas temperaturas) o AEM e FAM apresentam rigidez parecidas. No entanto, para baixas frequências reduzidas (ou elevadas temperaturas), o FAM apresenta rigidez superior, demonstrando menor variação do módulo dinâmico com a variação de frequência (ou de temperatura). 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 (Pellinen *et al.*, 2004). O FAM apresenta granulometria mais fina, logo o intertravamento nessa mistura é maior em

comparação ao AEM, resultando em maior rigidez a frequências baixas (temperaturas altas). Existem ainda outros fatores que podem ser discutidos com o intuito de explicar a maior susceptibilidade do AEM à variação de temperatura. O primeiro deles é o fato de que o teor de RAP presente nesta mistura é mais elevado se comparado ao FAM, logo, espera-se que exista uma maior proporção de ligante sendo mobilizado. Neste caso, para temperaturas mais elevadas, a maior quantidade de RAP presente no AEM pode resultar em uma maior diminuição de rigidez devido à maior presença de ligante em comparação com a FAM. O segundo fator que merece ser mencionado é a diferença de mecanismos de dispersão do ligante asfáltico nas misturas. A espuma de asfalto se dispersa preferencialmente através das partículas finas presentes, formando gotículas de ligante asfáltico (denominadas “pontos de solda”, do inglês *spot welds*) que se distribuem de maneira descontínua na mistura, enquanto a emulsão asfáltica recobre os agregados maiores, formando uma fina película que os envolve. Dessa forma, a distribuição mais uniforme de ligante asfáltico que é observada no AEM pode tornar a mistura mais susceptível a mudanças na frequência de carregamento e/ou de temperatura. Por fim, pode-se supor que a metodologia de cura aplicada para cada mistura poderia justificar a diferença de comportamento mecânico entre FAM e AEM. Entretanto, Kuchiishi *et al.* (2019) e Leandri *et al.* (2015) observaram a mesma diferença de sensibilidade à variação de frequência entre duas misturas recicladas a frio com teores de ligante e cimento semelhantes, mesmo que as temperaturas e os tempos aplicados no procedimento de cura não tenham sido os mesmos. Nos estudos mencionados, foi observado que as misturas estabilizadas com emulsão asfáltica apresentaram maior variação de rigidez para diferentes condições de temperatura e frequência de carregamento em comparação às misturas estabilizadas com espuma de asfalto.

Com o intuito de melhor entender o comportamento mecânico das misturas asfálticas recicladas à frio, devem ainda ser estudados outros fatores como o volume de vazios das misturas, os teores dos ligantes virgens aplicados bem como seus respectivos índices de penetração, que podem vir a ser relevantes para as análises propostas.

### 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. Nesse caso, a velocidade dos veículos foi fixada em 80 km/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 (µε)		Entre pneus (µε)	
CA	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. Nesse 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 CA, o aumento de temperatura pode ter ocasionado uma inversão na rigidez dessas camadas, fazendo com que o FAM se torne mais rígido que o CA 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 solicitação, foi fixada a coordenada sob o pneu para as análises que se seguem.

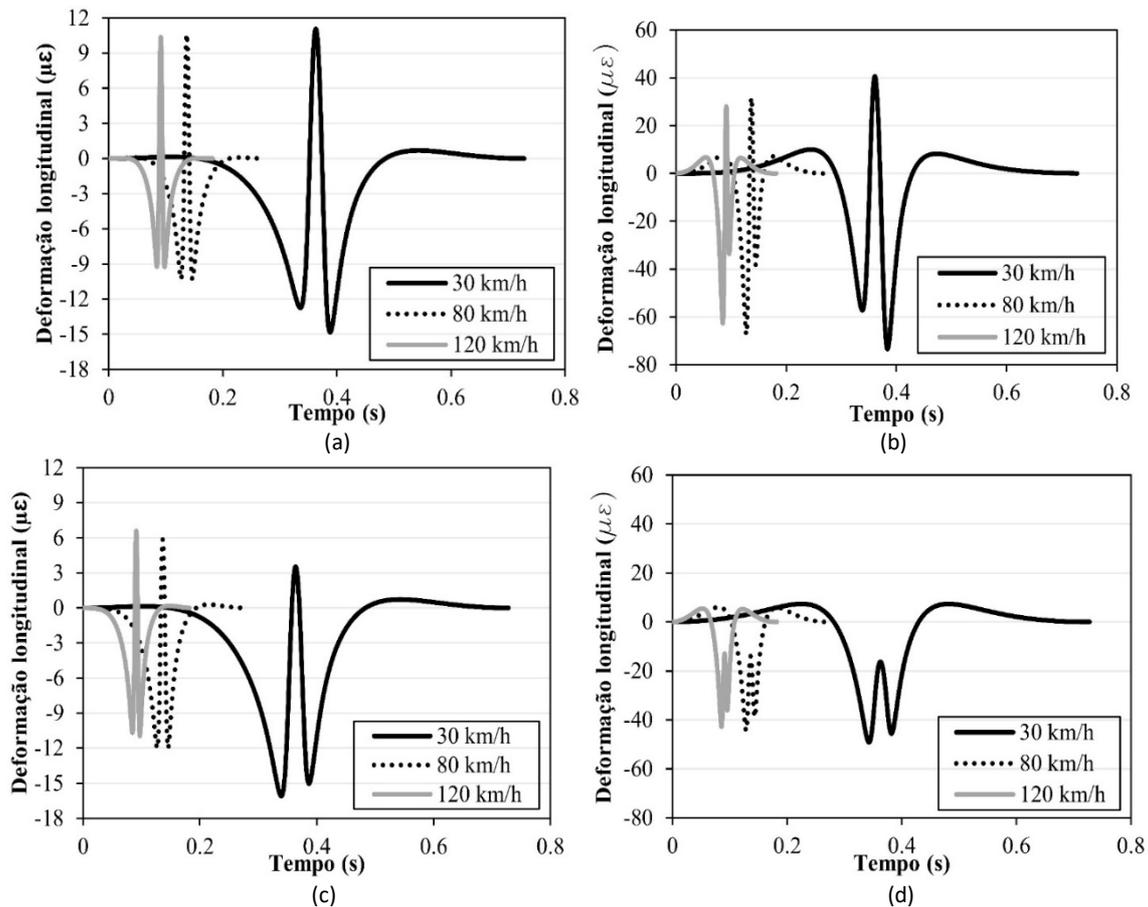
### 3.3. Influência da Velocidade

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 7 os resultados obtidos para as estruturas com AEM e FAM com comportamento viscoelástico, considerando duas 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 solicitação 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.

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 que a camada de revestimento, como evidenciado pelas curvas mestras apresentadas Figura 6(a). 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.



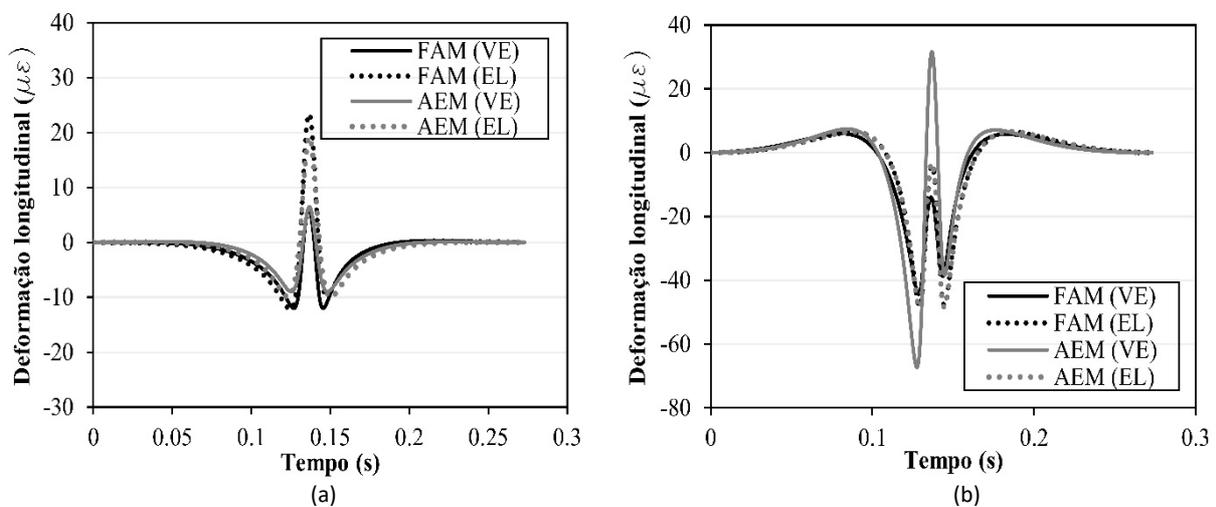
**Figura 7.** Deformações longitudinais para estrutura de pavimento com AEM à temperatura de 30/20 (a) e 55/45 (b), e com FAM à temperatura de 30/20 (c) e 55/45 (d)

A Figura 7(d) apresenta os valores de deformação obtidos para a estrutura de pavimento com FAM na temperatura de 55/45. Neste caso, é possível observar que a elevação de temperatura pode acarretar 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 esteja submetida a esforços de flexão. Isto coloca em discussão o pressuposto inicial de vários pesquisadores que consideram o comportamento do FAM similar ao de um material granular, no qual não há coesão suficiente para resistir à flexão.

### 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 8 as deformações longitudinais no mesmo ponto de análise para as estruturas de FAM e AEM, considerando o comportamento elástico (EL) ou viscoelástico (VE) da camada de base para cada uma das combinações. O módulo retroanalizado e o módulo dinâmico foram utilizados como dados de entrada no *3D-Move* para a análise elástica linear e viscoelástica linear, respectivamente.

Para a combinação de temperatura mais amena (30/20), os resultados mostram que considerar o comportamento mecânico da camada de base como sendo elástico subestima sua capacidade de resistir aos esforços do tráfego. As deformações observadas 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. Entretanto, para o cenário de temperaturas mais elevadas (55/45), este raciocínio repete-se apenas para a estrutura cuja camada de base é constituída por FAM, sendo que o pico de deformações de tração visualizado para o AEM é superior ao encontrado para a análise elástica. Assim, para essas condições, uma estrutura de pavimento dimensionada partindo-se da hipótese de que o AEM possui comportamento elástico linear estaria a favor da segurança.



**Figura 8.** 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)

Dentro da análise viscoelástica, é possível perceber diferenças entre a magnitude das deformações sofridas para cada material. A Figura 8(a) mostra que 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 quanto as 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 9(a) e a Figura 9(b) apresentam as tensões longitudinais para diferentes profundidades na camada de revestimento para as temperaturas 30/20 e 55/45, respectivamente. 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.

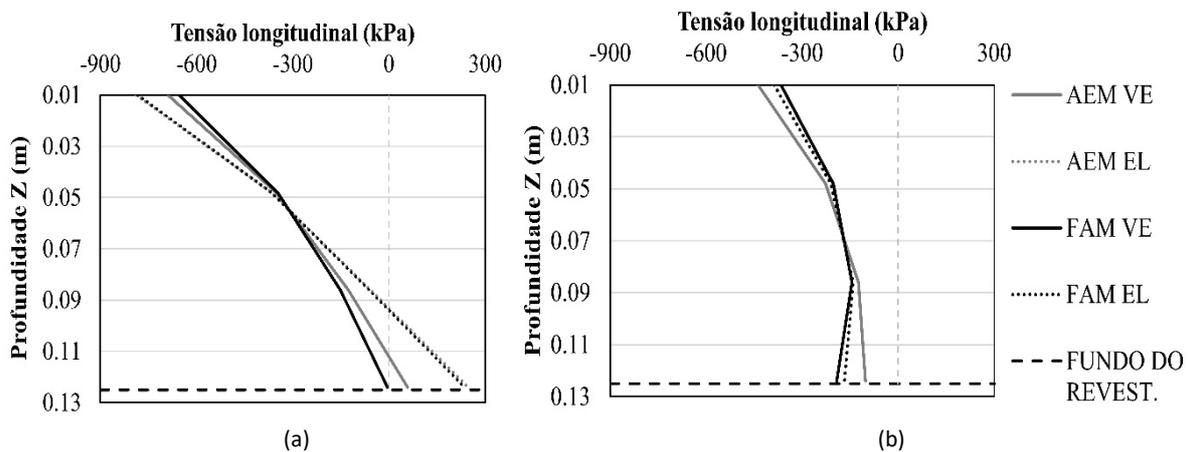


Figura 9. Distribuição de tensões na camada de revestimento com temperatura 30/20 (a) e 55/45 (b)

Na Figura 9(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 retroanalisado são bastante próximos para ambos os materiais de base.

Em contrapartida, na Figura 9(b) observa-se que no segmento com FAM, todo o revestimento está comprimido, indicando que a linha neutra se encontra na camada de base. Esta mesma tendência de distribuição de tensões é observada no segmento com AEM, porém, esse comportamento contradiz os resultados obtidos de deformações de tração no fundo do revestimento apresentadas pela Figura 8(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 adicionais devem ser realizadas utilizando os parâmetros reológicos da emulsão em si.

Nota-se ainda que, para ambas as análises, a camada de revestimento está submetida a apenas esforços de compressão, o que indica que há a possibilidade de que a linha neutra de tensões esteja localizada em profundidades maiores. Este resultado evidencia a necessidade de se estudar novas metodologias de dimensionamento de estruturas de pavimento que contenham misturas recicladas a frio, uma vez que para diferentes combinações de frequência de carregamento e de temperaturas, são encontrados resultados não triviais.

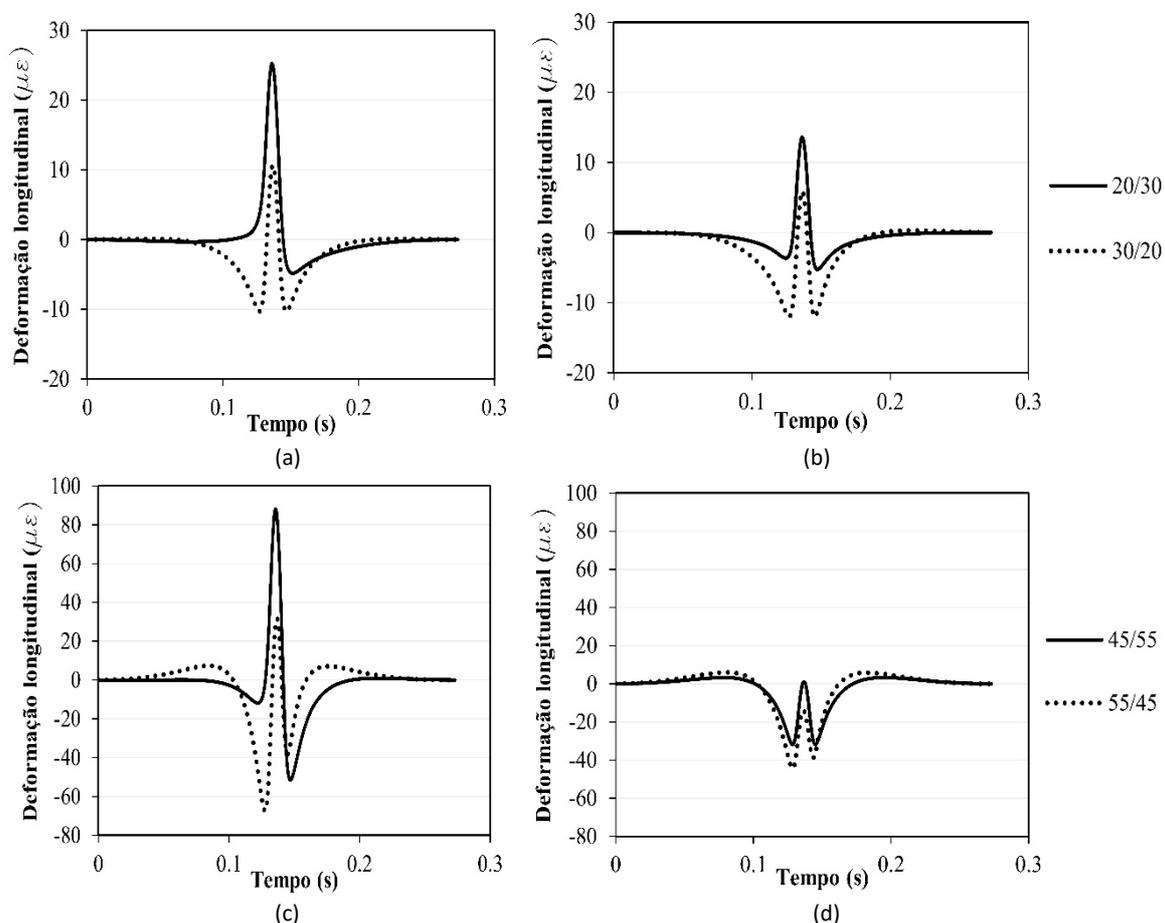
### 3.5. Influência da Inversão de Temperaturas

Foram estudadas as diferenças de magnitude das deformações longitudinais no ponto de interesse, simulando os períodos de dia e noite, nos quais há inversão de temperatura como explicitado no item 2.2. Essa inversão é decorrente da menor susceptibilidade à variação de temperatura da camada de base em relação à camada de revestimento, processo este já reportado na literatura (Asaeda e Ca, 2000; Ariawan *et al.*, 2015; Yinfei *et al.*, 2015).

Para a análise, fixou-se o comportamento mecânico viscoelástico (revestimento e base) e velocidade de 80 km/h. Foram simuladas as quatro combinações de temperaturas anteriormente

sugeridas (30/20, 20/30, 55/45 e 45/55) e obtidos os resultados para a base com AEM (Figura 10(a) e Figura 10(c)) e com FAM (Figura 10(b) e Figura 10(d)).

Na Figura 10(a) observa-se que a presença de uma temperatura mais elevada na camada de AEM (20/30) leva o pico de deformação de tração a atingir o dobro do valor em relação ao observado na combinação 30/20. Apesar das deformações observadas para a estrutura com AEM serem superiores às da estrutura com FAM, uma tendência semelhante de aumento de deformações é mostrada na Figura 10(b). Nesse caso, para a estrutura com FAM, a deformação máxima obtida também apresenta um aumento de 100% em relação à anterior. É válido pontuar que as deformações de tração para a estrutura com AEM são maiores que aquelas obtidas para a base com FAM, em virtude da maior susceptibilidade à variação de temperaturas do primeiro em relação ao segundo. Dessa forma, a capacidade estrutural do AEM em termos de rigidez é inferior à do FAM quando a camada de base se encontra a 30 °C, aumentando as a deformação de tração nas fibras inferiores do revestimento asfáltico.



**Figura 10.** Deformações longitudinais no fundo da camada de revestimento considerando inversão de temperaturas à temperatura de 20/30 para AEM (a) e FAM (b) e à 45/55 para AEM (c) e FAM (d)

O mesmo aumento nos valores de deformação pode ser notado na combinação de 45/55 para a base com AEM, na qual a deformação é quase três vezes superior à deformação obtida na combinação de 55/45. Para a estrutura com FAM, nota-se ainda uma diferença mais expressiva. Nesta combinação, a fibra inferior do revestimento apresenta deformações de compressão (representadas pelos valores negativos no gráfico), o que indica que a camada de revestimento não

sofre flexão, como discutido na análise de distribuição de tensões do item 3.4. Contudo, no período da noite, no qual a temperatura da camada de base é superior à do revestimento asfáltico, as deformações longitudinais deixam de ser negativas e assumem valores relativamente pequenos de tração. Consequentemente, serão alteradas a maneira com a qual a estrutura do pavimento se comportará e seus possíveis mecanismos de ruptura.

Dessa forma, observa-se que, para ambos os materiais, as deformações longitudinais no fundo do revestimento foram superiores para o período da noite em relação aos resultados obtidos para o período do dia. A partir de um banco de dados de dois anos obtidos por meio do sistema WIM no trecho experimental, Bosso (2018) constatou que no período da noite (entre 22h e 6h) há uma maior concentração de veículos que trafegam acima da carga máxima legal permitida. Assim, mesmo que o volume de tráfego neste período seja reduzido, a concentração de carga por eixo acima do limite legal pode intensificar os danos causados à estrutura, como por exemplo, o surgimento de trincas por fadiga. Portanto, considerar o comportamento viscoelástico nas misturas recicladas a frio é fundamental para o melhor dimensionamento da estrutura do pavimento que contenham esse tipo de material.

#### 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 existentes na 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 apresenta maiores deformações de tração para menores velocidades, em ambas as temperaturas. Por outro lado, na camada de FAM os picos de tração decrescem com a redução de velocidade para a temperatura de 30/20. No que diz respeito à 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 na temperatura 30/20 são próximas para ambas as estruturas, entretanto, ao se aumentar a temperatura, as deformações na fibra inferior do revestimento para a estrutura com AEM são superiores, resultado este condizente com a maior susceptibilidade do AEM à variação de temperatura e de frequência de carregamento em relação ao FAM.

A análise de inversão de temperatura entre a camada de revestimento asfáltico e a camada de base demonstrou que há diferenças significativas de comportamento. Para o período da noite, representado pelas temperaturas 20/30 e 45/55, observou-se um aumento das deformações longitudinais no fundo do revestimento, principalmente para a mistura AEM, cuja rigidez é mais susceptível à variação de temperatura e frequência. Este efeito, somado à presença de veículos acima da carga máxima legal, pode promover a aceleração da deterioração do pavimento. Novamente, o comportamento viscoelástico das misturas recicladas a frio mostrou-se relevante para a análise estrutural.

Dessa forma, ao se considerar o comportamento viscoelástico dos materiais estudados, a camada de revestimento fica sujeita a menores deformações de tração, o que é equivalente a dizer

que a linha neutra de tensões é transladada para baixo. Assim, a não consideração do comportamento viscoelástico dos materiais estudados pode resultar no superdimensionamento da estrutura do pavimento, implicando em maiores custos construtivos.

## REFERÊNCIAS

- 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.
- Ariawan, I.; Subagio, B. e Setiadji, B. (2015). Development of asphalt pavement temperature model for tropical climate conditions in West Bali region. *Procedia Engineering*, v. 125, p. 474-480. doi: 10.1016/j.proeng.2015.11.126.
- ARRA - Asphalt Recycling and Reclaiming Association (2001) Basic Asphalt Recycling Manual. Glen Ellyn, 277p.
- Asaeda, T. e Ca, V. (2000) Characteristics of permeable pavement during hot summer weather and impact on the thermal environment. *Building and Environment*, v. 35, p. 363-375. doi: 10.1016/S0360-1323(99)00020-7.
- 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.
- Bosso, M. (2018). *Uso da tecnologia Weigh-in-Motion para a caracterização do tráfego rodoviário e do excesso de carga em veículos comerciais*. 2018. Tese de Mestrado - Universidade de São Paulo, São Paulo.
- 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. doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.119.
- 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).
- Kuchiishi, A.; Vasconcelos, K.; Bernucci, L. (2019) Effect of mixture composition on the mechanical behaviour of cold recycled asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, doi:10.1080/10298436.2019.1655564

- Kuchiishi, A.; Andrade, L.; Bessa, I.; Esteves, S. e Vasconcelos, K. (2017) Influência da granulometria nas propriedades mecânicas de misturas recicladas a frio estabilizadas com emulsão asfáltica e cimento Portland. *Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto*, 12 p.
- Leandri, P.; Losa, M. e Natale, A. D. (2015) 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.
- Pellinen, T.; Witzczak, M. e Bonaquist, R. (2004) Asphalt mix master curve construction using sigmoidal fitting function with non-linear least squares optimization. *Proceedings of Pavement Mechanics, Symposium at 15th ASCE Engineering Mechanics Conference (EM2000)*, New York: Columbia University, 2004.
- 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.
- Yinfei, D.; Shengyue, W. e Jian, Z. (2015) Cooling asphalt pavement by a highly oriented heat conduction structure. *Energy and Buildings*, v. 102, p. 187-196. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.020>