VANDERLEI DIAS DA SILVA

Avaliação da deformação permanente de misturas estabilizadas com asfalto

São Paulo
2019

VANDERLEI DIAS DA SILVA

Avaliação da deformação permanente de misturas estabilizadas com asfalto

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências

São Paulo
2019

VANDERLEI DIAS DA SILVA

Avaliação da deformação permanente de misturas estabilizadas com asfalto

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de concentração:
Engenharia de Transportes

Orientador:
Profª. Dra. Kamilla Vasconcelos Savasini

São Paulo
2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor:_____

Assinatura do orientador: _____

Catalogação-na-publicação

Silva, Vanderlei Dias da
Avaliação da deformação permanente de misturas estabilizadas com asfalto / V. D. Silva -- versão corr. -- São Paulo, 2019.
80 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Reciclagem a frio 2.Deformação permanente 3.Mistura asfáltica reciclada a frio 4.Pavimentação I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

Aos meus amados pais, Vanildo e Tereza.

À mulher da minha vida, Renata

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, irmãos e familiares, por todo incentivo, apoio e carinho em todos os momentos vividos.

À Renata pelo amor, amizade, cuidado e companheirismo nos momentos bons e ruins, e pelo apoio incondicional. É um privilégio poder viver a vida ao seu lado.

À professora Kamilla Vasconcelos pela orientação, dedicação, amizade, apoio e incentivo no desenvolvimento e concretização deste trabalho. Muito obrigado!

À professora Liedi Bernucci pela confiança, excelentes aulas, por todo conhecimento transmitido e por sua preciosa contribuição na avaliação da dissertação no exame de qualificação.

Ao Edson de Moura, pela amizade, convívio, bom humor, parceria, conselhos, engenho e por todo conhecimento compartilhado ao longo dos anos.

À professora Laura Motta por sua excelente contribuição na avaliação da dissertação no exame de qualificação.

Ao Robson Costa, pela amizade, conselhos, bom convívio no ambiente de trabalho, auxílio nas etapas de desenvolvimento deste trabalho e toda sua prestatividade.

Ao Kazuo, pela parceria e disponibilidade para realização das etapas deste trabalho, pela amizade, bom humor e conhecimentos compartilhados.

Aos amigos e colegas do LTP pelo convívio, amizade e apoio, em especial ao José João, Erasmo, Higor, Diomária, Marcia, Matheus e Rosângela.

Ao Igor e Kendi pela amizade, convívio, conversas e parceria ao longo deste caminho.

Ao Rodrigo Leandro, pela amizade, confiança, incentivo, pareceria e por todo conhecimento compartilhado.

Ao Caio Raul, pela amizade, convívio, conversas, prestatividade e parceria.

Aos professores, alunos e funcionários do Departamento de Transportes da POLI-USP pela colaboração e convívio.

Ao Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo por propiciar o estudo de um trecho experimental e a realização de todos os ensaios deste trabalho.

Ao Fred e toda equipe da Copavel, por todo auxílio no processo de produção da mistura estabilizada com asfalto espumado e na compactação dos corpos de prova de todas as outras três misturas estudadas.

Ao Grupo Arteris pela parceria desde a fase de construção do trecho experimental e pelo auxílio em todos os levantamentos de campo, em especial ao Guilherme e toda equipe do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Arteris em Vargem.

À Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) pelos investimentos em pesquisa, por meio de Recursos de Desenvolvimento Tecnológico.

“O investimento em conhecimento é aquele que traz maiores retornos.”

Benjamin Franklin

RESUMO

A utilização de materiais reciclados na pavimentação é uma técnica que possibilita tanto benefícios econômicos quanto ambientais, contribui para a restauração das estruturas e proporciona a manutenção de condições ideais do nível de qualidade dos pavimentos. O objetivo deste estudo é avaliar o comportamento quanto à deformação permanente de quatro misturas a frio estabilizadas com emulsão asfáltica e asfalto espumado, analisando os resultados obtidos em três procedimentos de ensaio de *Flow Number* adaptados para misturas recicladas a frio. Os procedimentos foram baseados na norma ABNT NBR 16505 (2016), no estudo de misturas recicladas feito por Kim e Lee (2012) e em resultados de simulações de estruturas de pavimento de trechos experimentais, por meio do *software 3D-Move*. Nos diferentes procedimentos, variou-se a tensão vertical e a temperatura de ensaio, além da verificação da influência do processo de cura no desempenho dos materiais. Os resultados do ensaio de *Flow Number* demonstraram, de forma geral, a melhora no desempenho das quatro misturas recicladas a frio com maior tempo de cura, não ocorrendo deformação permanente ao longo do ensaio. Este foi um fator preponderante para o desempenho das misturas asfálticas recicladas a frio, nas condições apresentadas, conferindo melhor desempenho para as amostras curadas. A granulometria das misturas estabilizadas com asfalto espumado e cimento *Portland*, utilizado como fíler, também conferiram maior resistência à deformação permanente das misturas. A granulometria das amostras com maior quantidade de material asfáltico reciclado pode influenciar seu comportamento quanto à deformação permanente, a depender da estrutura das partículas de material asfáltico reciclado, assim como a forma de dispersão do ligante, uma vez que a mistura estabilizada com emulsão apresentou maior dependência da temperatura e tensão vertical aplicada em comparação às misturas que foram estabilizadas com asfalto espumado. O ensaio de *Flow Number* mostrou ser uma ferramenta útil para a investigação da deformação permanente de misturas recicladas a frio.

Palavras-Chave: *Flow Number.* Reciclagem a Frio. Deformação Permanente. Mistura Asfáltica Reciclada a Frio.

ABSTRACT

The use of recycled materials in the pavement rehabilitation is a technique that allows both economic and environmental benefits, contributes to the restoration of the structural capacity, and maintains the ideal conditions of the quality level of the pavement. The objective of this study is to evaluate the behavior with respect to permanent deformation of four asphalt mixtures stabilized with asphalt emulsion and foamed asphalt, analyzing the results obtained in three Flow Number test procedures adapted for cold recycled mixtures. The procedures were based on ABNT NBR 16505 (2016), the study of recycled mixtures made by Kim and Lee (2012), and results of simulations of pavement structures of experimental sections, using 3D-Move software. In the different procedures, the vertical stress and the test temperature were varied, besides the verification of the influence of the curing process on the performance of the materials. The results of the Flow Number test showed, in general, the improvement in the performance of the four cold recycled mixtures with longer curing time, with no permanent deformation occurring during the test. It was a preponderant factor for the performance of the asphalt mixtures, giving better performance for the cured samples. The gradation of the mixtures stabilized with foamed asphalt and Portland cement, used as filler, also gave greater resistance to the permanent deformation. The gradation of the samples with the highest amount of recycled asphalt material can influence their behavior regarding permanent deformation, depending on the structure of the particles, as well as the dispersion form of the binder into the mixture, that influences the performance of the cold recycled mixtures. Since the stabilized emulsion mixture showed greater dependence on the temperature and the vertical tension applied compared to other mixtures that were stabilized with foamed asphalt. The Flow Number test proved to be a useful tool for investigating the permanent deformation of cold recycled mixtures.

Keywords: *Flow Number.* Cold Recycling. Permanent Deformation. Cold Recycled Asphalt Mixture.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1

1.1 OBJETIVO 3

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 4

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 6

2.1 RECICLAGEM A FRIO 6

2.2 MISTURAS RECICLADAS A FRIO ESTABILIZADAS COM LIGANTE ASFÁLTICO 8

2.2.1 Materiais estabilizados com cimento 9

2.2.2 Misturas de asfalto a frio 9

2.2.3 Materiais estabilizados com asfalto 10

2.2.4 Materiais estabilizados com cimento e asfalto 12

2.3 MISTURAS RECICLADAS A FRIO: PROJETO E DESEMPENHO 12

2.4 PROCESSO DE CURA: INFLUÊNCIA NA UMIDADE E RIGIDEZ 15

2.5 DEFORMAÇÃO PERMANENTE DAS MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A FRIO: CAMPO E LABORATÓRIO 20

2.5.1 Flow Number 22

3 AVALIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A FRIO 26

3.1 TRECHO EXPERIMENTAL 26

3.1.1 Estruturas dos quatro segmentos experimentais analisados 27

3.1.2 Simulação utilizando o software 3D-Move Analysis 28

3.1.3 Análise das respostas do pavimento no 3D-Move 30

3.1.4 Afundamento de Trilha de Roda (ATR) 34

3.2 MATERIAIS 35

3.2.1 Compactação e processo de cura 38

3.2.2 Dados do ensaio de Módulo Dinâmico 40

3.3 ENSAIOS DE *FLOW NUMBER* 42

3.3.1 Resultados e Discussões 43

3.3.2 Influência da composição da mistura 45

3.3.3 Influência da cura da mistura 46

3.3.4 Influência das condições de ensaio 48

3.4 ANÁLISE COMPLEMENTAR DA MISTURA RAP_3E2C 51

3.4.1 Método de ignição 51

3.4.2 Análise granulométrica 52

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS 55

5 REFERÊNCIAS 58

APÊNDICE A - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE *FLOW NUMBER* 63

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - INVESTIMENTO VERSUS QUALIDADE DA RODOVIAS 2
FIGURA 2 - *RANKING* DE QUALIDADE DAS RODOVIAS 2
FIGURA 3 - EXEMPLO DE MÁQUINA FRESADORA A FRIO DE PAVIMENTO (MODELO W 200/W 200I) .. 6
FIGURA 4 - EXEMPLOS DE CILINDROS DE CORTE UTILIZADOS PARA, (A) FRESAGEM RASA E (B) FRESAGEM PROFUNDA 7
FIGURA 5 - COMPORTAMENTO DOS DIFERENTES MATERIAIS UTILIZADOS EM PAVIMENTAÇÃO 8
FIGURA 6 - CARACTERIZAÇÃO DAS CRMS DE ACORDO COM O TIPO DE ESTABILIZANTE 9
FIGURA 7 - MICROESTRUTURA DE UM MATERIAL ESTABILIZADO COM ASFALTO ESPUMADO 11
FIGURA 8 - COMPORTAMENTO DO BSM: FASE DE CURA E FASE DE REDUÇÃO DA RIGIDEZ 14
FIGURA 9 - GRÁFICO DO FN - DEFORMAÇÃO PERMANENTE ACUMULADA *VERSUS* CICLOS DE CARGA 23
FIGURA 10 - LOCALIZAÇÃO DO TRECHO EXPERIMENTAL ANALISADO 26
FIGURA 11 - VISTA DO TRECHO EXPERIMENTAL NA BR-381 27
FIGURA 12 - CONFIGURAÇÃO DAS ESTRUTURAS DOS SEGMENTOS DO TRECHO EXPERIMENTAL ANALISADO 28
FIGURA 13 - CONFIGURAÇÃO DA ESTRUTURA SIMULADA NO *3D-MOVE* 29
FIGURA 14 - RESPOSTA DA TENSÃO VERTICAL A 40 KM/H 31
FIGURA 15 - INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO VEÍCULO NA TENSÃO VERTICAL 31
FIGURA 16 (A) - INFLUÊNCIA DA CARGA NA TENSÃO VERTICAL REGISTRADA NO TOPO DA CAMADA DE CRM 32
FIGURA 16 (B) - INFLUÊNCIA DA CARGA NA TENSÃO VERTICAL REGISTRADA NO TOPO DA CAMADA DE CRM 33
FIGURA 17 - TRELIÇA METÁLICA UTILIZADA NO LEVANTAMENTO DE ATR 34
FIGURA 18 - RESULTADOS DO ATR EM FUNÇÃO DOS PERÍODOS DO LEVANTAMENTO DE CAMPO .. 35
FIGURA 19 - ILUSTRAÇÃO DAS QUATRO MISTURAS DE CRMS 36
FIGURA 20 - GRANULOMETRIA DAS QUATRO MISTURAS RECICLADAS A FRIO 37
FIGURA 21 - RECICLADORA WLB 10 S E *PUGMILL* WLM 30 DA WIRTGEN 39
FIGURA 22 - MARTELO VIBRATÓRIO MODELO GCH 11 VC DA MARCA BOSCH 40
FIGURA 23 - CURVAS MESTRAS DO MÓDULO DINÂMICO 41
FIGURA 24 - RESULTADO DO ENSAIO DE FN: RAP_3E2C 45
FIGURA 25 - RESULTADO DO ENSAIO DE FN: RAP_3F2C 45
FIGURA 26 - RESULTADO DO ENSAIO DE FN SEM CURA: RAP_2F1H 47
FIGURA 27 - RESULTADO DO ENSAIO DE FN COM 28 DIAS DE CURA: RAP_2F1H 47
FIGURA 28 - AMOSTRAS DE CRMS APÓS O ENSAIO DE FN 50

FIGURA 29 - EXEMPLO DE AMOSTRA ANTES E APÓS IGNIÇÃO NA MUFLA A 540ºC 51
FIGURA 30 - RESULTADO QUANTITATIVO DO TEOR DE ASFALTO..... 52
FIGURA 31 - RESULTADO DO ENSAIO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DOS CPS DA MISTURA RAP_3E2C..... 53
FIGURA 32 - FRAÇÕES DA MISTURA RAP_3E2C APÓS LAVAGEM 54

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PRODUÇÃO DE BSM ESTABILIZADA COM EMULSÃO OU ESPUMA 11
TABELA 2 - PROCEDIMENTOS DE CURA ADOTADOS EM LABORATÓRIO 17
TABELA 3 - PARÂMETROS ADOTADOS NO ENSAIO DE FN..... 24
TABELA 4 - NOMENCLATURA ADOTADA PARA AS QUATRO MISTURAS RECICLADAS 27
TABELA 5 - DENSIDADE ESPECÍFICA MÁXIMA DAS QUATRO MISTURAS RECICLADAS 40
TABELA 6 - PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO COM O *3D-MOVE* ADOTADOS NO ENSAIO DE FN..... 43
TABELA 7 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FN PARA OS TRÊS MÉTODOS ADOTADOS..... 44
TABELA 8 - UMIDADE MÉDIA DAS AMOSTRAS DE RAP_2F1H NAS DUAS CONDIÇÕES DE CURA..... 48
TABELA 9 - VALORES RECOMENDADOS PARA FN DE CA..... 50

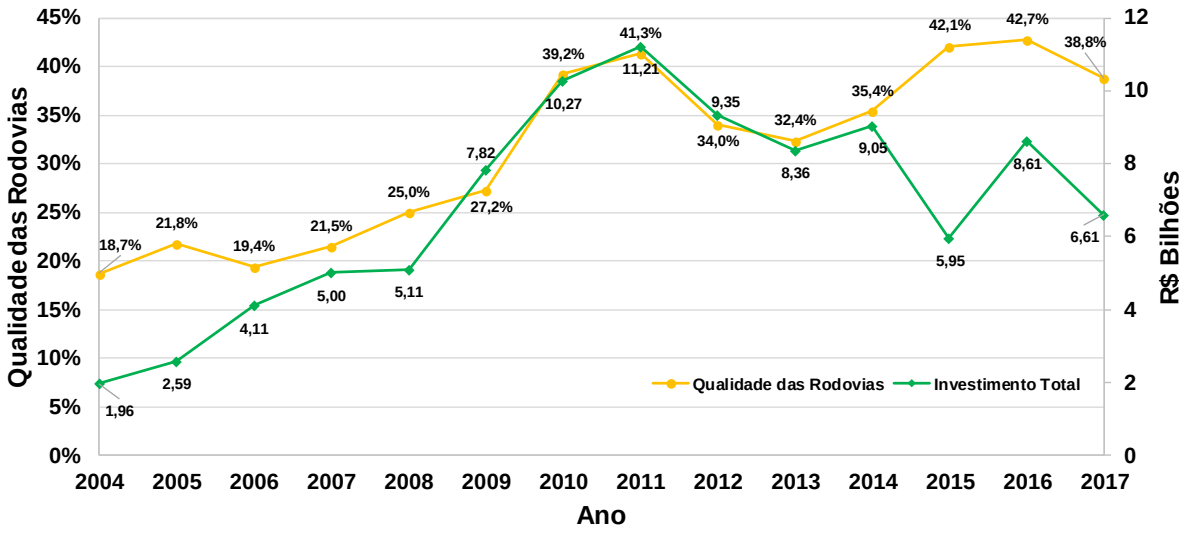
1 INTRODUÇÃO

O sistema rodoviário é o modo de transporte mais utilizado no Brasil. Pelas rodovias nacionais são transportados os maiores volumes de cargas e de passageiros. As estruturas de pavimento sofrem deterioração ao longo do tempo devido à solicitação do tráfego e às ações das intempéries, reduzindo o nível de qualidade do pavimento e potencializando o risco da ocorrência de acidentes. Para corrigir estes defeitos, serviços de intervenções como conservação, revitalização e restauração são necessários para proporcionar uma condição favorável do nível de qualidade do pavimento.

Um outro fator que contribui para o estado ruim das rodovias é a escassez de recursos investidos na infraestrutura rodoviária, que pode ser confirmada com os dados da pesquisa realizada pela Confederação Nacional do Transporte (CNT) identificando que quanto maior o investimento público federal realizado, melhor a condição de qualidade das rodovias. A falha de investimento em rodovias se reflete no processo de degradação da malha rodoviária, agravado pela ineficiência na execução das intervenções necessárias, como pode ser visto na Figura 1, que compara a qualidade das rodovias federais brasileiras (ótimo ou bom, %) com o investimento público federal utilizado. Percebe-se que com a redução dos investimentos na malha rodoviária a partir de 2011 ocorreu a queda da qualidade das rodovias federais (CNT, 2017).

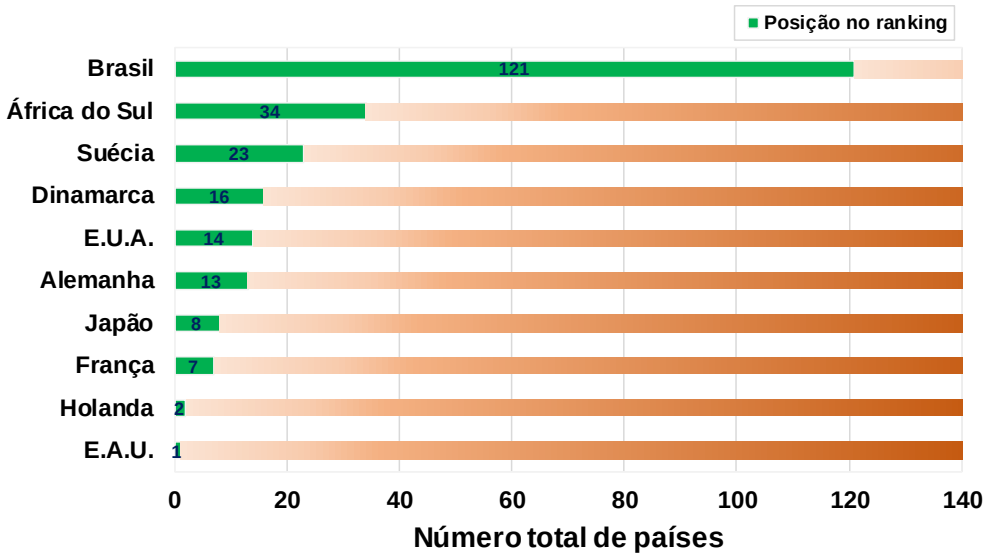
Outro dado que mostra a relação entre recursos investidos e qualidade das rodovias é a classificação em que o país se encontra na pesquisa referente a qualidade das rodovias do *The Global Competitiveness Report* (2015-2016) onde o Brasil ocupa a 121ª posição no *ranking* formado por 140 países, como mostrado na Figura 2 (SCHWAB, 2015). Esses dados evidenciam a importância do desenvolvimento de soluções técnicas para a manutenção do bom nível de serviço da rodovia. Neste contexto, a reciclagem dos pavimentos possibilita a manutenção dos pavimentos com o emprego de tecnologias mais eficientes, além do reaproveitamento de materiais. O uso de materiais reciclados em pavimentação, particularmente para estruturas de pavimentos flexíveis, é uma solução técnica que se mostra econômica e sustentável (KUNA, 2015).

Figura 1 - Investimento versus qualidade da rodovias



Fonte: Adaptado de CNT (2017)

Figura 2 - *Ranking* de qualidade das rodovias



Fonte: Adaptado de Schwab (2015)

No Brasil, centenas de metros cúbicos de material fresado são gerados todos os dias. Somente na cidade de São Paulo - SP, são geradas aproximadamente 40 mil toneladas mensalmente (SUZUKI e BONFIM, 2017). As principais vantagens na utilização deste material fresado e da técnica de reciclagem são os benefícios econômicos, ambientais e logísticos por meio da redução dos custos com transporte e reutilização de materiais em substituição aos materiais virgens, a redução no tempo de construção e impactos operacionais, e a possibilidade de uma reabilitação mais rápida das camadas do pavimento. A reciclagem é considerada uma ferramenta importante para os serviços de manutenção e conservação,

principalmente em rodovias de tráfego intenso, onde questões operacionais são bastante relevantes (GUATIMOSIM, 2015; KUNA, 2015).

Para promover a recuperação do pavimento com a reutilização do material obtido pelo processo de fresagem, podem ser adotados alguns tipos de reciclagem, tais como a reciclagem a frio, morna ou quente, sendo os materiais oriundos de fresagem superficial, ou mesmo profunda. A técnica de reciclagem a frio consiste na utilização de materiais fresados combinados com agentes estabilizantes que são empregados para corrigir as deficiências mecânicas das misturas recicladas, melhorando suas propriedades estruturais e de durabilidade, produzindo um novo material, sem a necessidade do aquecimento. Esses agentes podem ser ligantes asfálticos (asfalto espumado, ou emulsão asfáltica), ligantes hidráulicos (cimento *Portland,* ou cal hidratada), agentes químicos (rejuvenescedores) e água. Podem ser produzidos diferentes tipos de misturas recicladas, apresentando comportamento mecânico semelhante ao de um material granular, porém com maior coesão, ou de uma mistura asfáltica, a depender da granulometria, do tipo de dosagem e dos agentes estabilizantes adotados. Para o cenário de menores teores de ligante asfáltico e ligante hidráulico, a deformação permanente geralmente é apontada como o principal defeito desses materiais (JENKINS, 2000; ASPHALT ACADEMY, 2009; WIRTGEN, 2012; CARDONE *et al*., 2014; GUATIMOSIM *et al*., 2018).

Para uma melhor utilização das misturas asfálticas recicladas em camadas de pavimento, é fundamental que se conduzam experimentos em campo e laboratório para avaliação da efetividade do processo de reciclagem em relação às suas características de deformação permanente. O presente estudo caracteriza as misturas recicladas a frio com asfalto espumado e com emulsão asfáltica, no que se refere à deformação permanente, contribuindo para uma melhor compreensão do efeito do tipo de mistura e da condição de ensaio no mecanismo de deformação permanente.

1.1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento à deformação permanente de quatro misturas a frio estabilizadas com ligante asfáltico (sendo três

recicladas e uma produzida com materiais novos), que foram aplicadas na camada de base de quatro segmentos experimentais.

Tal avaliação foi feita por meio de ensaios laboratoriais, visando contribuir na análise deste defeito para melhor compreender os mecanismos envolvidos na deformação permanente em campo.

Como objetivos específicos do presente trabalho têm-se:

- ✓ Avaliar os fatores que influenciam a resposta das misturas recicladas a frio quanto à deformação permanente, no que diz respeito ao tipo de estabilização adotada e ao processo de cura;
- ✓ Simular as estruturas dos segmentos com misturas recicladas a frio para utilização no ensaio de laboratório do nível de tensão vertical medido na simulação;
- ✓ Comparar dados de deformação permanente em laboratório com a utilização de três procedimentos de ensaios para as misturas estabilizadas com ligante asfáltico.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos, conforme segue:

O capítulo 1 é a introdução do tema da pesquisa, apresentando sua relevância, a definição dos objetivos e a estrutura geral da dissertação.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica sobre o tema da reciclagem a frio, tratando dos tipos, além de abordar detalhes sobre o comportamento mecânico dessas misturas, levando em consideração a cura do material e metodologias adotadas em ensaios de campo e laboratório referentes à utilização de misturas recicladas a frio.

O capítulo 3 descreve os materiais e as metodologias utilizadas na investigação da deformação permanente em campo e em laboratório, detalhando as atividades desenvolvidas, além dos resultados obtidos e análises do comportamento mecânico das misturas estudadas.

O capítulo 4 traz as considerações finais da pesquisa obtidas a partir da avaliação do comportamento à deformação permanente das misturas estudadas, além das recomendações para pesquisas futuras sobre deformação permanente de misturas recicladas a frio.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RECICLAGEM A FRIO

De acordo com West (2015), a fresagem do pavimento, realizada por uma máquina denominada fresadora de asfalto, é a fonte mais comum para obtenção do material asfáltico a ser reciclado do pavimento (RAP, do inglês *Reclaimed Asphalt Pavement*) utilizado na recuperação do pavimento. O RAP pode ainda ser obtido por outras duas fontes, tais como a demolição do pavimento e os resíduos de misturas das usinas de asfalto, que atualmente são fontes menos adotadas para obtenção do RAP utilizado na recuperação de pavimentos.

A Figura 3 (WIRTGEN, 2016) ilustra uma fresadora de asfalto a frio W 200/W 200i da Wirtgen, um equipamento que possibilita a fresagem nas larguras de 2,0 m (largura de série), 1,5 m e 2,2 m a partir do conjunto de fresagem instalado (tambor de fresagem + cilindro de corte). Também é capaz de realizar a fresagem em diferentes profundidades com a substituição do tipo de cilindro de corte, como mostrado na Figura 4, que traz dois tipos de cilindros utilizados na fresagem rasa e fresagem profunda, diferenciados pela distância entre os *bits* (dentes de corte) e a quantidade de *bits* do tambor, segundo Wirtgen (2012).

Figura 3 - Exemplo de máquina fresadora a frio de pavimento (modelo W 200/W 200i)

Fonte: Wirtgen (2016)

Figura 4 - Exemplos de cilindros de corte utilizados para, (a) fresagem rasa e (b) fresagem profunda

(a) (b)

Fonte: Wirtgen (2012)

A fresagem é uma técnica de corte empregada no processo de restauração de pavimentos, podendo ser realizada a frio ou a quente, e com espessura de corte superficial, rasa ou profunda. A fresagem rasa (≅ 5 cm) realiza o corte da camada de revestimento asfáltico, gerando o RAP, não atingindo as camadas subjacentes à camada de revestimento, e a fresagem profunda (≥ 30 cm), realiza o corte da camada de revestimento asfáltico e das camadas subjacentes (base e sub-base), gerando o RAP e materiais reciclados granulares ou estabilizados, provenientes das camadas fresadas subjacentes ao revestimento asfáltico. Esses materiais podem ser utilizados separadamente, ou feita uma mistura do RAP com os materiais provenientes das camadas de base e sub-base (BONFIM, 1999; ARRA, 2001).

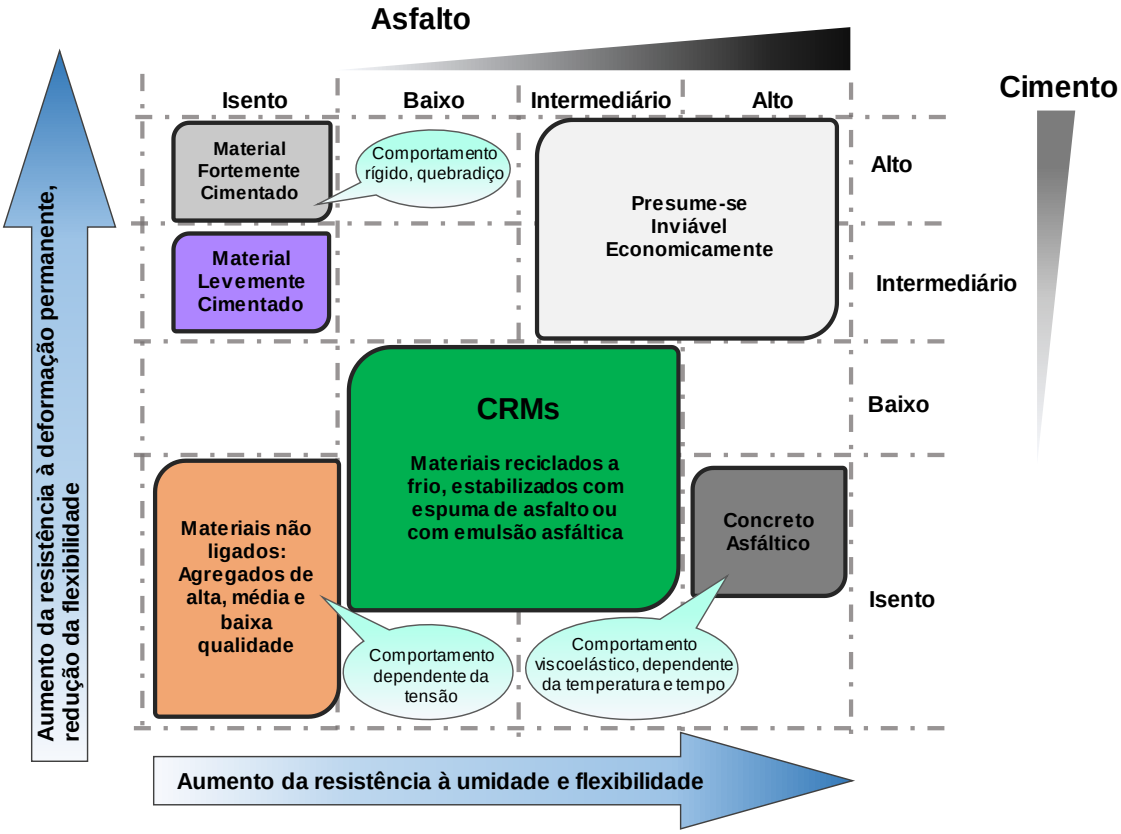
A reciclagem a frio, a depender do tipo de aplicação a qual se destina e do nível de deterioração do pavimento, pode ser realizada por meio de dois processos: (i) em usina, com maior controle do produto final, pode-se também ser adotada uma usina móvel, ou (ii) *in situ,* com a utilização de uma recicladora a frio, que tem a capacidade de fresar, misturar (com adição de estabilizadores) e espalhar a mistura reciclada no campo (WIRTGEN, 2012). A reciclagem a frio (com o uso de emulsão ou asfalto espumado) é um processo realizado a temperatura ambiente, podendo ser utilizado agregado virgem para ajuste da granulometria e também com a adição de cal hidratada, ou cimento *Portland* com a função de fíler ativo (geralmente, 1% em massa, auxilia a dispersão das partículas do asfalto espumado e o rompimento da emulsão asfáltica), ou como agente estabilizante em porcentagens de adição mais elevadas (ARRA, 2001; ASPHALT ACADEMY, 2009; WIRTGEN, 2012).

2.2 MISTURAS RECICLADAS A FRIO ESTABILIZADAS COM LIGANTE ASFÁLTICO

As misturas recicladas a frio, também denominadas em inglês de *Cold Recycled Mixtures* (CRMs), são geralmente estabilizadas com ligante asfáltico (emulsão asfáltica ou asfalto espumado) e ligante hidráulico (cimento *Portland* ou cal hidratada) adicionados para influenciar a cura, as propriedades das CRMs tais como plasticidade e rigidez, e a aderência do ligante asfáltico aos agregados (ASPHALT ACADEMY, 2009; GODENZONI *et al*., 2016).

Segundo a Asphalt Academy (2009), a quantidade de emulsão ou asfalto espumado utilizada não ultrapassam, geralmente, a taxa de 3% em massa. A dispersão adequada destes estabilizantes e a cobertura dos agregados estão diretamente associados ao aumento da resistência, melhoria na coesão e redução da susceptibilidade à umidade das CRMs. A Figura 5 mostra o comportamento das CRMs em comparação com outros materiais utilizados em pavimentação, a depender da quantidade de asfalto e cimento adicionados.

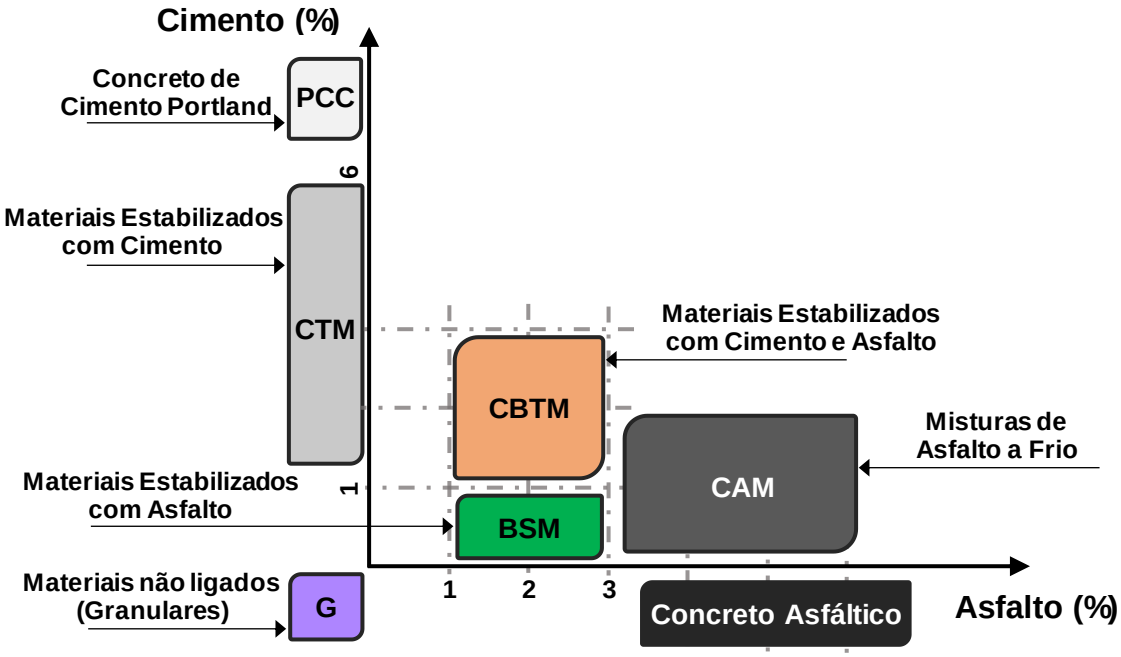
Figura 5 - Comportamento dos diferentes materiais utilizados em pavimentação



Fonte: Adaptado de Asphalt Academy (2009)

Dentre os tipos de CRMs utilizadas para reabilitação de pavimentos, podem ser citados pelo menos 4 tipos distintos, que são utilizados em diferentes situações de níveis de tráfego, caracterizados pelo tipo de agente estabilizante e dosagem dos mesmos, bem como pelo comportamento mecânico esperado (GRILLI *et al*., 2012; GODENZONI *et al*., 2016). Os 4 tipos de CRMs estão representados graficamente na Figura 6, caracterizados de acordo com o tipo de estabilizante e teor adotado, e seu comportamento mecânico. A seguir, serão apresentados os 4 tipos de CRMs de forma sucinta.

Figura 6 - Caracterização das CRMs de acordo com o tipo de estabilizante



Fonte: Adaptado de Grilli *et al*. (2012)

2.2.1 Materiais estabilizados com cimento

A CRM produzida apenas com a adição de cimento como agente estabilizante (CTM, do inglês *Cement-Treated Material*), é caracterizada pela susceptibilidade ao trincamento por contração, ocorrendo a redução da flexibilidade da mistura (comportamento frágil) e aumento da resistência à deformação permanente, podendo a CTM conter até 6% de teor de cimento (GRILLI *et al*., 2012; CARDONE *et al*., 2014).

2.2.2 Misturas de asfalto a frio

Denominada em inglês como *Cold Asphalt Mixture* (CAM), a mistura de asfalto a frio recebe tal denominação por ser produzida com mais de 3% de teor de

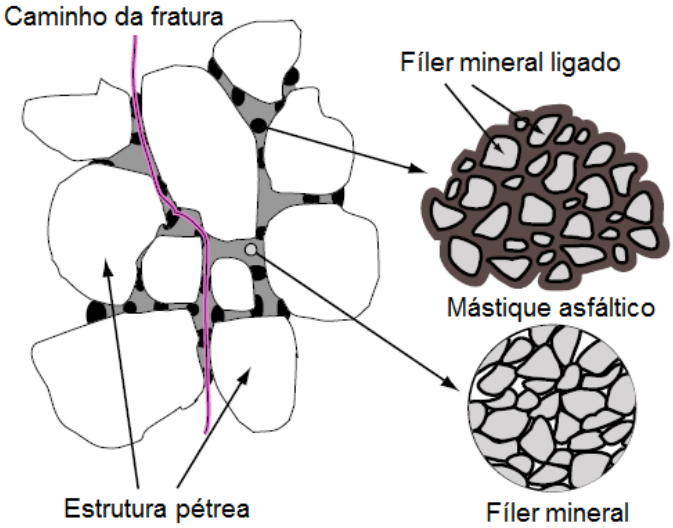
asfalto (espuma ou emulsão), considerado um teor elevado quando comparado com os outros tipos de CRMs, e teor de ligante hidráulico limitado, adicionado apenas com a função de fíler ativo. A composição da CAM propicia um aumento da resistência à umidade e da flexibilidade, apresentando comportamento susceptível à temperatura e à taxa de carregamento. São misturas geralmente utilizadas em camadas de ligação (binder) e camadas de base do pavimento asfáltico (GRILLI *et al*., 2012; CARDONE *et al*., 2014).

2.2.3 Materiais estabilizados com asfalto

A CRM estabilizada com teor máximo de 3% de emulsão ou espuma, e teor máximo de 1% de cimento *Portland* ou cal hidratada adicionados na mistura especificamente para função de fíler ativo, são denominadas em inglês de *Bitumen Stabilized Material* (BSM). Nesta proporção adotada na composição do BSM, a mistura apresenta comportamento mecânico compatível aos materiais granulares, com a forma de dispersão do estabilizante asfáltico aumentando a coesão da mistura, a resistência ao dano por umidade e a resistência à deformação permanente (JENKINS *et al*., 2007; ASPHALT ACADEMY, 2009; GUATIMOSIM, 2015).

A Figura 7 mostra um exemplo da estrutura microscópica de um BSM estabilizado com asfalto espumado e cimento (fíler), destacando: a estrutura pétrea, o mástique asfáltico e o fíler mineral (cimento). É possível verificar a dispersão do asfalto espumado na BSM que cobre apenas as partículas mais finas, formando o mástique composto por asfalto espumado e cimento, criando uma ligação não contínua com as partículas graúdas (FU *et al*., 2009). Na Tabela 1 são apresentadas informações sobre o processo de estabilização feita com emulsão asfáltica ou com asfalto espumado (WIRTGEN, 2012).

Figura 7 - Microestrutura de um material estabilizado com asfalto espumado



Fonte: Adaptado de Fu *et al*. (2009)

Tabela 1 - Produção de BSM estabilizada com emulsão ou espuma

Fator	Processo de Estabilização	
	Emulsão	**Asfalto Espumado**
Temperatura de mistura	20°C a 70°C	160°C a 180°C (antes de espumar)
Tipo de cobertura de agregados	Se dispersa cobrindo preferencialmente as partículas mais finas e também cria um filme que cobre algumas partículas mais graúdas. Aumenta a coesão da mistura.	Se dispersa cobrindo somente as partículas mais finas, aquelas passantes na peneira de n° 200, produzindo um mástique de asfalto (Figura 7). Aumenta a coesão da mistura.
Produção	Com temperatura do agregado superior a 5°C, para evitar o rompimento prematuro da emulsão.	Com temperatura do agregado superior a 10°C, para a correta dispersão da espuma na mistura.
Estocagem	O material com emulsão não deve ser armazenado.	Pode ser armazenado quando adicionado até 1% de cal hidratada como fíler.
Ganho inicial de resistência	Lento, relacionado à perda de umidade (cura).	Médio, relacionado à perda de umidade (cura).

Fonte: Adaptado do manual da Wirtgen (2012)

Conforme Jenkins (2000), a estabilização com asfalto espumado contribui para uma boa rigidez do BSM após a compactação em campo, propiciando a liberação imediata da camada ao tráfego sem causar danos à camada recém compactada, e também é compatível com uma maior variedade de tipos de rochas (agregado virgem, cascalho, RAP, areias e até materiais contaminados) quando comparada com a estabilização com emulsão asfáltica.

2.2.4 Materiais estabilizados com cimento e asfalto

Este tipo de CRM é caracterizado por possuir maior coesão e rigidez, sendo menos propenso a deformação permanente quando, por exemplo, comparado com os BSMs. Os materiais estabilizados com cimento e asfalto (CBTM, do inglês *Cement-Bitumen Treated Material*) são estabilizados com teor máximo de 3% de emulsão ou espuma e com teor de cimento entre 1% e 3%, adotando-se, geralmente, teor de cimento a partir de 2%. O CBTM tem seu comportamento mecânico influenciado pelo teor de cimento adotado e de estabilizante asfáltico utilizado, devido ao tipo de cobertura das partículas dos agregados, o que reduz a susceptibilidade ao trincamento e a rigidez estrutural geral da camada reciclada, podendo ainda destacar-se a dependência do tempo-temperatura e propensão ao dano por fadiga, como ocorre com um Concreto Asfáltico (CA) (GRILLI *et al*., 2012; CARDONE *et al*., 2014; GODENZONI *et al*., 2016).

A hidratação ocorrida no CBTM durante o processo de cura pode impactar de forma significativa a resposta mecânica da mistura, pois resulta em diversos mecanismos causados pela adição de ambos os estabilizantes (hidráulicos e asfálticos) como, por exemplo, a ruptura da emulsão, a perda da umidade e a hidratação dos compostos cimentícios. Assim, é importante considerar certo período de cura para o CBTM atingir propriedades mecânicas de resistência e rigidez condizentes com suas características (CARDONE *et al*., 2014; GODENZONI *et al*., 2016).

2.3 MISTURAS RECICLADAS A FRIO: PROJETO E DESEMPENHO

Os procedimentos adotados nos projetos das CRMs são adaptações daqueles empregados para misturas asfálticas. O projeto da CRM concentra-se na granulometria, na otimização do teor de estabilizantes (asfáltico e hidráulico) e no teor de água e aditivos, com a avaliação feita normalmente por meio das propriedades volumétricas, mecânicas e de durabilidade dos corpos de prova compactados em laboratório. Para essa avaliação na fase de projeto da mistura, a depender da composição da mistura e do tipo de comportamento esperado, diversos métodos de compactação têm sido usados: impacto (Proctor e Marshall), giratório, ou vibratório (GRILLI *et al*., 2012; WIRTGEN, 2012; GODENZONI *et al*., 2016).

Segundo Tebaldi *et al*. (2014), a seleção entre esses métodos de compactação depende, principalmente, da função que a CRM irá desempenhar na estrutura e também por experiência técnica de aplicação. Assim, a compactação por impacto (Proctor e Marshall) é a mais recomendada quando a CRM for utilizada como um material granular melhorado, enquanto que os métodos de compactação giratória ou vibratória podem ser mais eficazes quando a CRM for adotada como uma mistura de comportamento similar ao CA. De acordo com esses autores, as amostras são preparadas em laboratório objetivando a compactação dos corpos de prova de maneira similar à compactação do material em campo.

Grilli *et al*. (2012) relatam que a quantidade total de líquidos, quando utilizado um agente estabilizante à base de água na mistura, torna-se essencial para proporcionar a trabalhabilidade à temperatura ambiente, pois os líquidos atuam como lubrificantes na fase de compactação, como é o caso das misturas estabilizadas com emulsão. Para essas misturas, é importante realizar uma dosagem adequada do teor de emulsão e água, evitando o rompimento prematuro da emulsão (sendo ideal que aconteça somente após a compactação), que pode prejudicar a homogeneidade e o desempenho da mistura.

Além disso, uma dosagem adequada do teor de emulsão e água possibilita que a emulsão contribua na mistura composta com maior teor de finos, bem como no retardamento da hidratação do cimento, possibilitando a trabalhabilidade da mistura por um período mais longo. Na estabilização das CRMs, têm sido utilizadas emulsões tanto do tipo catiônicas como aniônicas (GRILLI *et al*., 2012).

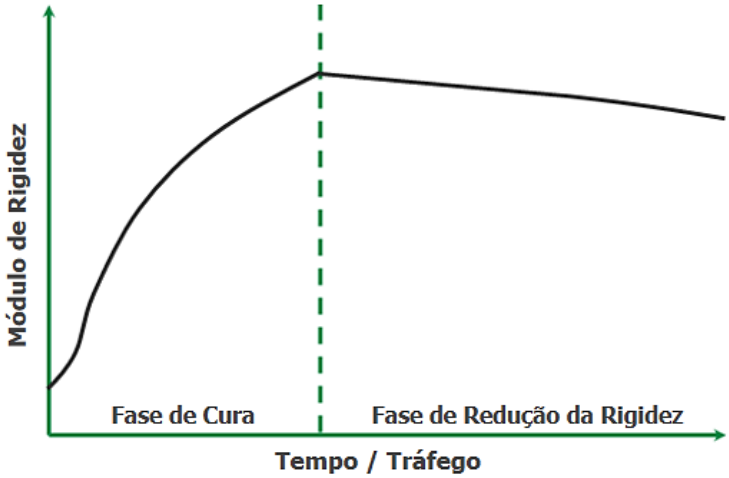
Godenzoni *et al*. (2017) avaliaram o desempenho em campo de três misturas recicladas a frio (CBTM com 3% de asfalto espumado e 1,75% de cimento; CBTM com 3% de emulsão asfáltica e 2% de cimento e CTM contendo 3% de cimento) aplicadas na camada de sub-base de um pavimento. A partir de observações de campo, foi mostrado que as três misturas de CRM, até 3~5 anos após a construção dos segmentos, apresentaram aumento da rigidez das camadas, devido aos fenômenos relacionados à cura de ambos os estabilizantes utilizados (asfáltico e hidráulico).

Observações de longo prazo realizadas por Jenkins *et al*. (2007) do desempenho de um pavimento com camada de BSM indicam que, durante a

primeira fase da vida de serviço, a rigidez aumenta devido à cura da mistura reciclada. A rigidez é, em muitos casos, baixa no curto prazo, o que pode levar o pavimento a sofrer problemas tanto durante a construção, quanto com a abertura ao tráfego devido às solicitações impostas. Com isso, a deformação permanente passa a ser o defeito mais crítico para o material nessa fase, causando efeitos negativos que são irreversíveis. Assim, é indicada a compactação de uma camada delgada de mistura asfáltica sobre a camada de BSM estabilizada com asfalto para proteção durante a cura (PÉREZ *et al*., 2013).

Segundo Ebels (2008), a maior parcela de deformação permanente sofrida pelo BSM ocorre no início da vida do pavimento. O autor descreve duas fases de comportamento para o BSM: (i) na primeira fase, denominada como fase de cura, observa-se o aumento na rigidez inicial influenciado pelo processo de cura e adensamento da camada. Esta fase pode durar entre 6 e 18 meses; (ii) na segunda fase, chamada fase de redução de rigidez, ocorre a diminuição na rigidez da camada devido às solicitações impostas. A Figura 8 apresenta as duas fases do BSM graficamente para ilustrar o que foi descrito (PÉREZ *et al*., 2013).

Figura 8 - Comportamento do BSM: fase de cura e fase de redução da rigidez



Fonte: Adaptado de Pérez *et al*. (2013)

Guatimosim (2015) avaliou o comportamento de um BSM com 1,8% de asfalto espumado e 1% de cal hidratada, aplicado na camada de base de um pavimento. Foi observado, por meio de medidas de deflexões feitas com um *Falling Weight Deflectometer* (FWD), o aumento da rigidez da camada de BSM ao longo de um período de 22 meses, contribuindo para o aumento da capacidade estrutural do pavimento.

Guatimosim (2015) descreve que ainda estão em desenvolvimento métodos para os projetos de mistura e para os projetos estruturais de CRMs no Brasil, com diferentes métodos de projeto sendo utilizados ao redor do mundo, cada um com as suas particularidades. O autor sugere que o processo de caracterização do material deve ser feito baseado em parâmetros comuns de projeto independente do material reciclado. Ainda de acordo com Guatimosim (2015), uma abordagem mais apropriada para o projeto estrutural é a análise do acúmulo de deformação permanente.

No âmbito nacional, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) possui somente especificações de serviço do material (DNIT ES 166/2013 e DNIT ES 169/2014), não existe especificação de projeto para camadas de misturas recicladas, especificamente para o BSM. Assim, os parâmetros de projeto estrutural, principalmente para análise mecanicista, são escolhidos pelo projetista (GUATIMOSIM, 2015). Também, os órgãos estaduais como o Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo (DER-SP) e do Paraná (DER-PR) estabelecem somente procedimentos de execução e especificações de materiais reciclados (DER/SP ET-DE-P00/033 e DER/PR ES-P 32/05), assim como acontece na Prefeitura de São Paulo, que tem um procedimento de execução e especificação para base de material fresado com asfalto espumado (PMSP ETS-02/2009).

2.4 PROCESSO DE CURA: INFLUÊNCIA NA UMIDADE E RIGIDEZ

A água é adicionada na CRM para facilitar a mistura e a compactação, e é progressivamente removida da mistura após a compactação por reações de hidratação, evaporação ou drenagem. Este processo é conhecido como cura, e é um processo importante para o desenvolvimento de propriedades mecânicas (resistência e rigidez) das misturas (CARDONE *et al*., 2014; GODENZONI *et al*., 2016). É possível encontrar na literatura definições diferentes para os processos de cura das CRMs. O mesmo tem grande influência no desempenho da camada de material reciclado e do pavimento, pois os materiais que apresentam cura lenta apresentam probabilidade de deformação permanente durante o início do ciclo de vida devido ao tráfego (TEBALDI *et al*., 2014).

Segundo a Asphalt Academy (2009), um fator importante neste processo de cura das CRMs é o teor de umidade, que influencia no comportamento mecânico das misturas recicladas desde a fase de preparo das CRMs (mistura e compactação). É importante a determinação de um teor de umidade ótimo para propiciar trabalhabilidade às misturas com a lubrificação dos agregados, sem prejudicar a dispersão adequada do ligante asfáltico utilizado como estabilizante. A umidade atua de diferentes maneiras, a depender do tipo de estabilizante asfáltico adotado: (i) em CRMs estabilizadas com emulsão asfáltica, a umidade atua evitando a ruptura precoce da emulsão, reduzindo a absorção da água da emulsão pelos agregados da mistura, o que também propicia o prolongamento do tempo para realização da mistura, transporte e compactação; (ii) em CRMs estabilizadas com asfalto espumado, a umidade atua favorecendo a dispersão da espuma durante a mistura, facilitando a suspensão dos agregados finos para o contato com o asfalto espumado.

Na literatura são encontrados diferentes procedimentos de cura em laboratório, e alguns trabalhos apresentam uma revisão onde estes procedimentos são bem explanados (JENKINS, 2000; KIM *et al*. 2011, BESSA *et al*. 2016). A Tabela 2 apresenta alguns dos procedimentos de cura para CRMs utilizados em laboratório.

Os procedimentos de cura têm adotado temperaturas entre 20ºC e 60ºC, porém, alguns estudos mostraram que a temperatura de 60ºC é muito alta para certas aplicações e que uma temperatura em torno de 40ºC se mostra mais adequada para ser utilizada no processo de cura de CRMs sem causar danos nas amostras (TEBALDI *et al*., 2014).

De acordo com Tebaldi *et al*. (2014), não é simples a definição de um procedimento de cura para simular o processo ocorrido no campo, de forma que satisfaça todos os tipos de CRMs e condições climáticas. Assim, desde que se evite danos nas amostras, qualquer procedimento de cura pode ser aplicado para classificação e comparação entre diferentes tipos de CRMs.

Tabela 2 - Procedimentos de cura adotados em laboratório

País	Fonte	Ligante asfáltico	Dimensão da amostra (mm x mm)	Procedimento de cura
África do Sul	Asphalt Academy (2009)	Espuma ou Emulsão	100 x 63	72h a 40°C com amostras não-ensacadas
		Emulsão	150 x 127	26h a 30°C com amostras não-ensacadas + 48h a 40°C com amostras ensacadas
		Espuma	150 x 127	20h a 30°C com amostras não-ensacadas + 48h a 40°C com amostras ensacadas
	Jenkins *et al*. (2007)	Espuma	150 x NE	28 dias a temperatura controlada (fora do molde)
Alemanha	Wirtgen (2012)	Espuma	100 x 63,5 ou 150 x 95	Cura seca: 72h a 40°C ou até amostra atingir massa constante
		Espuma	150 x 95	Simulação de campo: 20h a 30°C ou até umidade atingir 50% da umidade ótima
		Emulsão	100 x 63,5 ou 150 x 95	Cura seca: 72h a 40°C ou até amostra atingir massa constante
		Emulsão	150 x 95	Simulação de campo: 24h a 30°C ou até umidade atingir 50% da umidade ótima
Brasil	DNIT ES 169/2014	Espuma	100 x 63,5	72h a 40°C
	Bessa *et al*. (2016)	Emulsão	100 x 200	1 dia a 60°C
	Guatimosim *et al*. (2018)	Espuma	100 x 200	Cura seca: 3, 7, 14, 28 e 60 dias a 25°C com amostras não-ensacadas Cura úmida: 1, 7 e 28 dias a 25ºC com amostras ensacadas
Estados Unidos	ARRA (2017)	Espuma	100 x 63,5	Mínimo de 16h a 40°C e máximo de 72h até amostra atingir massa constante
	Fu *et al*. (2009)	Espuma	150 x 300	24h a 20°C com amostras ensacadas 7 dias a 40°C com amostras não-ensacadas

NE = não especificado

A cura que ocorre no campo depende de diversos fatores relacionados à composição da mistura, características de construção da camada (espessura), capacidade de drenagem das camadas subjacentes, além dos fatores ambientais, que são difíceis de serem reproduzidos e padronizados (CARDONE *et al*., 2014).

Dentro deste contexto, Cardone *et al*. (2014) destacam algumas considerações que devem ser relevantes num procedimento de cura para laboratório como: (i) o rompimento da emulsão, (ii) a perda de umidade e a hidratação do cimento, que ocorrem a partir da composição da mistura, e (iii) o controle da temperatura de cura e da umidade relativa.

No campo, o processo de cura da CRM pode levar um longo tempo para ser concluído, até atingir um teor de umidade estável, a depender do clima e das condições climáticas do local. Assim, geralmente quando a camada de revestimento é aplicada, este processo não está totalmente concluído. Muitos países europeus utilizam o teor de umidade residual (1,0% - 1,5%) para determinar o momento ideal da construção da camada de revestimento. Em países como Portugal e Suécia, são necessárias pelo menos 3 semanas para atingir o teor de umidade residual. Este teor pode ser adotado como menor que 1,0% em países com clima mais quentes, como é o caso da Espanha, onde tal valor é atingido em até 7 dias. Em geral, encontra-se um teor de umidade entre 0,5% e 1,0% após vários anos da aplicação do CRM em camada de base de pavimentos sob condições climáticas moderadas. No entanto, em países com clima instável e chuvas frequentes, como a Irlanda, recomenda-se que a camada reciclada a frio seja coberta logo após a construção, já que o clima úmido retardará o processo de cura da camada reciclada a frio (KIM *et al*. 2011; TEBALDI *et al*., 2014).

Bessa *et al*. (2016) adotaram dois procedimentos de cura (após remover os corpos de prova dos moldes): convencional (25°C) com tempo de cura de 7, 28, 60 e 90 dias, e acelerada com temperaturas de 40ºC, 60ºC e 100ºC e tempo de cura de 1, 3 e 7 dias, para uma CRM estabilizada com 3% de emulsão e 1,0% de cimento. Realizou-se a análise por meio do ensaio de Resistência à Tração indireta (RT) e os resultados mostraram que para a temperatura de 60°C foram encontrados os maiores resultados de resistência das misturas em todos os tempos de cura. A resistência resultante a 25°C após os 60 e 90 dias foi alcançada na temperatura de 60°C após 1 dia de cura. A partir dos resultados, os autores recomendaram a utilização do processo de cura acelerada com 60°C por apenas 1 dia, a fim de otimizar o tempo para a execução dos projetos das misturas. Salientou-se a necessidade de investigação da influência da temperatura proposta de 60°C,

considerada elevada pelos próprios autores, na dispersão da emulsão e na possível alteração na permeabilidade da mistura.

No estudo desenvolvido por Guatimosim (2015), realizou-se a cura da mistura à temperatura de 25°C em uma estufa incubadora com tempos de 3, 7, 14, 28 e 60 dias (após remover os corpos de prova dos moldes e deixá-los expostos), e com tempo de cura de 3, 7, e 28 dias (seladas em saco plástico). Nos 3 primeiros dias ocorreu grande parte da perda de umidade das amostras, prejudicando a análise do efeito da cura pelo ensaio de Módulo de Resiliência triaxial (MR). Foram observados valores de MR maiores em amostras com maior tempo de cura e com o mesmo teor de umidade, atribuindo isso às reações químicas da mistura composta por RAP e Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) estabilizada com 1% de cal hidratada. Também, estas mesmas amostras testadas no ensaio de MR foram submetidas ao ensaio de RT, onde se verificou o aumento da resistência com o aumento do tempo de cura. O ganho de resistência do material também foi observado em campo com medidas de deflexões feitas por meio do *Falling Weight Deflectometer* (FWD).

Cardone *et al*. (2014) investigaram duas condições de cura com temperaturas de 20ºC e 40ºC. O estudo avaliou uma CBTM estabilizada com 3% de emulsão e com dois teores de cimento (1% e 2%), com tempo de cura de 1, 3, 7, 14, 21 e 28 dias (após remover os corpos de prova dos moldes). Os resultados obtidos a partir do ensaio de módulo dinâmico mostraram que a rigidez aumenta com o aumento da frequência para cada tempo de cura, para ambas as temperaturas. Isto mostra um comportamento viscoelástico da CBTM, causado pelos dois ligantes presentes na mistura: o ligante residual da emulsão que desempenha papel importante na resposta viscoelástica e também ao ligante envelhecido do RAP. Foi também observada uma menor rigidez com 28 dias de cura elevando-se a temperatura de 20°C para 40°C, principalmente para a CBTM com 2% de cimento.

Os autores atribuíram essa diminuição da rigidez às características dos cristais formados durante a hidratação do cimento, descrevendo que elevadas temperaturas de cura eliminam parte da água que seria utilizada no processo de hidratação do cimento com a formação de cristais menos uniformes que causam o aumento da porosidade do cimento, prejudicando o potencial das propriedades mecânicas da mistura e que resulta em menores valores de rigidez. Outro ponto destacado pelos autores é o fato de o processo de cura afetar somente as

propriedades do ligante residual da emulsão, enquanto que a frequência do ensaio influencia ambos os ligantes (residual e envelhecido).

Kim *et al*. (2011) estudaram duas misturas recicladas, uma estabilizada com 2% de asfalto espumado e 4% de teor de umidade e outra estabilizada com 3% de emulsão asfáltica e 3% de teor de umidade, adotando duas temperaturas de cura (25ºC e 45ºC) e tempo de cura de 7 e 14 dias (seladas em molde plástico), após as amostras terem sido curadas ao ar por 0, 1, 3 e 5 horas (para o ensaio de RT) e também curadas ao ar por 5, 10, 20, 30 e 90 horas (para o ensaio de módulo dinâmico). Analisando os ensaios conduzidos, observou-se no ensaio de RT o aumento da resistência com a diminuição do teor de umidade ao longo do tempo de cura. Houve também o ganho de resistência de ambas as misturas conforme o tempo de cura inicial ao ar aumentou de 0 para 5 horas, com a CRM-espuma apresentando maiores valores de resistência, sendo atribuído à perda de umidade da mistura ser mais rápida que a CRM-emulsão.

Outro ensaio conduzido por Kim *et al*. (2011) foi o módulo dinâmico, realizado a uma frequência de carregamento de 10 Hz a temperatura de 21,1ºC. Os resultados foram similares aos obtidos no RT: as misturas recicladas apresentaram aumento da rigidez com o aumento do tempo de cura e diminuição do teor de umidade das misturas. A CRM-espuma apresentou maiores valores de rigidez que a CRM-emulsão em todos os tempos de cura.

2.5 DEFORMAÇÃO PERMANENTE DAS MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A FRIO: CAMPO E LABORATÓRIO

A deformação permanente está entre os principais defeitos encontrados nos pavimentos asfálticos, denominado também de afundamento, ou deformação plástica, sendo considerado um dos principais problemas das CRMs. Este defeito é caracterizado pelo acúmulo de deslocamentos não recuperáveis devido aos efeitos das solicitações de cargas repetidas, podendo ocorrer devido à falha na camada de revestimento, ou nas camadas subjacentes ao revestimento (WIRTGEN, 2012; LIMA, 2016).

Diversos são os fatores que influenciam o desempenho das CRMs frente à deformação permanente, podendo ser citados: a origem e as propriedades dos agregados, a composição volumétrica do material, o clima da região onde será

utilizado, o tipo de ligante asfáltico e emulsão, o teor e dispersão do ligante asfáltico, a utilização de fíler, o teor de umidade, o processo de cura, etc. (JENKINS & COLLINGS, 2016).

Como forma de reduzir os efeitos desses fatores no desempenho à deformação permanente e aumentar a resistência das misturas recicladas frente a esta ocorrência pode-se: ajustar a distribuição granulométrica para melhorar o ângulo de atrito; aprimorar o processo de compactação para um aumento da densificação do material; cuidar do processo de cura e limitar o teor de emulsão asfáltica ou asfalto espumado (geralmente no máximo 3%), visto que porcentagens maiores podem ter efeito lubrificante na mistura diminuindo o ângulo de atrito e podem levar o material à ruptura por cisalhamento e, consequentemente, à deformação permanente (KHOSRAVIFAR, 2012; WIRTGEN, 2012).

A avaliação e a previsão da deformação permanente podem ser feitas no campo e no laboratório. Gonzalez (2009) acredita que a resposta do pavimento obtida em campo seja uma fonte mais confiável e realista para análise da deformação permanente de CRM. Para tanto, o autor cita que existem dois modos de se obter esta resposta em campo: por monitoramento de rodovias em serviço e com simuladores de tráfego denominados *Accelerated Pavement Test* (APT). Estes modos de análise são utilizados em estudos de pavimentos que possuem camadas de CRM como uma ferramenta para desenvolvimento de modelos empíricos e mecânicos para o projeto de camadas de CRM (GONZALEZ, 2009).

Uma das formas de monitoramento de rodovias para avaliação no campo do defeito é realizado por levantamento da condição da superfície do pavimento, executando uma avaliação objetiva conforme procedimento da norma PRO 006/2003 (DNIT, 2003) com auxílio de uma treliça metálica, para medida do Afundamento em Trilha de Roda (ATR). A medida do ATR pode ser feita de forma contínua utilizando um perfilômetro a laser instalado em um veículo, tendo maior produtividade por ser um processo automatizado. O perfilômetro é utilizado em trechos de rodovias mais longos e não necessitam do fechamento da faixa em análise, dando maior produtividade ao serviço, e a treliça é utilizada em trechos curtos (em torno de 1.000 m) com a necessidade de fechamento da faixa analisada para maior segurança na execução do serviço.

Na literatura é possível encontrar diferentes procedimentos para o estudo da deformação permanente em laboratório, baseados no tipo de comportamento esperado para a mistura reciclada. Estudos empregam ensaios triaxiais de cargas repetidas para obtenção de modelos de previsão de deformação permanente, e alguns adotam a Teoria do *Shakedown* para análise do comportamento do material. Este método de ensaio é utilizado para CRMs com comportamento similar ao de um material granular, com aplicação de frequências geralmente em torno de 1Hz a 5Hz e número de ciclos variando de 10.000 a 1.000.000, pode ainda ser realizado com carregamento multiestágio (JENKINS, 2000; MOHAMMAD *et al*., 2006; GONZALEZ, 2009).

Para os casos em que a CRM tem comportamento similar ao de um CA, são adotados ensaios desenvolvidos para estudo de deformação de misturas asfálticas, sendo um desses o ensaio de *Flow Number* (FN), conduzido sem confinamento e com aplicação de 10.000 ciclos e frequência de 1Hz (KIM *et al*., 2011; KIM e LEE, 2012). Os diferentes procedimentos adotados para os casos em que se considera o comportamento da CRM similar ao de um material granular ou CA, mostram que a deformação permanente dos materiais reciclados a frio sofre influência do estado de tensão, da tensão vertical (quando não há confinamento), da temperatura de ensaio e do procedimento de cura adotado, que altera a forma que ocorre cura do material.

2.5.1 Flow Number

O *Flow Number* (FN) é definido como o número de ciclos de carga até o início da zona terciária (cisalhamento com volume constante), correspondente à taxa mínima da mudança da deformação axial permanente (WITCZAK, 2007; NASCIMENTO, 2008). O ensaio de FN foi desenvolvido para identificar as características de deformação permanente de misturas asfálticas e pode ser adotado também para as CRMs, sendo o material submetido a um carregamento cíclico, sem confinamento e a deformação permanente acumulada obtida em função do número de ciclos (KIM et al., 2009).

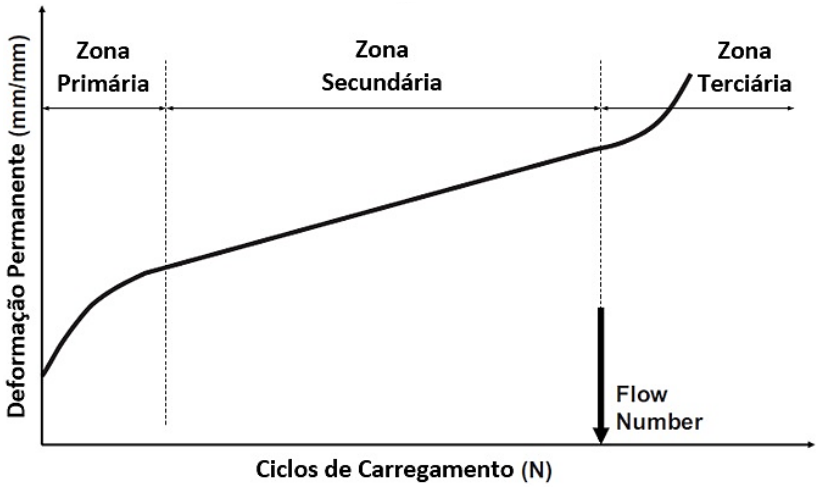
De acordo com Witczak *et al*. (2002), o ensaio é realizado a uma temperatura específica e com aplicação de um pulso *haversine* axial compressivo de carga repetida com duração de 0,1 s e com um período de repouso de 0,9 s de duração, até atingir 10.000 ciclos de carga, ou até a falha da amostra resultando em 5% de

deformação, o que ocorrer primeiro, utilizando amostras confeccionadas com 100 mm de diâmetro e 150 mm de altura. O ensaio tem duração máxima de 3 horas (10.000 ciclos) e o número total de ciclos e o tempo de duração do ensaio são dependentes da temperatura e dos níveis de tensão aplicados (WITCZAK, 2002; NASCIMENTO, 2008).

Segundo a norma ABNT NBR 16505 (2016) para avaliação da deformação permanente de misturas asfálticas, para realização do ensaio de FN são confeccionadas amostras com 100 mm de diâmetro e 150 mm de altura, com aplicação de um pulso *haversine* axial compressivo de carga repetida até a observação da falha quando ocorre a ruptura do corpo de prova, ou quando os 7.200 ciclos de carregamento são atingidos. Com isso, o ensaio pode ter duração máxima de 2 horas, aproximadamente, referente ao número total de ciclos (7.200 ciclos).

Os resultados do ensaio de FN são normalmente apresentados num gráfico de deformação permanente acumulada *versus* número de ciclos. A deformação permanente acumulada é dividida em três zona: (i) na primeira, ocorre uma consolidação inicial da mistura à medida que esta é carregada; (ii) na segunda, a taxa de deformação permanente se mantém constante; e (iii) na terceira, a taxa de deformação permanente aumenta rapidamente, como mostrado na Figura 9, onde estão ilustradas as três zonas de comportamento ao longo do ensaio (KIM *et al*., 2009).

Figura 9 - Gráfico do FN - deformação permanente acumulada *versus* ciclos de carga



Fonte: Adaptado de Kim *et al*. (2009)

O FN está relacionado ao ciclo de carga onde a taxa de deformação é mínima atingindo a zona terciária (ruptura do corpo de prova) sofrendo cisalhamento a um

volume constante (WITCZAK, 2007; NASCIMENTO, 2008). Após a realização do ensaio, os dados de deformação e número de ciclos são ajustados a um modelo matemático para calcular o ciclo no qual a zona terciária inicia, indicando o FN. Para isso tem-se utilizado o modelo de Francken, que foi determinado em estudo realizado por Biligiri *et al*. (2007), após estudar diversos modelos de deformação permanente, como o modelo que melhor representa o FN e tem sido recomendado por ser o mais adequado para descrever as três zonas de deformação permanente. O modelo de Francken é representado pela seguinte equação:

$$\varepsilon_p = AN^B + C\,(e^{DN} - 1)$$

Onde:

ε_p (N) = deformação axial permanente (%);

N = número de ciclos, e

A, B, C e D = coeficientes de regressão.

Seguindo as especificações básicas do ensaio, como as dimensões do corpo de prova, o número de ciclos de carga e forma do pulso de carregamento, a Tabela 3 apresenta os parâmetros aplicados nos estudos realizados por Kim *et al.* (2009), Kim e Lee (2012) para ensaio de *Flow Number* adaptado às misturas recicladas a frio.

Tabela 3 - Parâmetros adotados no ensaio de FN

Flow Number					
Autores	**Material**	**Frequência (Hz)**	**Tensão (kPa)**	**Temp. (ºC)**	**Nº de ciclos**
Kim *et al.* (2009)	RAP estabilizado com asfalto espumado	1	138	40	10.000
Kim e Lee (2012)	RAP estabilizado com emulsão asfáltica	1	70 e 140	40	10.000

No estudo realizado por Kim *et al*. (2009) foram analisadas misturas recicladas com RAP de sete diferentes fontes, estabilizadas com 1, 2 e 3% de asfalto espumado e 4% de teor de umidade, adotando o procedimento de cura acelerada a temperatura de 40ºC por 3 dias, e após o tempo de cura as amostras foram expostas ao ar por 24 horas antes do ensaio. Analisando os ensaios conduzidos, observou-se que quanto menor o teor de asfalto espumado utilizado,

maior o número de ciclos para atingir o FN. Os autores concluíram que o ensaio de FN é consistente na avaliação do potencial de deformação permanente de misturas recicladas.

Kim e Lee (2012) analisaram misturas recicladas com RAP de duas diferentes fontes, estabilizadas com 0,5, 1 e 1,5% de dois tipos de emulsão asfáltica (uma catiônica e uma modificada por polímero) e 3% de teor de umidade. A cura foi realizada a temperatura de 40ºC (cura acelerada) por 3 dias. Após o tempo de cura, as amostras foram expostas ao ar por 24 horas antes do ensaio. Observou-se neste estudo que as misturas atingiram o FN em um número menor de ciclos à medida que o teor de emulsão aumentou de 0,5 a 1,5%. A partir dos resultados do ensaio de FN, os autores classificaram as amostras em termos de deformação, da menor para a maior, foi notado que a classificação não se alterou quando considerado o aumento do teor de emulsão (0,5 a 1,5%), com as amostras estabilizadas com emulsão asfáltica catiônica apresentando menores deformações. Assim, Kim e Lee (2012) concluíram que o ensaio de FN é consistente para a avaliação do potencial de susceptibilidade a deformação permanente quanto ao tipo de emulsão asfáltica e composição do RAP.

3 AVALIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A FRIO

3.1 TRECHO EXPERIMENTAL

Oito segmentos experimentais foram construídos em uma parceria entre o Laboratório de Tecnologia de Pavimentação (LTP) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) e a Concessionária Autopista Fernão Dias - Arteris com o apoio da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) por meio dos Recursos de Desenvolvimento Tecnológico (RDT). Os segmentos foram construídos ao longo da BR-381, rodovia de tráfego pesado com duas faixas em cada pista, localizados na pista sul entre os quilômetros 948 e 949 no sentido Belo Horizonte - São Paulo no município de Extrema, estado de Minas Gerais. O trecho experimental tem uma extensão total de 800 m divididos em oito segmentos de 100 m cada, apresentados neste trabalho os dados referentes aos quatro segmentos construídos com camada de base composta por CRMs. Maiores detalhes sobre a execução do trecho experimental, materiais, processos utilizados e a composição e solicitação do tráfego podem ser vistos em Andrade (2017), Kuchiishi (2019) e Bosso (2018). A Figura 10 mostra a localização do trecho experimental analisado e a Figura 11 apresenta uma vista geral após a construção.

Figura 10 - Localização do trecho experimental analisado

Fonte: Google (2019)

Figura 11 - Vista do trecho experimental na BR-381

Fonte: O autor (2019)

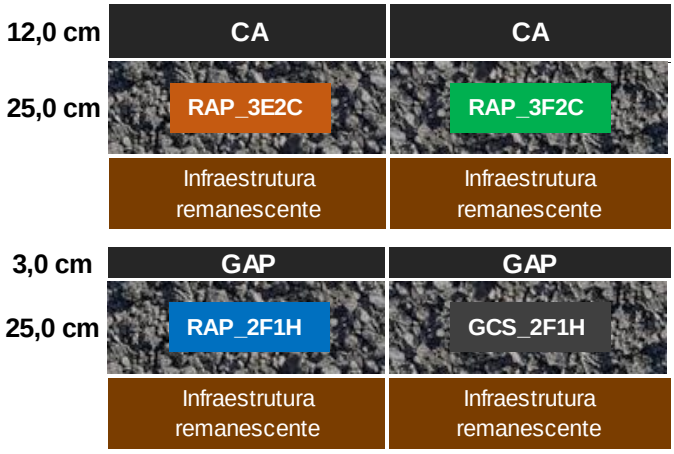
3.1.1 Estruturas dos quatro segmentos experimentais analisados

As estruturas do pavimento dos segmentos experimentais são compostas por camadas de revestimento com 12,0 cm de CA, em dois segmentos, e 3,0 cm de mistura asfáltica descontínua (*Gap-graded*) em outros dois, e camada de base de 25,0 cm de espessura sobre a estrutura remanescente após fresagem dos trechos, conforme ilustrado na Figura 12. Na Tabela 4 são apresentadas as nomenclaturas adotadas para os materiais reciclados das camadas de base. A definição completa da composição de cada mistura está disponível no item 3.2 deste trabalho, detalhando a nomenclatura utilizada.

Tabela 4 - Nomenclatura adotada para as quatro misturas recicladas

Sigla	Teor Emulsão / Asfalto Espumado	Teor Cimento *Portland* / Cal Hidratada	Nomenclatura
RAP_3E2C	3%	2%	RAP com 3% de Emulsão Asfáltica e 2% de Cimento *Portland*
RAP_3F2C	3%	2%	RAP com 3% de Asfalto Espumado e 2% de Cimento *Portland*
RAP_2F1H	2%	1%	RAP com 2% de Asfalto Espumado e 1% de Cal Hidratada
GCS_2F1H	2%	1%	Agregado virgem com 2% de Asfalto Espumado e 1% de Cal Hidratada

Figura 12 - Configuração das estruturas dos segmentos do trecho experimental analisado



Fonte: O autor (2019)

3.1.2 Simulação utilizando o software 3D-Move Analysis

As estruturas de pavimentos sofrem carregamentos tridimensionais dinâmicos oriundos do tráfego durante toda sua vida de serviço. Assim, como resultado da interação existente entre os eixos do veículo e o pavimento, a resposta é variável com a espessura do pavimento analisado, o tipo e a quantidade de eixos do veículo, a velocidade do veículo ao trafegar e as propriedades dos materiais que compõem as camadas do pavimento (ZAFIR *et al*., 1994).

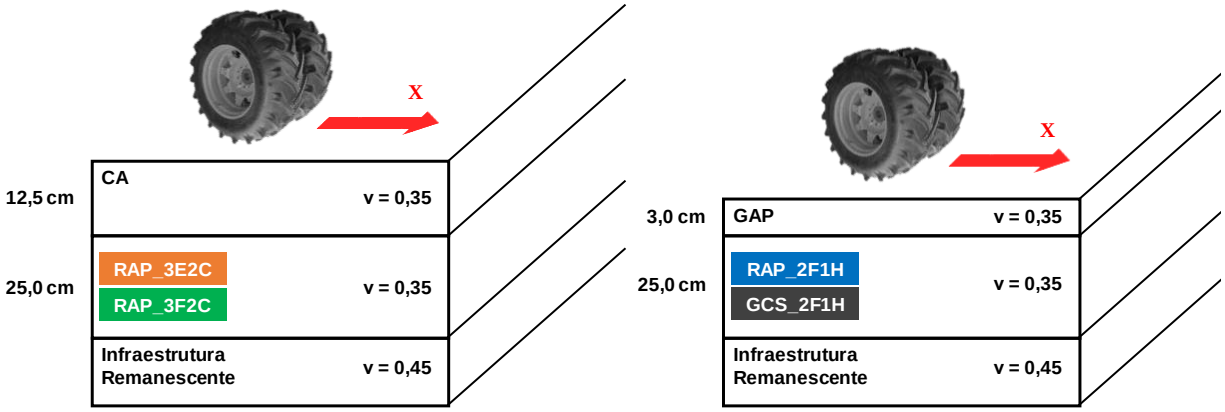
O *software 3D-Move Analysis*, desenvolvido pela Universidade de Nevada, é um modelo mecanicista de camada finita baseado em continuidade que é utilizado para analisar de forma mais realista a resposta do pavimento, levando em consideração as condições de carga de tráfego em movimento e fatores importantes como a velocidade do veículo, a área de contato entre pneu-pavimento, a temperatura e as propriedades viscoelásticas dos materiais asfálticos (SIDDHARTHAN *et al*. 1998, 2002, 2005; HAJJ *et al*. 2010, 2012; ULLOA *et al*. 2013).

O *3D-Move* caracteriza qualquer camada de pavimento como material elástico, ou viscoelástico. Desta forma, o pavimento é analisado como uma estrutura constituída por camadas horizontais (com extensão infinita lateralmente), sendo cada uma das camadas definidas por um conjunto uniforme de propriedades (SIDDHARTHAN *et al*. 1998, 2002, 2005; HAJJ *et al*. 2010, 2012; ULLOA *et al*. 2013).

Foram realizadas as simulações dos quatro segmentos com o programa de análise *3D-Move* (versão 2.1), mantidas as configurações de cada camada semelhantes às seções de pavimento do estudo. A Figura 13 ilustra a configuração proposta para os segmentos, bem como os parâmetros de entrada adotados na simulação, coeficiente de Poisson (para as análises elásticas) e espessura, e um esboço do eixo simples com rodas duplas em movimento.

A configuração da distribuição de tensão de contato na interface pneu-pavimento foi adotada como uma área de contato circular, com raio de 0,107 m, carregada com uma pressão de contato uniforme igual à pressão do pneu de 560 kPa. A configuração de contato circular na interface pneu-pavimento para a distribuição de tensão é uma das mais adotadas por pesquisadores e agências de transportes (HAJJ *et al*., 2012).

Figura 13 - Configuração da estrutura simulada no *3D-Move*



Fonte: O autor (2019)

Para os quatros segmentos foram adotadas as velocidades de 40, 50, 75, 80, 100 e 120 km/h nas simulações, com configurações do semieixo com cargas de 8, 10 e 14 tf, uniformemente distribuídas. A carga de 14 tf foi adotada para representar o excesso de carga relatado no estudo realizado por Bosso (2018) que por meio de monitoramento contínuo do tráfego ao longo de 17 meses do trecho experimental, em estudo no presente trabalho, verificou que 23,7% dos veículos comerciais trafegaram com carga acima dos limites legais permitidos. Cabe ressaltar que para todas as simulações realizadas, o raio da área de pressão de contato pneu-pavimento e a pressão dos pneus se mantiveram iguais para as três cargas adotadas.

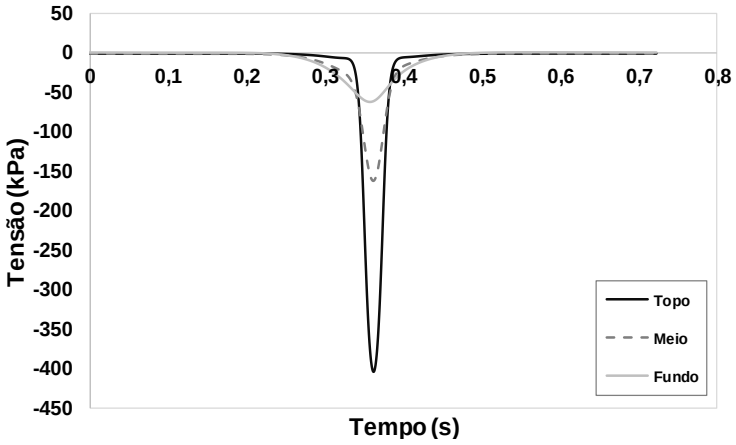
A partir de dados de levantamento de campo, obtidos por meio de medidas com a utilização de sensores de temperatura instalados nas camadas de pavimento, foram utilizadas duas condições de temperaturas como tentativa de simular o efeito da temperatura no comportamento dos materiais reciclados e, consequentemente, na resposta da estrutura do pavimento. Nos segmentos com revestimento em CA (RAP_3E2C e RAP_3F2C) foram adotadas temperaturas de 50°C e 40°C para as camadas de revestimento e base, respectivamente. Já para os segmentos com revestimento em *Gap-graded* (RAP_2F1H e GCS_2F1H), foram utilizadas temperaturas de 55°C para a camada de revestimento e 50°C para a camada de base.

Ainda como informações necessárias para as simulações, foram utilizados como dados de entrada as propriedades viscoelásticas dos materiais aplicados nos revestimentos (CA e *Gap-graded*) e camadas de base (Kuchiishi *et al*, 2019). O dado de entrada para simulação da estrutura remanescente (Figura 13) foi o obtido por meio da realização do ensaio de *Light Weight Deflectometer* (LWD) no valor médio de 118 MPa.

3.1.3 Análise das respostas do pavimento no 3D-Move

Para o propósito deste trabalho, somente os dados de tensão vertical obtidos das simulações serão apresentados, apesar das respostas de deslocamento, deformação e tensão em qualquer ponto serem calculadas pelo *3D-Move*. O programa foi usado para obter a tensão vertical para os quatro segmentos experimentais de CRMs e definição das condições de ensaios de *Flow Number* adotados no método C. As respostas das tensões verticais para carga de 14 tf calculadas logo abaixo da linha central do pneu externo movendo-se a uma velocidade de 40 km/h, para a estrutura composta de RAP estabilizado com emulsão asfáltica (RAP_3E2C), são mostradas na Figura 14 em diferentes profundidades de análise.

Figura 14 - Resposta da tensão vertical a 40 km/h

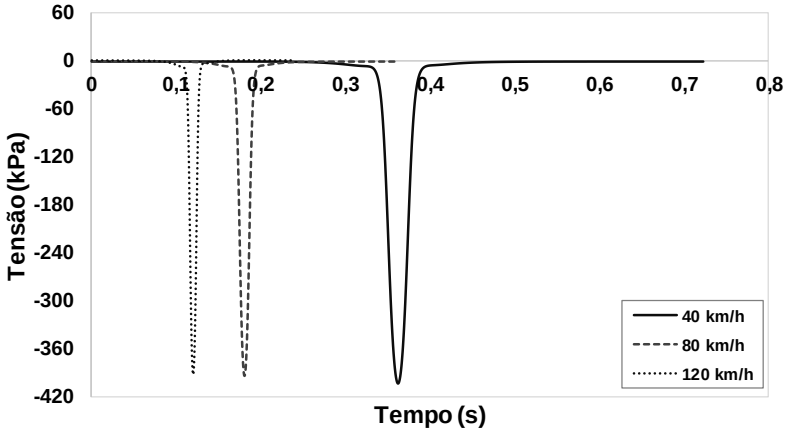


Fonte: O autor (2019)

Observando a Figura 14, verifica-se que a tensão vertical máxima foi de 403,61 kPa no topo da camada de base. Comparando esse valor com a tensão registrada no meio da camada verifica-se que a tensão foi aproximadamente 60% menor que a tensão máxima, e quando comparado com a tensão no fundo da camada verifica-se que o valor da tensão foi 85% menor que a máxima registrada.

Realizou-se também a análise sobre a influência causada pela velocidade do veículo na camada de base para carga de 14 tf, apresentada na Figura 15, mostrando a variação a partir de três velocidades com uma pequena redução dos valores de tensão com o aumento da velocidade. No caso exposto, a redução da tensão foi de 5% quando a velocidade do veículo aumentou de 40 km/h para 120 km/h, sendo a redução da tensão vertical de 403,61 kPa para 392,24 kPa.

Figura 15 - Influência da velocidade do veículo na tensão vertical

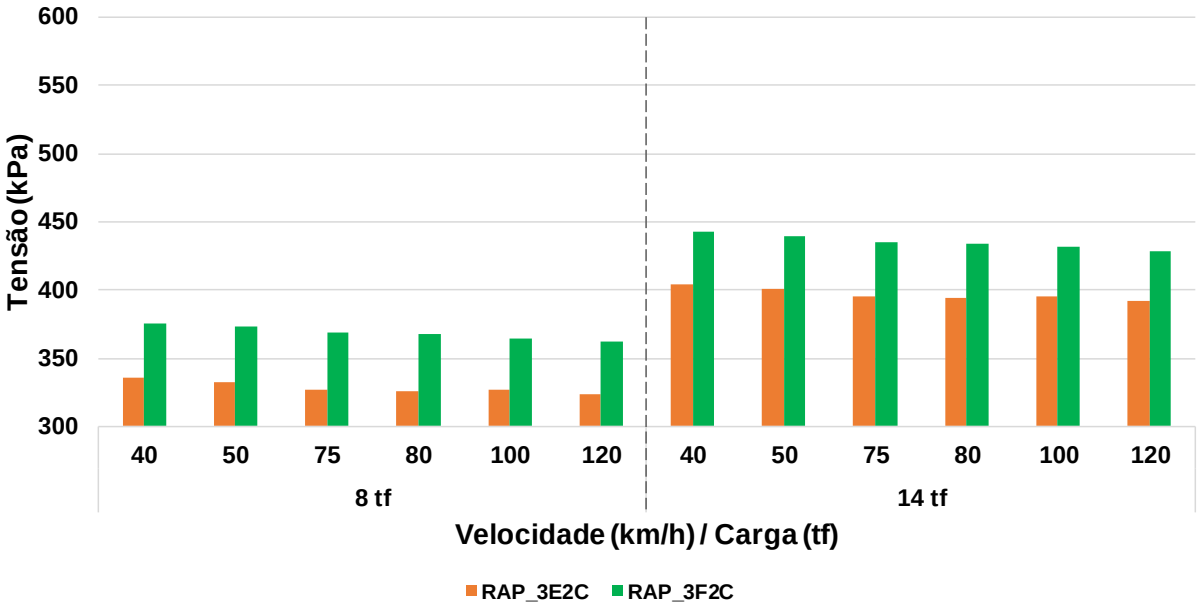


Fonte: O autor (2019)

Foi feita a comparação da resposta da tensão vertical nas diferentes estruturas para analisar a influência causada pela carga aplicada no comportamento

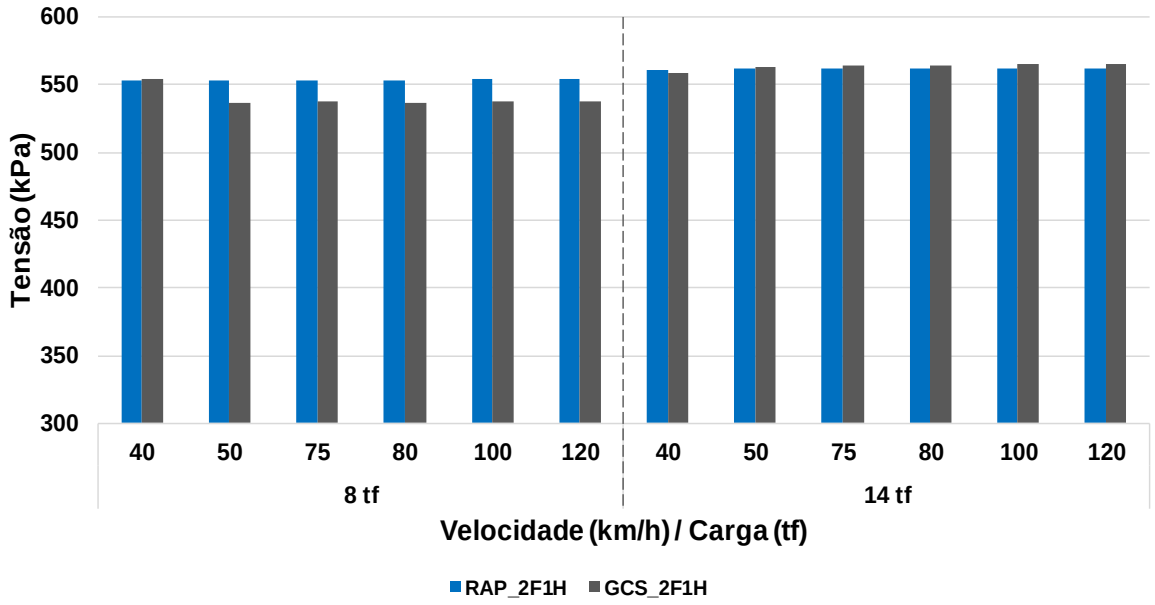
das CRMs das camadas de base do pavimento. As temperaturas utilizadas nas simulações foram de 50°C para o revestimento e 40°C para as camadas de base nos segmentos com revestimento em CA (RAP_3E2C e RAP_3F2C), e de 55°C para o revestimento e 50°C para as camadas de base nos segmentos com revestimento em *Gap-graded* (RAP_2F1H e GCS_2F1H). As Figuras 16(a) e 16(b) apresentam as tensões verticais obtidas no topo da camada de base com a variação da velocidade do veículo para as quatro misturas. A mistura RAP_3E2C teve o mesmo comportamento apresentado pela mistura RAP_3F2C, assim como a mistura GCS_2F1H apresentou o mesmo comportamento da mistura RAP_2F1H, devido à semelhança na espessura e no tipo de revestimento.

Figura 16 (a) - Influência da carga na tensão vertical registrada no topo da camada de CRM



Fonte: O autor (2019)

Figura 16 (b) - Influência da carga na tensão vertical registrada no topo da camada de CRM



Fonte: O autor (2019)

A partir das Figuras 16 (a e b), é possível observar que os valores de tensões verticais se apresentaram significativamente maiores para os segmentos com RAP_2F1H e GCS_2F1H que possuem a camada de revestimento menos espessa (3,0 cm). A diferença da carga aplicada de 8 tf para 14 tf apresenta uma diferença de 1,5% (para velocidade de 40 km/h). Ainda nestes mesmos segmentos, verifica-se um pequeno aumento da tensão vertical com o aumento da velocidade para a estrutura com RAP_2F1H, com diferenças de aproximadamente 0,3% e 0,2% para as cargas de 8 tf e 14 tf, respectivamente. Os valores de tensão vertical para os eixos sobrecarregados (14 tf) demonstram que a ocorrência de trincas por fadiga na camada de revestimento pode ser acelerada a depender das condições de temperatura.

Entretanto, tais fatos não foram observados para os dois segmentos (RAP_3E2C e RAP_3F2C) com camada de revestimento mais espessa (12,0 cm), onde ocorreu a redução da tensão vertical com o aumento da velocidade para ambas as cargas, pois a estrutura do pavimento seria menos solicitada com aplicação de carga a uma velocidade maior. Quando avaliada a diferença da carga aplicada de 8 tf para 14 tf o valor da tensão apresentou um significativo aumento de 15% (para velocidade de 40 km/h), devido o maior tempo de solicitação da carga na estrutura do pavimento. Os valores de tensões foram menores (aproximadamente 24%) quando comparados com os segmentos com camada de revestimento de *Gap-*

graded, sendo a tensão reduzida de 562,4 kPa para 428,7 kPa para uma velocidade de 40 km/h e carga de 14 tf., isso mostra que o revestimento de *Gap-graded* não possui função estrutural, diferente do CA que contribui mecanicamente na estrutura.

3.1.4 Afundamento de Trilha de Roda (ATR)

Uma vez que as quatro misturas estudadas nesse trabalho se encontram aplicadas em um trecho experimental, apresenta-se a seguir os dados de Afundamento de Trilha de Roda (ATR) que é parte do monitoramento dessa rodovia. O levantamento de campo serviu como base para avaliar a deformação permanente medida conforme o procedimento da norma PRO 006/2003 (DNIT, 2003) para determinar o valor, em milímetros, do ATR. O levantamento foi realizado pela equipe técnica do LTP-EPUSP com a utilização de uma treliça metálica de dimensões padronizadas (Figura 17), estaca por estaca, nas trilhas de roda interna e externa em toda a extensão dos quatro segmentos experimentais de CRM.

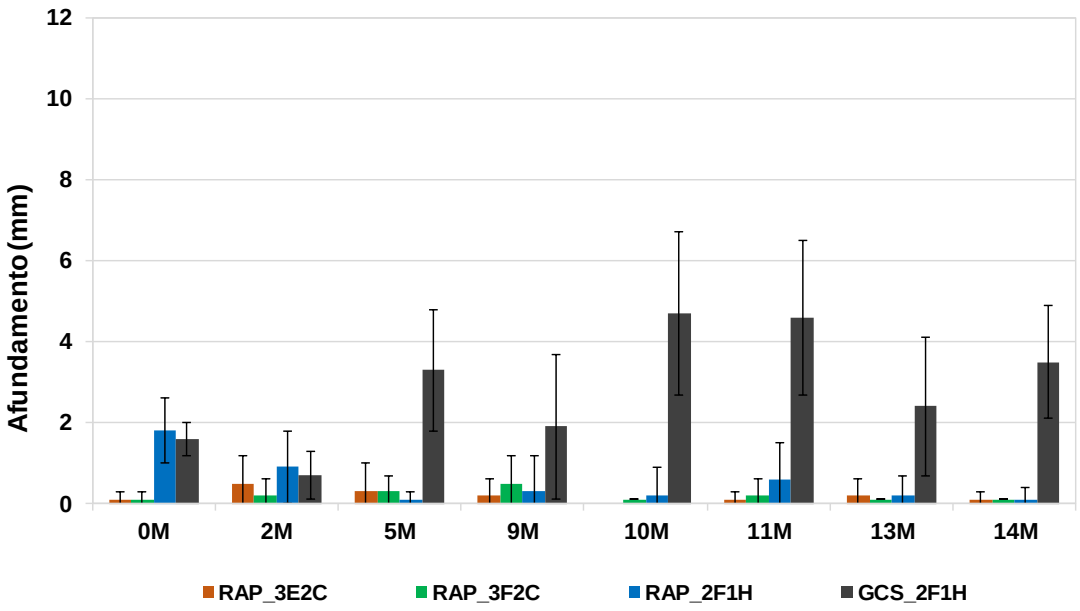
Figura 17 - Treliça metálica utilizada no levantamento de ATR

Fonte: O autor (2019)

Os resultados dos levantamentos são apresentados na Figura 18, onde é possível observar a variação do ATR médio dos quatro segmentos medidos em um período de 14 meses de monitoramento para os quatro segmentos, os valores de deformação permanente foram assumidos provenientes das camadas de base de CRMs. Verifica-se que os valores médios de ATR das CRMs, com exceção do segmento com a mistura GCS_2F1H, foram baixos sem qualquer indício de

tendência de evolução do valor de ATR, apresentando valores médios de ATR de no máximo 0,5 mm. O segmento com a mistura GCS_2F1H, apresentou valores de aproximadamente 5,0 mm, mas com uma estabilização dos valores médios de ATR sem um constante incremento de ATR a partir do quinto mês.

Figura 18 - Resultados do ATR em função dos períodos do levantamento de campo



Fonte: O autor (2019)

O processo de cura para a mistura GCS_2F1H foi mais lento que o das outras misturas para ser notado, conforme observado na Figura 18. O processo de cura dessa mistura foi semelhante ao de um BSM, que pode levar entre 6 e 18 meses para completar seu processo de cura (EBELS, 2008), ou até mesmo 22 meses para atingir uma umidade estável e para que se observe o aumento da capacidade estrutural dessa camada, conforme observado por Guatimosim (2015).

Comparando os valores de ATR com o limite estabelecido de 12,0 mm pelo Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2005), os segmentos de misturas recicladas a frio apresentaram valores de ATR inferiores ao limite estabelecido pelo DNIT. Pode-se atribuir os baixos valores de ATR ao processo de cura da camada reciclada, propiciando o aumento da resistência à deformação permanente das CRMs.

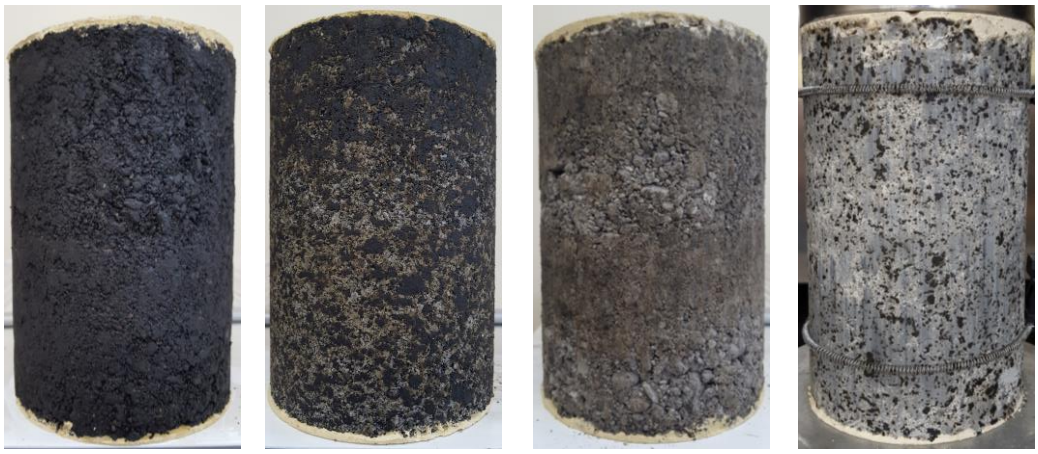
3.2 MATERIAIS

O RAP usado nas misturas foi obtido a partir da fresagem do trecho experimental na Rodovia Fernão Dias (BR-381) em Minas Gerais (para os

segmentos de CA no revestimento), e da fresagem na Rodovia Ayrton Senna (SP-070) em São Paulo (para os segmentos de *Gap-graded* no revestimento) e a coleta dos materiais utilizados foi feita durante a fase de construção. Os materiais das misturas que contém cimento *Portland* foram coletados separadamente (RAP, ligante e cimento) para evitar a hidratação do cimento que prejudicaria os processos de mistura e compactação no laboratório. Para as misturas que contém cal hidratada foi feita a coleta das misturas já estabilizadas (pilha de estocagem) e ensacadas para evitar perda excessiva de umidade, tendo em vista que a cal hidratada não sofre hidratação e, assim, não prejudicaria os processos de mistura e compactação no laboratório.

As quatro CRMs das camadas de base foram estabilizadas com dois diferentes processos (uso de emulsão asfáltica e de asfalto espumado), recebendo as seguintes nomenclaturas para simplificar a identificação: (i) RAP_3E2C; (ii) RAP_3F2C; (iii) RAP_2F1H; (iv) GCS_2F1H. Na Figura 19 são mostrados cada uma das quatro misturas já compactadas: (a) RAP_3E2C; (b) RAP_3F2C; (c) RAP_2F1H; (d) GCS_2F1H.

Figura 19 - Ilustração das quatro misturas de CRMs



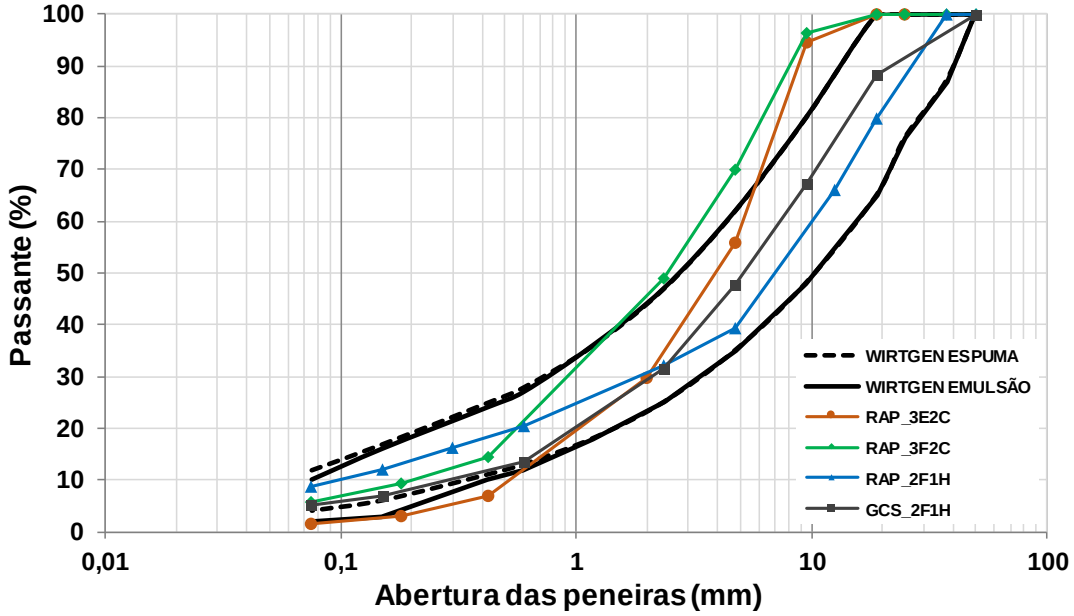
(a) (b) (c) (d)

Fonte: O autor (2019)

A Figura 20 mostra que a faixa granulométrica de duas misturas (RAP_3E2C e RAP_3F2C) não atendem aos requisitos de classificação especificados pela Wirtgen (WIRTGEN, 2012), por terem sido compostas obedecendo uma faixa granulométrica adotada pela concessionária responsável pelo trecho na BR-381. A granulometria das CRMs (Figura 20) não foi a mesma para os quatro tipos, pois nem

todas são compostas totalmente por RAP, por conta da baixa disponibilidade da fração fina do RAP utilizado para composição das misturas, sendo algumas misturas compostas com uma certa porção de agregado virgem.

Figura 20 - Granulometria das quatro misturas recicladas a frio



Fonte: O autor (2019)

A amostra RAP_3E2C foi preparada com 98% de RAP e 2% de cimento *Portland* por massa de agregado seco para enquadrar a fração fina na faixa de controle. Foi adotada uma emulsão asfáltica do tipo catiônica modificada por polímero de ruptura lenta com teor de 3% de emulsão asfáltica por massa de agregado seco (62,2% de resíduo asfáltico), e 5,5% de umidade em massa de agregado seco. As características da emulsão asfáltica utilizada possibilitaram a trabalhabilidade e a estabilidade da mistura reciclada.

A amostra RAP_3F2C foi preparada com uma mistura de agregados de 68% de RAP, 30% de pó de pedra (agregado virgem), 2% de cimento *Portland* e 5,25% de umidade por massa de agregado seco. A adição do pó de pedra é importante para garantir a melhor dispersão do asfalto espumado que ocorre exclusivamente nas partículas finas, aumentando assim a coesão da mistura. O asfalto espumado utilizado no processo foi produzido a partir de um ligante com grau de penetração 85/100, sendo adotado teor de 3% de ligante por massa de agregado seco.

A amostra RAP_2F1H foi fabricada com uma mistura de 89% de RAP, 10% de pó de pedra (agregado virgem) e 1% de cal hidratada por massa de agregado seco. O ligante utilizado para fabricar o asfalto espumado possui um grau de penetração 50/70 com teor de 2,2% de ligante por massa de agregado seco. A mistura possui 7,8% de teor de umidade em massa de agregado seco para compactação. A amostra foi coletada na pilha de estocagem do canteiro de obras do trecho experimental.

A amostra GCS_2F1H foi produzida com 99% de agregado virgem e 1% de cal hidratada por massa de agregado seco. O asfalto espumado foi fabricado com o mesmo ligante adotado na mistura RAP_2F1H de grau de penetração 50/70 com teor de 2% de ligante por massa de agregado seco. A mistura possui 5,3% de teor de umidade em massa de agregado seco para compactação. A amostra foi coletada na pilha de estocagem do canteiro de obras do trecho experimental.

3.2.1 Compactação e processo de cura

Para produção das misturas RAP_3E2C e RAP_3F2C, o RAP coletado no trecho foi previamente seco em estufa a 40ºC durante um período de 24h e, em seguida, fracionado para confecção dos corpos de prova. Para a mistura RAP_3E2C, realizou-se a homogeneização do RAP com o cimento em uma bandeja, seguido da adição de água e emulsão asfáltica nas devidas proporções, revolvendo os materiais até se obter uma mistura homogênea.

Para a produção da mistura RAP_3F2C, o asfalto espumado foi produzido utilizando uma recicladora modelo WLB 10 S da marca Wirtgen. O ligante foi aquecido a 165ºC e foi necessário 2,6% de água em massa de ligante para produção da espuma. Para a mistura dos materiais (RAP, pó de pedra e cimento) foi utilizado um *pugmill* modelo WLM 30 da marca Wirtgen, com capacidade de produção de aproximadamente 25 kg, e adicionado os 3% de asfalto espumado e 6,5% de teor de umidade por massa de agregado. A Figura 21 mostra a recicladora WLB 10 S e o *pugmill* WLM 30 da marca Wirtgen utilizados na produção da mistura com asfalto espumado em laboratório.

Figura 21 - Recicladora WLB 10 S e *pugmill* WLM 30 da Wirtgen

Fonte: O autor (2019)

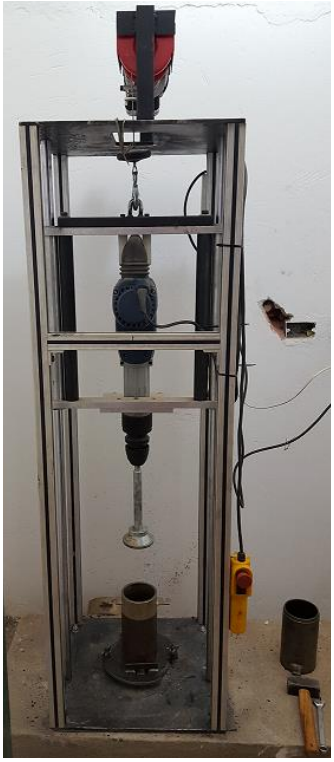
As misturas RAP_2F1H e GCS_2F1H foram coletadas já nas proporções de cada material e na sequência, foram homogeneizadas em uma bandeja, seguido da adição de água para correção do teor de umidade ótimo, revolvendo os materiais até se obter uma mistura homogênea.

As quatro CRMs foram compactadas para produção de corpos de prova com 100 mm de diâmetro e 150 mm de altura, pelo método de compactação vibratório. Foi utilizado um martelo vibratório modelo GSH 11 VC da marca Bosch, com potência de 1700 W e frequência entre 15 a 31,5 Hz, com uma sobrecarga de 5 kg. A compactação foi feita em duas camadas para alcançar a densidade específica máxima das amostras e atingir a altura final de 150 mm especificada pelo método de ensaio do FN. A Tabela 5 apresenta a densidade específica máxima das quatro CRMs obtidas a partir do projeto das misturas. Após compactadas, todas as amostras foram extraídas do molde metálico de compactação, pesadas e protegidas por tubos de PVC e sacos plásticos para evitar danos no CP e preservar a umidade de compactação. A Figura 22 apresenta o martelo vibratório utilizado na compactação das amostras de CRMs desta pesquisa.

Tabela 5 - Densidade específica máxima das quatro misturas recicladas

	RAP_3E2C	RAP_3F2C	RAP_2F1H	GCS_2F1H
Densidade específica máxima	2,006	2,060	1,914	2,168

Figura 22 - Martelo vibratório modelo GCH 11 VC da marca Bosch



Fonte: O autor (2019)

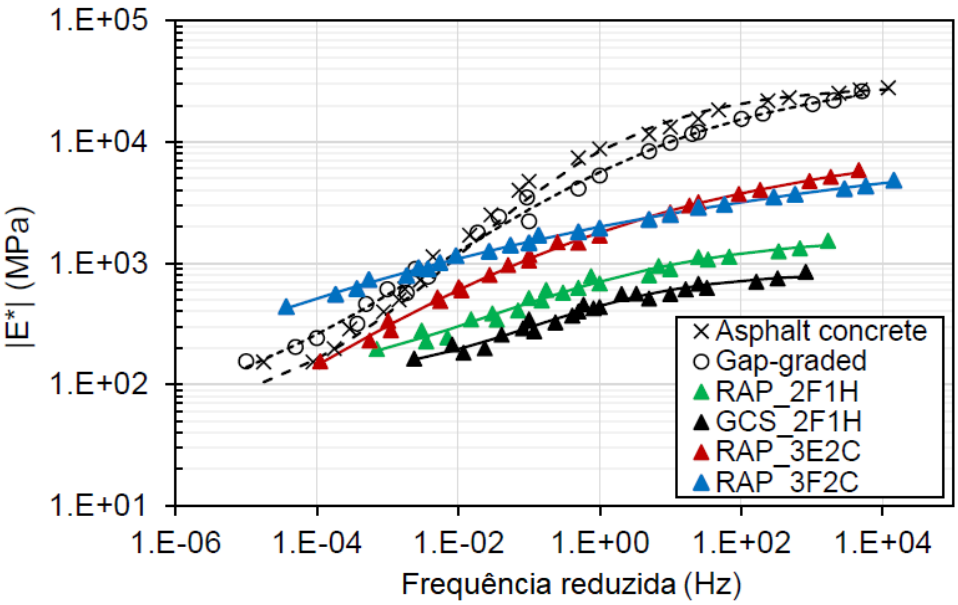
Foi adotado o processo de cura, onde as amostras ficam armazenadas numa estufa incubadora (BOD, do inglês *Biochemical Oxygen Demand*) à temperatura de 40ºC adotando o tempo de cura de 28 dias, para garantir a cura completa das amostras sem que houvesse influência do tempo de hidratação do cimento nos resultados dos ensaios. As amostras ensaiadas sem cura (tempo zero) não foram armazenadas na BOD para realização dos ensaios de FN na umidade de compactação.

3.2.2 Dados do ensaio de Módulo Dinâmico

As curvas mestras de módulo dinâmico para as amostras de concreto asfáltico e Gap-graded e para as quatro amostras de CRMs totalmente curadas, representada à temperatura de referência de 21,1ºC estão apresentadas na Figura

23, foram testadas duas réplicas de cada mistura. Os dados apresentados foram utilizados para realização das simulações utilizando o *software 3D-Move.* Maiores detalhes sobre os ensaios, condições adotadas e discussões dos resultados dos ensaios de módulo dinâmico podem ser vistos em Kuchiishi (2019).

Figura 23 - Curvas mestras do módulo dinâmico



Fonte: Kuchiishi (2019)

Kuchiishi (2019) descreve que as misturas (RAP_2F1H, GCS_2F1H, RAP_3F2C) estabilizadas com asfalto espumado apresentam comportamento viscoelástico similar, com dependência da frequência de carga e da temperatura, e que o fato do módulo da mistura RAP_3F2C apresentar-se maior, consideravelmente, quando comparado com as outras duas misturas seja devido a rigidez conferida pela adição dos 2% de cimento *Portland*. Já o resultado da mistura estabilizada com emulsão asfáltica (RAP_3E2C) mostra um declive mais íngreme da curva mestra e maiores valores de ângulo de fase, indicando uma dependência da variação de temperatura e frequência mais elevada quando compara com as outras três misturas estabilizadas com asfalto espumado, esse resultado sugere uma menor dependência da variação desses fatores paras as misturas com asfalto espumado.

A partir dos seus resultados, Kuchiishi (2019) afirma que a forma da dispersão do ligante asfáltico influencia significativamente as propriedades viscoelásticas dos CRMs. Verificou-se que a diferença entre o módulo das misturas RAP_3E2C e RAP_3F2C ocorre pelo fato o ligante asfáltico se torna mais fluído em frequências

reduzidas mais baixas (ou altas temperaturas), pois para a mistura RAP_3E2C apenas uma fina camada de ligante asfáltico cobre a superfície do agregado após o rompimento da emulsão, isso faz com que as propriedades mecânicas da amostra sejam comandadas pela graduação dos agregados de sua composição (98% de RAP) e a variação de temperatura e frequência tenham uma grande influência no comportamento mecânico desta mistura.

3.3 ENSAIOS DE *FLOW NUMBER*

Foram conduzidos 12 ensaios para cada CRM, utilizando três variações diferentes de ensaio, todos sem confinamento, para análise da deformação permanente das CRMs: (i) Norma ABNT NBR 16505 (2016), método A; (ii) adaptação para CRMs, de acordo com o proposto por Kim e Lee (2012), método B; e (iii) a partir das tensões obtidas pela análise estrutural com o *3D-Move* e adotando temperaturas medidas em campo, método C.

No método A, foram adotados os parâmetros constantes na norma ABNT NBR 16505 (2016) para avaliação da deformação permanente de misturas asfálticas. Assim, adotou-se uma aplicação de tensão axial de (204 ± 4) kPa com a temperatura de ensaio de (60,0 ± 0,5) °C. A utilização deste método teve como intuito a avaliação das CRMs nas mesmas condições de ensaio de misturas asfálticas a quente, sendo adotado para comparação com valores de FN encontrados para concreto asfáltico no estudo realizado por Nascimento (2008).

O método B foi conduzido conforme estudo de Kim e Lee (2012), com aplicação de tensão axial de 140 kPa e temperatura de ensaio de 40°C. Os autores adotaram tal nível de tensão com o objetivo de atingir a zona terciária em um número de ciclos que não ultrapassasse os 10.000 ciclos de carregamento.

No método C foram realizadas simulações utilizando o *software 3D-Move*, no intuito de definir a magnitude das tensões verticais, além das temperaturas registradas em cada uma das quatro CRMs em campo. Desta forma, os ensaios foram realizados com tensões verticais e temperaturas semelhantes às encontradas nas estruturas dos trechos experimentais.

3.3.1 Resultados e Discussões

São apresentados os resultados dos 48 ensaios realizados na prensa hidráulica universal *Material Test System* (MTS 810) de acordo com os três métodos de ensaio adotados, sendo um total de 12 ensaios para cada CRM. Para o método C, as tensões verticais (valores aproximados) adotadas a partir das simulações utilizando o programa de análise *3D-Move* e as temperaturas estão descritas na Tabela 6. Tal temperatura foi adotada para representar as utilizadas nas simulações, estando entre as temperaturas do método A (60ºC) e do método B (40ºC).

Tabela 6 - Parâmetros da simulação com o *3D-Move* adotados no ensaio de FN

Mistura	Frequência (Hz)	Tensão (kPa)	Temp. (ºC)
RAP_3E2C	1	400	50
RAP_3F2C	1	440	50
RAP_2F1H	1	550	50
GCS_2F1H	1	550	50

A média e o desvio padrão dos ensaios de FN realizados antes da cura e com 28 dias de cura são apresentados na Tabela 7, separados conforme o método utilizado. Os gráficos com a apresentação das curvas de deformação resultante dos ensaios de FN conforme as condições adotadas estão disponíveis no Apêndice A dessa dissertação. Para todas as amostras foram realizados dois ensaios para cada condição devido à quantidade de material disponível e disponibilidade de programação da prensa MTS para realização de uma quantidade maior de ensaios.

A partir dos dados apresentados na Tabela 7 são feitas algumas verificações quanto a influência dos resultados referentes ao tipo de CRM e sua composição granulométrica, a cura das amostras e o seu desempenho com base nos métodos de FN adotados, conforme abordado nos subitens a seguir.

Tabela 7 - Resultados dos ensaios de FN para os três métodos adotados

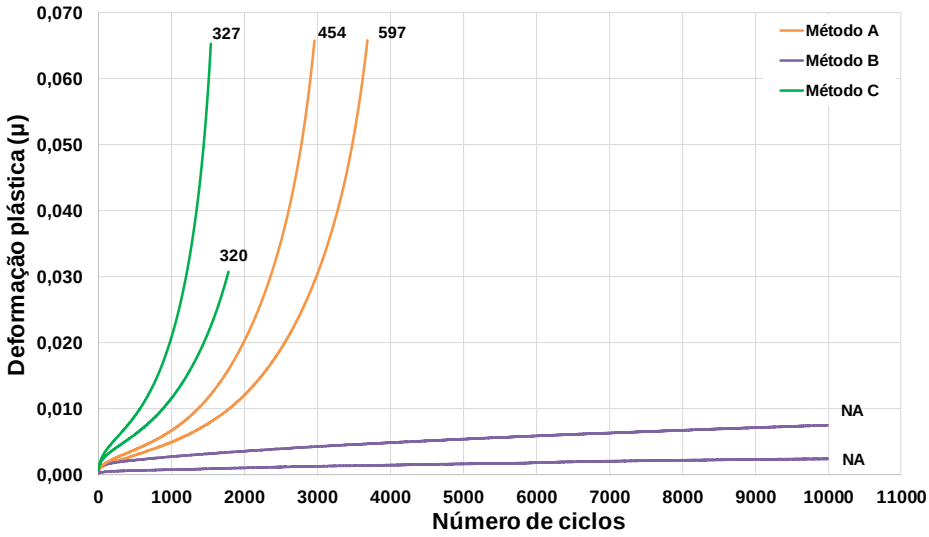
Método	Cura (dias)	Temp. ensaio (ºC)	FLOW NUMBER											
			RAP_3E2C	Média	Desvio Padrão	RAP_3F2C	Média	Desvio Padrão	RAP_2F1H	Média	Desvio Padrão	GCS_2F1H	Média	Desvio Padrão
A	0	60	-	197	-	4.471	4.193	394	1.065	1.166	143	No FN	No FN	-
			197			3.914			1.267			No FN		
	28		219	288	97	No FN	No FN	-	No FN	No FN	-	No FN	No FN	-
			356			No FN			No FN			No FN		
B	0	40	-	861	-	No FN	No FN	-	No FN	No FN	-	No FN	No FN	-
			861			No FN			No FN			No FN		
	28		No FN	No FN	-	No FN	No FN	-	No FN	No FN	-	No FN	No FN	-
			No FN			No FN			No FN			No FN		
C	0	50	-	63	-	277	255	31	-	13	-	318	328	14
			63			233			13			338		
	28		257	234	33	3.541	3.689	209	281	309	40	No FN	No FN	-
			211			3.836			337			No FN		

**No FN: Não ocorreu o Flow Number*

3.3.2 Influência da composição da mistura

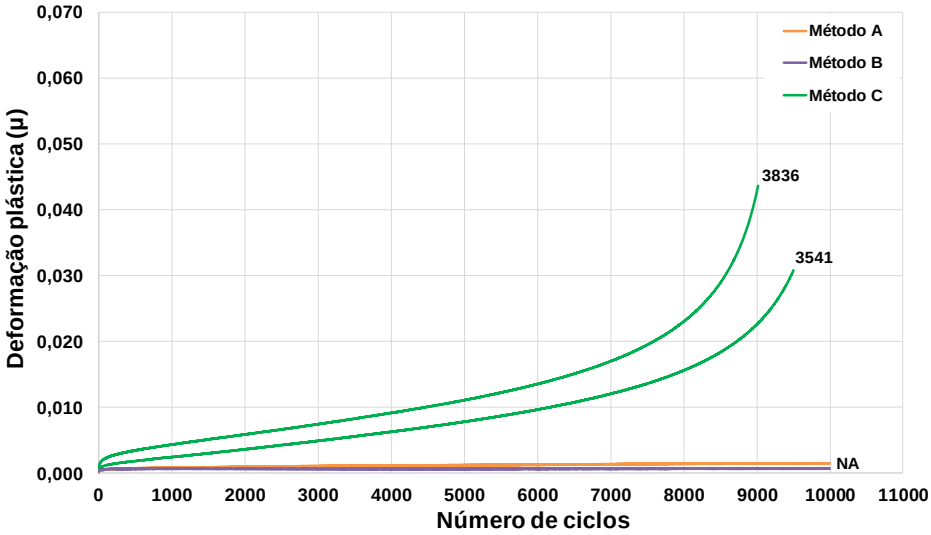
A Figura 24 apresenta as curvas dos ensaios de FN realizados com 28 dias de cura para os três métodos da mistura RAP_3E2C, e na Figura 25 são apresentadas as curvas dos resultados de 28 dias de cura para a mistura RAP_3F2C.

Figura 24 - Resultado do ensaio de FN: RAP_3E2C



Fonte: O autor (2019)

Figura 25 - Resultado do ensaio de FN: RAP_3F2C



Fonte: O autor (2019)

Comparando os resultados da mistura RAP_3E2C com a mistura RAP_3F2C para os ensaios realizados com 28 dias de cura para os três métodos, pode-se observar a influência da composição da mistura nos resultados obtidos em todas as condições. Quando se compara a média dos resultados para o método C, a mistura

RAP_3E2C teve ocorrência do FN em um número de ciclos 16 vezes menor do que a mistura RAP_3F2C, ocorrendo o FN com 234 ciclos enquanto que a mistura estabilizada com asfalto espumado atingiu o FN com 3.689 ciclos de carregamento. Também pode ser observado nos resultados para os métodos A e B, que a mistura RAP_3F2C (estabilizada com asfalto espumado) não apresentou a ocorrência de FN durante o ensaio, ao passo que o FN da mistura RAP_3E2C para o método A ocorreu no ciclo 288, não tendo ocorrido o FN no método B.

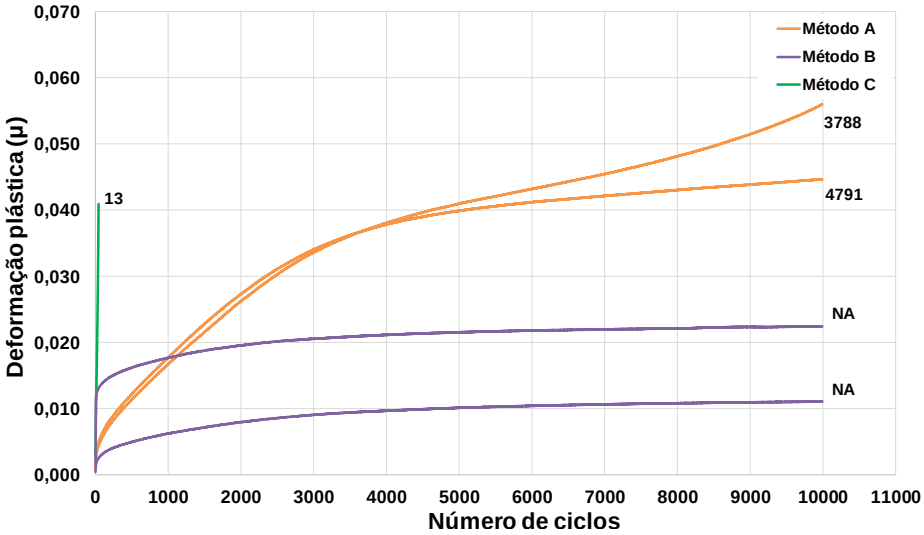
Apesar das duas CRMs possuírem 2% de cimento em sua composição, o estabilizante asfáltico e a composição granulométrica foram determinantes para essa grande diferença entre o comportamento das misturas apresentado nos ensaios. A mistura RAP_3F2C, que apresentou maior resistência, possui em sua composição 30% de agregado virgem (pó de pedra), além da forma como ocorre a dispersão do asfalto espumado também contribuir para uma melhora na resistência a deformação permanente da mistura.

Com base nos resultados apresentados para os três métodos de ensaio, pode-se afirmar que a mistura RAP_3E2C teve o comportamento mais próximo de um CA, sofrendo influência da temperatura e da tensão desvio aplicada nos três métodos adotados. A mistura apresentou maiores deformações, quando comparada com as outras três misturas em todos os métodos, identificadas pelos menores valores de FN. Entretanto, foi observado que para todas as amostras ensaiadas com cura de 28 dias, ocorreu o aumento do número de ciclos para se atingir o FN ou mesmo não ocorrer o FN até se atingir o número total de ciclos do ensaio (10.000 ciclos).

3.3.3 Influência da cura da mistura

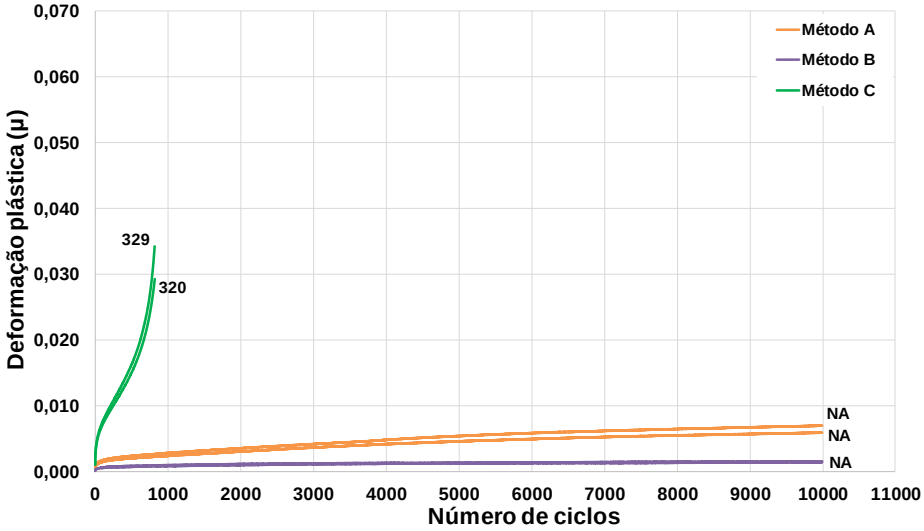
A Figura 26 apresenta as curvas dos ensaios de FN realizados sem cura para os três métodos da mistura RAP_2F1H, e a Figura 27 mostra as curvas dos ensaios de FN realizados com tempo de cura de 28 dias para a mesma mistura. Escolheu-se essa mistura, por ela ter apresentado um elevado ganho de resistência quanto a deformação permanente nos ensaios realizados com 28 dias de cura. Comparando os resultados, observa-se o ganho de resistência quanto à deformação permanente nos resultados obtidos em todas as três condições de ensaio.

Figura 26 - Resultado do ensaio de FN sem cura: RAP_2F1H



Fonte: O autor (2019)

Figura 27 - Resultado do ensaio de FN com 28 dias de cura: RAP_2F1H



Fonte: O autor (2019)

A mistura RAP_2F1H não apresentou a ocorrência de FN em nenhuma das duas condições de cura utilizadas no método B. Analisando os resultados obtidos no método A, verifica-se uma boa resistência da mistura no ensaio sem tempo de cura com ocorrência média do FN no ciclo 1.166. Após os 28 dias de cura não ocorreu o FN nas amostras ensaiadas, evidenciando a importância do processo de cura para este tipo de material.

Esse ganho de resistência com o tempo de cura da amostra também é verificado por meio dos resultados obtidos no método C, com as amostras ensaiadas com 28 dias de cura apresentando a ocorrência do FN em um número médio de

ciclos 24 vezes maior que as amostras ensaiadas sem tempo de cura. O FN ocorreu no ciclo 309, enquanto que para os ensaios sem tempo de cura a ocorrência do FN ocorreu no ciclo 13. Tal resultado foi influenciado pela umidade da amostra, por sua composição granulométrica favorecida pelo imbricamento dos agregados com a adição do pó de pedra e pela forma de dispersão do asfalto espumado que confere maior resistência, além de sua menor dependência da frequência de carga e temperatura observados nos resultados de módulo dinâmico realizados por Kuchiishi (2019). A Tabela 8 apresenta os valores médios de umidade das amostras de RAP_2F1H antes e após os ensaios, mostrando a diferença de umidade no momento dos ensaios nas duas condições de cura.

Tabela 8 - Umidade média das amostras de RAP_2F1H nas duas condições de cura

UMIDADE					
		RAP_2F1H			
Método	**Cura (dias)**	**Umidade de ensaio (%)**	**Desvio Padrão**	**Umidade pós-ensaio (%)**	**Desvio Padrão**
A	0	7,81	0,01	2,66	0,20
	28	0,57	0,12	0,10	0,14
B	0	7,79	0,01	3,15	1,81
	28	0,49	0,12	0,13	0,11
C	0	7,78	0,03	-	-
	28	0,55	0,06	-	-

Fonte: O autor (2019)

O aumento da resistência à deformação permanente das amostras de RAP_2F1H ocorreu à medida que a umidade das amostras foi reduzida durante o processo de cura, reduzindo em aproximadamente 93% o teor de umidade aos 28 dias de cura quando comparado com o teor da umidade de compactação de 7,80%, teor das amostras na realização dos ensaios sem tempo de cura.

3.3.4 Influência das condições de ensaio

Os dados apresentados na Tabela 7 mostram que todas as misturas atingiram o FN nas condições da simulação do *3D-Move* nos ensaios realizados sem cura e também após a cura de 28 dias, com exceção da mistura GCS_2F1H. A utilização

deste método demonstrou que os CPs sofreram maior influência da tensão vertical, com os CPs atingindo o FN em número de ciclos menores quando comparados com os outros dois métodos.

O método proposto por Kim e Lee (2012), contribui para verificar a maior dependência da temperatura e frequência de carga da mistura estabilizada com emulsão asfáltica (RAP_3E2C) dentre todas as misturas recicladas a frio neste trabalho. Como se observa na Tabela 7, em alguns casos o FN não foi atingido, principalmente quando o ensaio foi realizado com aplicação de tensão axial de 140 kPa e temperatura de ensaio de 40°C, conforme método B. Com exceção do ensaio realizado sem cura da mistura RAP_3E2C, todas as outras misturas não sofreram uma influência considerável da tensão vertical e da temperatura proposta pelo método, não atingindo o FN com o ensaio realizado até que se atingisse os 10.000 ciclos de carregamento. Em comparação com os resultados apresentados por Kim e Lee (2012), as CRMs estudadas possuem resistência à deformação permanente superior às misturas estudas pelos autores citados, que chegaram a valores de FN para a CRM estabilizada com 1,5% de emulsão da ordem de 261 a 981 ciclos, sendo os menores valores atribuídos às amostras com cal hidratada e os maiores às amostras com cimento *Portland*, com todas as amostras apresentando incremento constante de deformação desde o início do ensaio.

O método A baseado na norma ABNT NBR 16505 (2016), possibilitou a observação da influência causada pelo aumento da temperatura (60ºC), com as amostras atingindo o FN antes do término do ensaio, apesar da tensão ser relativamente baixa quando comparada com as tensões adotadas a partir das simulações, indicando que a temperatura de 60ºC é uma temperatura crítica para as condições de carregamento das misturas. Comparando os resultados com os obtidos pelo método C, destaca-se o efeito da cura, denotando o ganho de resistência à deformação permanente de todas as misturas ensaiadas. Como forma de comparação com valores de misturas asfálticas, a Tabela 9 apresenta os valores limites de FN recomendados por Nascimento (2008) para diferentes níveis de tráfego, propostos para CA aplicados em camada de revestimento de pavimentos asfálticos.

Tabela 9 - Valores recomendados para FN de CA

Tráfego	Valores Recomendados
Médio ($3 \times 10^6 \leq N < 1 \times 10^7$)	> 300
Pesado ($1 \times 10^7 \leq N < 3 \times 10^7$)	> 750

Fonte: Nascimento (2008)

Comparando os resultados do método A com os valores recomendados, pode-se afirmar: (i) a mistura RAP_3E2C em nenhuma das condições de cura estaria dentro dos valores recomendados, podendo se considerar o valor de 28 dias de cura próximo do recomendado para o nível de tráfego médio; (ii) todas as outras CRMs apresentaram valores mais do que 35% superiores que o valor recomendado para o nível de tráfego pesado. Cabe, no entanto, mencionar que as condições de tensão e temperatura tem uma tendência de serem mais críticas no revestimento, comparado à camada de base.

Pode-se afirmar, que a resposta mecânica da mistura GCS_2F1H é pouco afetada pela temperatura por conta do agregado virgem presente em sua composição, tornando a mistura mais rígida nas condições de temperatura do ensaio. Na Figura 28 são mostrados exemplos dos CPs das misturas: (a) RAP_3E2C; (b) RAP_3F2C; (c) RAP_2F1H; (d) GCS_2F1H após o ensaio ilustrando os dados apresentados na Tabela 7 que atingiram o FN.

Figura 28 - Amostras de CRMs após o ensaio de FN

(a) (b) (c) (d)

Fonte: O autor (2019)

3.4 ANÁLISE COMPLEMENTAR DA MISTURA RAP_3E2C

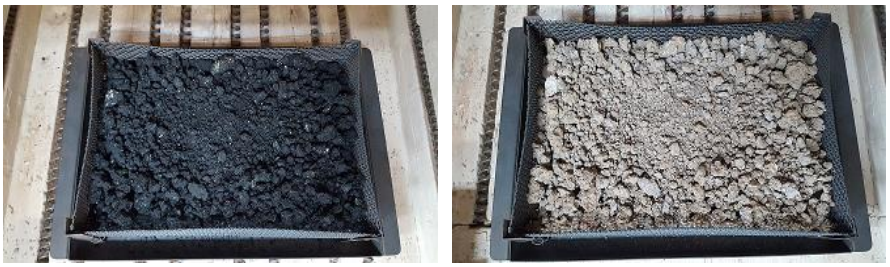
A mistura RAP_3E2C foi a que apresentou maiores deformações no ensaio de FN, quando comparada com as outras três misturas em todos os métodos. Assim, optou-se por realizar uma análise complementar para identificar alguns fatores que poderiam ter contribuído para os resultados do ensaio de FN.

A análise foi realizada para investigação do comportamento apresentado pelas amostras da mistura RAP_3E2C, identificando as possíveis causas da ocorrência do FN e maior susceptibilidade da mistura à deformação permanente. Para tanto, foi feita a verificação do teor de ligante asfáltico pelo método da ignição, como uma forma de avaliar qual a influência da quantidade de ligante nos resultados e a composição granulométrica da mistura, para analisar a estrutura das partículas de RAP dos corpos de prova da mistura que possui 98% de RAP em sua composição.

3.4.1 Método de ignição

Este método usado para a determinação quantitativa do teor de asfalto em CA, realizado conforme preconizado na norma ASTM D6307 (2010), foi utilizado para auxiliar no estudo de avaliação da amostra RAP_3E2C. Todos os CPs submetidos ao ensaio de FN foram utilizados na realização deste ensaio, sendo aquecidos num forno de ignição (Mufla) a uma temperatura de 540°C por um período de 4 horas. O propósito de utilização do método foi a obtenção dos agregados que compõe a mistura para verificação da granulometria posterior à compactação e ao ensaio de FN. O aspecto das amostras utilizadas é mostrado na Figura 29, onde é possível verificar que todo o asfalto contido na amostra foi evaporado após a ignição em mufla.

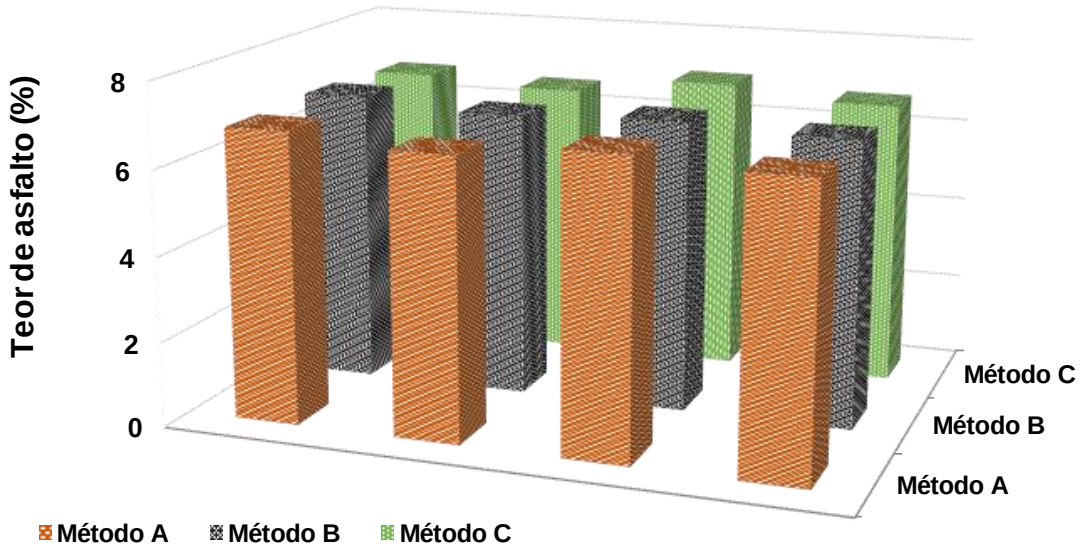
Figura 29 - Exemplo de amostra antes e após ignição na mufla a 540ºC



Fonte: O autor (2019)

Os resultados são apresentados na Figura 30, com os valores quantitativos do teor de asfalto (emulsão asfáltica + ligante asfáltico proveniente do RAP) da mistura RAP_3E2C. O teor de asfalto médio encontrado foi de 6,8%, com a emulsão tendo 1,8% de resíduo de ligante asfáltico, isto resulta em 5,0% de ligante asfáltico proveniente do RAP, valor tipicamente adotado para CA utilizados no Brasil.

Figura 30 - Resultado quantitativo do teor de asfalto



Fonte: O autor (2019)

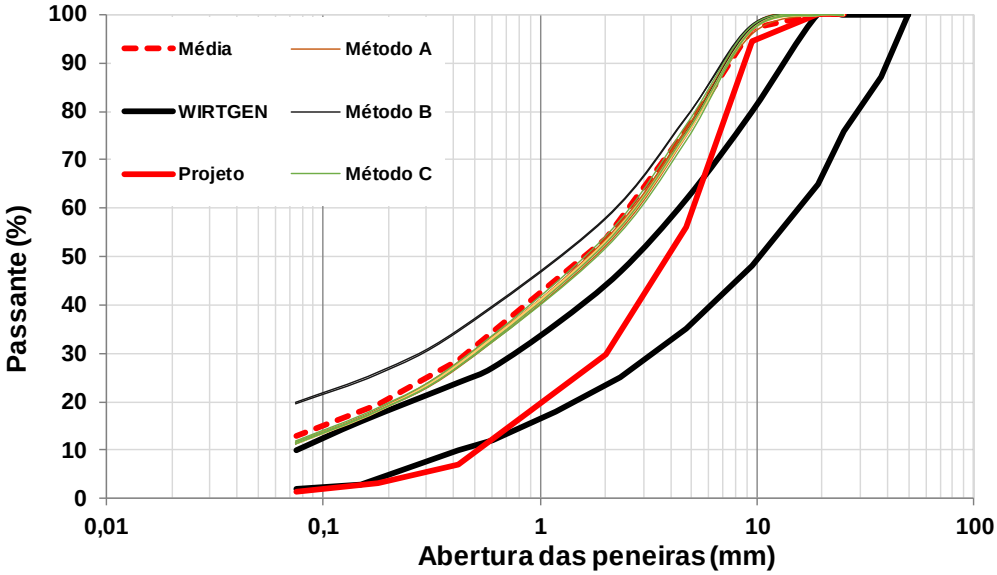
3.4.2 Análise granulométrica

A análise granulométrica por peneiramento foi realizada de acordo com a norma ABNT NBR NM 248:2003. A amostra de RAP_3E2C foi avaliada por peneiramento a seco, após os agregados serem lavados nas peneiras de 2 mm e 0,075 mm e após terem secados em estufa.

Foram realizados 12 ensaios da mistura RAP_3E2C, sendo observado que a mistura se tornou mais fina que a faixa adotada para o projeto, deixando claro que a maior parte dos agregados de RAP utilizados na composição dos CPs eram compostos por agregados menores envoltos por uma massa de ligante asfáltico com material fino, ou ainda compostos por grumos de RAP. A Figura 31 mostra o gráfico com os resultados dos 12 ensaios de determinação da análise granulométrica por peneiramento da mistura RAP_3E2C, onde é possível observar que dois CPs ensaiados pelo método B apresentaram uma granulometria mais fina que os demais. A Figura 31 também mostra a curva média dos 12 ensaios, a curva da granulometria

de projeto e a faixa da Wirtgen para misturas recicladas a frio estabilizadas com emulsão asfáltica.

Figura 31 - Resultado do ensaio de análise granulométrica dos CPs da mistura RAP_3E2C



Fonte: O autor (2019)

Pode-se ainda destacar a maior quantidade de material fino passante na peneira de abertura 0,075 mm, aumentando a porcentagem que era de 1,4% no projeto para 12,8%. Também foi verificado o valor médio de massa de material passante na peneira de abertura 0,075 mm que corresponde à aproximadamente 277,0 g, valor correspondente à massa de material passante na peneira de abertura 0,075 mm após a lavagem e durante o peneiramento. As frações obtidas após a lavagem do material e utilizadas no ensaio de análise granulométrica são mostradas na Figura 32.

Figura 32 - Frações da mistura RAP_3E2C após lavagem

Fonte: O autor (2019)

Com base nos resultados da análise feita para a mistura RAP_3E2C, destaca-se a influência da estrutura da partícula de RAP utilizada na mistura frente aos resultados obtidos para o ensaio de FN: a presença de grumos ou materiais finos em torno de agregados menores, além da contribuição do maior teor de ligante asfáltico, verificado pelo ensaio de extração por ignição. Tais fatores contribuíram para que a mistura apresentasse comportamento inferior à deformação permanente quando comparada com as outras misturas estudadas neste trabalho.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A reciclagem a frio dos pavimentos propicia o emprego de soluções práticas e a utilização de materiais que contribuem para o bom desempenho da estrutura do pavimento. Entretanto, as CRMs possuem inúmeras variáveis que afetam seu comportamento frente a um dos principais defeitos desse tipo de mistura, que é a deformação permanente, tornando-se importante abranger o conhecimento deste mecanismo de falha para as CRMs.

A metodologia utilizada no estudo mostrou-se adequada no que se refere à análise da deformação permanente de CRMs com a utilização de três métodos para o ensaio de FN, cada um com uma condição de tensão e temperatura. A análise dos dados mostrou o ganho resistência das misturas recicladas aos 28 dias de cura frente ao defeito de deformação permanente. Baseado na avaliação dos resultados apresentados, pode-se apresentar as seguintes conclusões:

A simulação com o programa *3D-Move* mostrou-se uma ferramenta útil de análise para auxiliar na obtenção das tensões verticais por meio dos dados das misturas aplicadas em campo e dados das estruturas de pavimento estudadas. As análises possibilitaram a obtenção de valores de tensões verticais, levando em consideração os carregamentos dinâmicos em diferentes velocidades de tráfego. A partir das simulações foi possível observar a influência da velocidade e do carregamento sofridas pelas misturas, corroborando os resultados para a proposição de um ensaio de FN utilizando os dados de tensões resultantes das simulações.

Os métodos utilizados nos ensaios de FN evidenciaram o comportamento complexo das quatro CRMs desse estudo, que tem sua resposta quanto à deformação influenciada pela tensão vertical, temperatura, frequência de solicitação, umidade, composição granulométrica e pela cura do material. Observou-se a ampla faixa de rigidez dos materiais, que denota a importância da compatibilização entre os projetos de mistura e estrutural, além da necessidade do desenvolvimento de procedimentos adequados para execução desses projetos.

A cura apresentou-se como fator preponderante para todas as misturas estudadas, proporcionando uma maior resistência à deformação permanente em todas as condições adotadas para o ensaio de FN. As misturas sofreram influência

tanto da temperatura quanto da tensão durante os ensaios, com os resultados dos ensaios realizados pelo método C, a partir de dados obtidos na simulação com *o 3D-Move*, evidenciando a influência da tensão vertical aplicada.

Os resultados observados para a mistura RAP_3E2C (única avaliada com emulsão asfáltica) foram consistentes com os resultados observados por Kuchiishi (2019) ao estudar a rigidez desses materiais, e apontaram uma significativa dependência da temperatura e também da tensão vertical, muito provavelmente sofrida pela forma de dispersão do ligante asfáltico e do teor encontrado pelo método de extração por ignição em mufla. Em altas temperaturas, o ligante asfáltico se torna mais fluído e as propriedades mecânicas da amostra são comandadas pelos agregados em sua composição, no caso, 98% de RAP. A porcentagem de RAP na mistura contribui também para sua maior susceptibilidade à deformação permanente devido à estrutura mais frágil de uma parcela dos agregados mais graúdos de RAP por serem compostos de uma massa de finos com ligante asfáltico em torno de agregados menores, ou por se apresentarem na forma de grumos de RAP, como mostrou o resultado da análise granulométrica da mistura.

As misturas (RAP_2F1H, GCS_2F1H, RAP_3F2C) estabilizadas com asfalto espumado apresentaram menor dependência da variação da temperatura e da tensão vertical quando comparadas a mistura RAP_3E2C, e maior resistência à deformação permanente nas condições ensaiadas, pois em altas temperaturas o ligante asfáltico das misturas torna-se mais fluido e faz com que as respostas mecânicas dessas misturas sejam dominadas pela composição granulométrica. Considerando os agregados virgens e a utilização de fíler ativo, as misturas se mostraram mais resistentes à deformação permanente, especialmente em ensaios realizados nas amostras após os 28 dias de cura, criando um esqueleto pétreo mais resistente.

Esta pesquisa mostrou que há viabilidade no uso do ensaio de FN para avaliação da deformação permanente de misturas asfálticas recicladas a frio, podendo assim contribuir com o processo de avaliação adequado deste defeito e que pode servir como uma boa ferramenta nos estudos para implantação deste tipo de mistura em obras de restauração de pavimentos.

Com base nos resultados desta pesquisa e nas condições de ensaios apresentadas para o método C no ensaio de FN, recomenda-se a adoção de uma aplicação de tensão vertical de 400 kPa com a temperatura de ensaio de 50ºC. Também se recomenda como valor limite de FN para um nível de tráfego pesado (condição próxima das seções do trecho experimental deste estudo) um FN de 800.

Como sugestões para trabalhos futuros, destacamos:

- Monitorar ao longo do tempo a variação da temperatura na estrutura das misturas recicladas a frio aplicadas em campo e no laboratório, utilizando sensores para conhecimento do gradiente de temperatura e a influência dessa variação no comportamento da mistura;

- Realizar ensaios triaxiais de varredura de tensões sob pressão confinante constante com diferentes tempos de cura;

- Analisar a influência da utilização do tipo de ligante hidráulico (cal hidratada ou cimento *Portland*) e sua porcentagem, no desempenho das misturas recicladas a frio quanto à deformação permanente.

5 REFERÊNCIAS

3D-Move Analysis, Version 2.1. [*Computer software*]. Reno, NV.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). *NM 248 - Agregados - Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro.

____. (2016). *NBR 16505 - Misturas asfálticas - Resistência à deformação permanente utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida*. Rio de Janeiro.

ANDRADE, L. R. (2017). *Comparação do comportamento de pavimentos asfálticos com camadas de base granular, tratada com cimento e com estabilizantes asfálticos para tráfego muito pesado*. São Paulo: Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

ARRA. Asphalt Reclaiming and Recycling Association. (2001). *Basic Asphalt Recycling Manual*.

ARRA. Asphalt Reclaiming and Recycling Association. (2017). *Cold recycling using foamed (expanded) asphalt recycling agent*. Glen Ellyn: Annapolis: ARRA, 10 p.

Asphalt Academy. (2009). *Technical Guideline: Bitumen Stabilized Materials, A Guideline for Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilized Materials*. Pretoria, África do Sul.

ASTM. American Society for Testing and Materials. (2010). *D 6307 - Standard Test Method for Asphalt Content of Hot-Mix Asphalt by Ignition Method*.

BESSA, I. S., ALMEIDA, L. R., VASCONCELOS, K. L., BERNUCCI, L. L. B. (2016). *Design of cold recycled mixes with asphalt emulsion and Portland cement*. Canadian Journal of Civil Engineering. NRC Research Press.

BILIGIRI, K. P., KALOUSH, K. E., MAMLOUK, M. S., WITCZAK, M. W. (2007). *Rational Modeling of Tertiary Flow for Asphalt Mixtures*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, nº 2001. Washington, DC.

BONFIM, V. (1999). *Estudo da granulometria resultante da fresagem de revestimentos asfálticos com vistas à reciclagem "in situ" a frio*. São Paulo: Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

BOSSO, M. (2018). *Uso da tecnologia Weigh-in-Motion para a caracterização do tráfego rodoviário e do excesso de carga em veículos comerciais*. São Paulo: Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

CARDONE, F., GRILLI, A., BOCCI, M., GRAZIANI, A. (2014). *Curing and temperature sensitivity of cement-bitumen treated materials*. International Journal of Pavement Engineering. Taylor & Francis.

CNT. Confederação Nacional do Transporte. (2017). *Pesquisa CNT de Rodovias 2017: Relatório Gerencial*. Brasília: CNT: SEST: SENAT.

DER. Departamento de Estradas de Rodagem. (2006). *DER ET-DE-P00/033 - Reciclagem in situ a frio com espuma de asfalto - Especificação Técnica*. São Paulo.

____.(2005)*DER/PRES-P 32/05-Pavimentação: Reciclagem de pavimento a frio "in situ" com espuma de asfalto - Especificação de Serviços Rodoviários*. Paraná.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2005). *Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos.* 2 ed. Rio de Janeiro.

____.*DNIT 006/2003 - PRO. Avaliação Objetiva da Superfície de Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos - Procedimento*. Rio de Janeiro.

____.*DNIT 166/2013 - ES. Pavimentação - Reciclagem de pavimento a frio "in situ" com adição de espuma de asfalto-Especificação de serviço*. Rio de Janeiro.

____.*DNIT 169/2014 - ES. Pavimentação - Reciclagem de pavimento em usina com espuma de asfalto-Especificação de serviço*. Rio de Janeiro.

EBELS, L. J. (2008). *Characterisation of material properties and behavior of cold bituminous mixtures for road pavements*. Stellenbosch: Tese (Doutorado) - Stellenbosch University.

FU, P., JONES, D., HARVEY, J. T., HALLES, F. (2009). *Investigation of the Curing Mechanism of Foamed Asphalt Mixes Based on Micromechanics Principles*. Journal of Materials in Civil Engineering, 22 (1), pp. 29-38.

GODENZONI, C., GRAZIANI, A., PERRATON, D. (2016). *Complex modulus characterisation of cold-recycled mixtures with foamed bitumen and different contents of reclaimed asphalt*. Road Materials and Pavement Design. Taylor & Francis.

GODENZONI, C., GRAZIANI, A., BOCCI, E., BOCCI, M. (2017). *The evolution of the mechanical behavior of cold recycled mixtures stabilized with cement and bitumen: field and laboratory study*. Road Materials and Pavement Design. Taylor & Francis.

GONZALEZ, A. (2009). *An Experimental Study of the Deformational and Performance Characteristics of Foamed Bitumen Stabilised Pavements*. Nova Zelândia: Tese (Doutorado) - Universidade de Canterbury

GOOGLE (2019). Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/@-22.8754088,-46.3679396,17z >, acessado 16 de janeiro, 2019

GUATIMOSIM, F. V. (2015). *Mechanical Behaviour and Structural Performance of Recycled Foamed Bitumen Stabilized Materials*. São Paulo: Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

GUATIMOSIM, F. V., VASCONCELOS, K. L., BERNUCCI, L. L. B., JENKINS, K. J. (2018). *Laboratory and field evaluation of cold recycling mixture with foamed asphalt*. Road Materials and Pavement Design. Taylor & Francis. v. 19, n. 2, p. 385–399.

GRILLI, A., GRAZIANI, A., BOCCI, M. (2012). *Compactability and thermal sensitivity of cement-bitumen-treated materials*. Road Materials and Pavement Design. Taylor & Francis.

HAJJ, E. Y., ULLOA, A., SIDDHARTHAN, R., SEBAALY, P. E. (2010). *Estimation of Stress Conditions for the Flow Number Simple Performance Test*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, nº 2181. Washington, DC.

HAJJ, E. Y., THUSHANTHAN, P., SEBAALY, P. E., SIDDHARTHAN, R. (2012). *Influence of Tire-Pavement Stress Distribution, Shape, and Braking on Performance Predictions for Asphalt Pavement*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, nº 2306. Washington, DC.

JENKINS, K. J. (2000). *Mix Design Considerations for Cold and Half-Warm Bituminous Mixes with Emphasis of Foamed Bitumen*. South Africa, Stellenbosch: Tese (Doutorado) - Stellenbosch University.

JENKINS, K. J., LONG, F. M., EBELS, L. J. (2007). *Foamed bitumen mixes = shear performance?*. International Journal of Pavement Engineering. Taylor & Francis.

JENKINS, K. J., COLLINGS, D. C. (2016). *Mix design of bitumen stabilised materials South Africa and abroad*. Road Materials and Pavement Design. Taylor & Francis.

KIM, Y., LEE, H., HEITZMAN, M. (2009). *Dynamic modulus and repeated load tests of cold in-place recycling mixtures using foamed asphalt*. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 21, nº 6. ASCE.

KIM, Y., IM, S., LEE, H. (2011). *Impacts of curing time and moisture content on engineering properties of cold in-place recycling mixtures using foamed or emulsified asphalt*. Journal of Materials in CivilEngineering, Vol. 23, nº5. ASCE.

KIM, Y., LEE, H. (2012). *Performance Evaluation of Cold In-place Recycling Mixtures Using Emulsified Asphalt Based on Dynamic Modulus, Flow Number, Flow Time, and Raveling Loss*. Journal of Civil Engineering. KSCE. Springer.

KUNA, K. K. (2015). *Mix Design Considerations and Performance Characteristics of Foamed Bitumen Mixtures (FBMs)*. Nottingham: Tese (Doutorado) - Universidade de Nottingham.

KUCHIISHI, A. K. (2019). *Mechanical Behaviour of Cold Recycled Asphalt Mixtures*. São Paulo: Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

KUCHIISHI, A. K., ANTAO, C. C. S., VASCONCELOS, KAMILLA L., BERNUCCI, L. L. B. (2019). *Influence of viscoelastic properties of cold recycled asphalt mixtures on*

pavement response by means of temperature instrumentation. Road Materials and Pavement Design. Taylor & Francis.

KHOSRAVIFAR, S. (2012). *Design and Mechanical Properties of Foamed Asphalt Stabilized Base Material*. Maryland: Dissertação (Mestrado) - University of Maryland, College Park.

LIMA, C. D. A. (2016). *Estudo da Deformação Permanente de Duas Britas Graduadas para Uso em Camadas de Pavimentos*. Rio de Janeiro: Dissertação (Mestrado) - UFRJ. COPPE.

MOHAMMAD, L. N., HERATH, A., RASOULIAN, M., ZHONGJIE, Z. (2006). *Laboratory Evaluation of Untreated and Treated Pavement Base Materials – Repeated Load Permanent Deformation Test*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, nº 1967. Washington, DC.

NASCIMENTO, L. A. H. (2008). *Nova Abordagem da Dosagem de Misturas Asfálticas Densas com Uso do Compactador Giratório e Foco na Deformação Permanente*. Rio de Janeiro: Dissertação (Mestrado) - UFRJ. COPPE.

PÉREZ, I., MEDINA, L., ÁNGEL DEL VAL, M. (2013). *Mechanical properties and behaviour of in situ materials which are stabilised with bitumen emulsion*. Road Materials and Pavement Design. Taylor & Francis.

PMSP. Prefeitura Municipal de São Paulo. (2009). *PMSPETS - 02/2009 - Base de material fresado com espuma de asfalto - Especificação Técnica de Serviço*. São Paulo.

SCHWAB, K. (2015). *The Global Competitiveness Report 2015-2016*. Genebra: World Economic Forum.

SIDDHARTHAN, R., YAO, J., SEBAALY, P. E. (1998). *Pavement Strain from Moving Dynamic 3D Load Distribution*. Journal of Transportation Engineering, Vol. 124, No. 6, pp. 557–566.

SIDDHARTHAN, R., KRISHNAMENON, N., EL-MOUSLY, M., SEBAALY, P. E. (2002). *Investigation of Tire Contact Stress Distributions on Pavement Response*. Journal of Transportation Engineering, Vol. 128, No. 2, pp. 136–144.

SIDDHARTHAN, R., SEBAALY, P. E., EL-DESOUKY, M., STRAND, D., HUFT, D. (2005). *Heavy off-road vehicle tire-pavement interactions and response*. Journal of Transportation Engineering, Vol. 131, No. 3, pp 239–247.

SUZUKI, C. Y., BONFIM, V. (2017). *Pavimento asfáltico sustentável: uma realidade no Brasil*. Escola de Contas - TCMSP, São Paulo.

TEBALDI, G., DAVE, E. V., MARSAC, P., MURAYA, P., HUGENER, M., PASETTO, M., GRAZIANI, A., GRILLI, A., BOCCI, M., MARRADI, A., WENDLING, L., GAUDEFROY, V., JENKINS, K., LOIZOS, A., CANESTRARI, F. (2014). *Synthesis of*

standards and procedures for specimen preparation and in-field evaluation of cold-recycled asphalt mixtures. Road Materials and Pavement Design. Taylor & Francis.

ULLOA, A., HAJJ, E. Y., SIDDHARTHAN, R., SEBAALY, P. E. (2013). *Equivalent Loading Frequencies for Dynamic Analysis of Asphalt Pavements*. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 25, No. 9, pp 1162–1170.

WEST, R. C. (2015). *Best Practices for RAP and RAS Management*. Quality Improvement Series 129. National Asphalt Pavement Association. Lanham, Maryland. Estados Unidos.

WIRTGEN GmbH. (2012). *Manual de Tecnologia de Reciclagem a Frio*. 1ª edição. Windhagen, Alemanha.

WIRTGEN GmbH. (2016). *Fresadora a frio W 200 / W 200i*. Folheto. Windhagen, Alemanha.

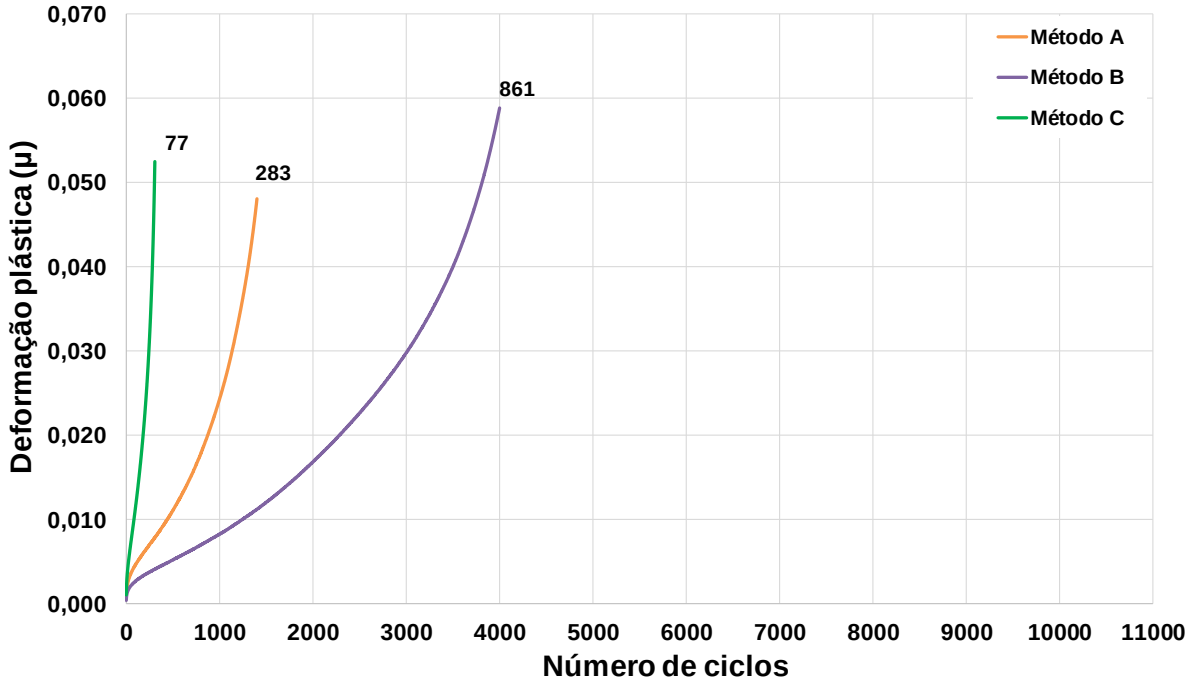
WITCZAK, M. W. (2007). *Specification Criteria for Simple Performance Tests for Rutting. NCHRP Report 580*. Transportation Research Board, Washington, DC.

WITCZAK, M. W., KALOUSH, K., PELLINEN, T., EL-BASYOUNY, M., VON QUINTUS, H. (2002). *Simple Performance Test for Superpave Mix Design. NCHRP Report 465*. Transportation Research Board, Washington, DC.

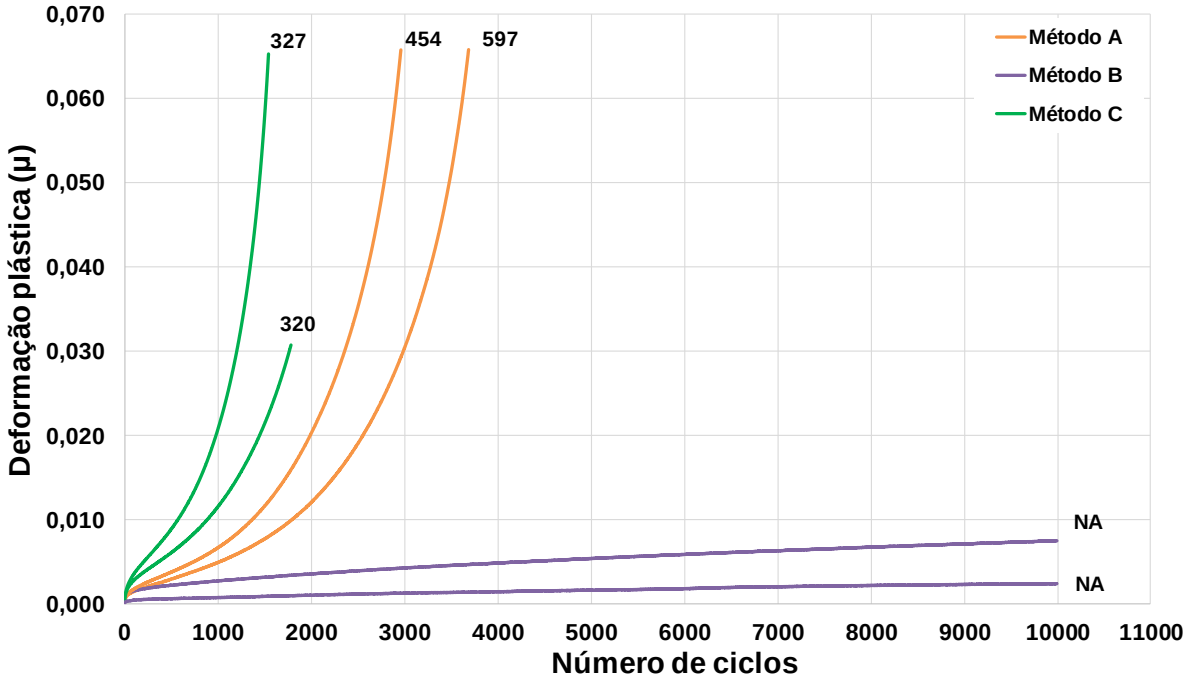
ZAFIR, Z., SIDDHARTHAN, R., SEBAALY, P. E. (1994). *Dynamic pavement strains from moving traffic loads*. Journal of Transportation Engineering, Vol. 120, No. 5, pp 821–842.

APÊNDICE A - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE *FLOW NUMBER*

(i) Mistura: RAP_3E2C



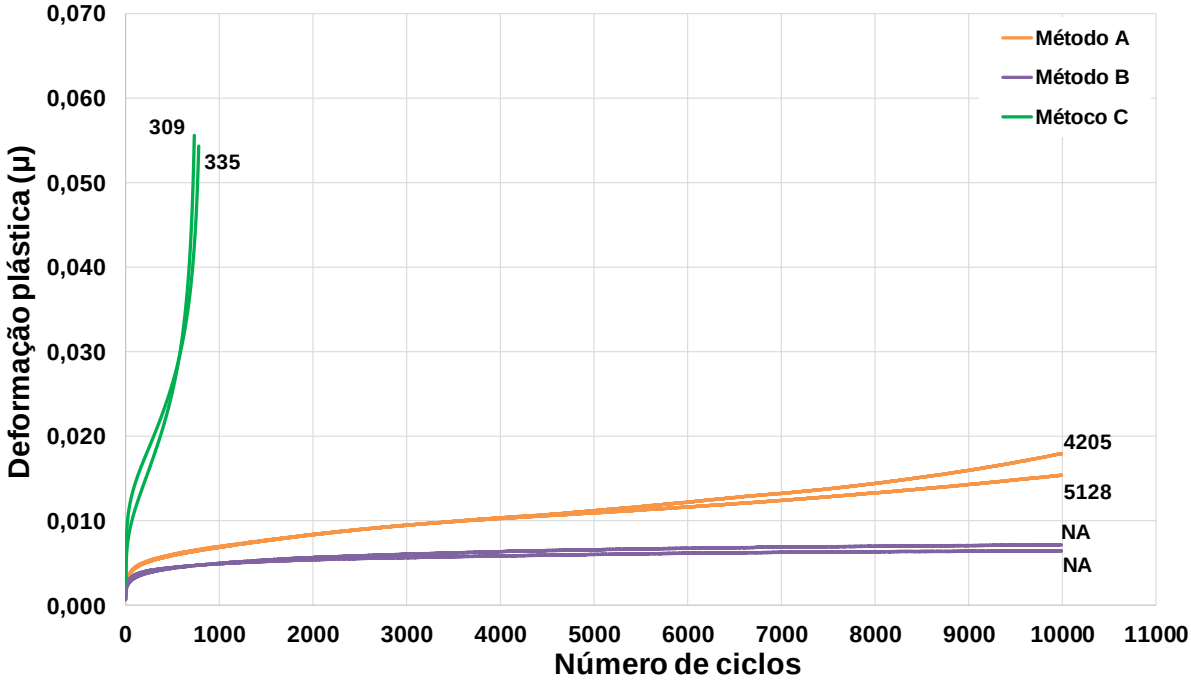
Tempo de cura: zero



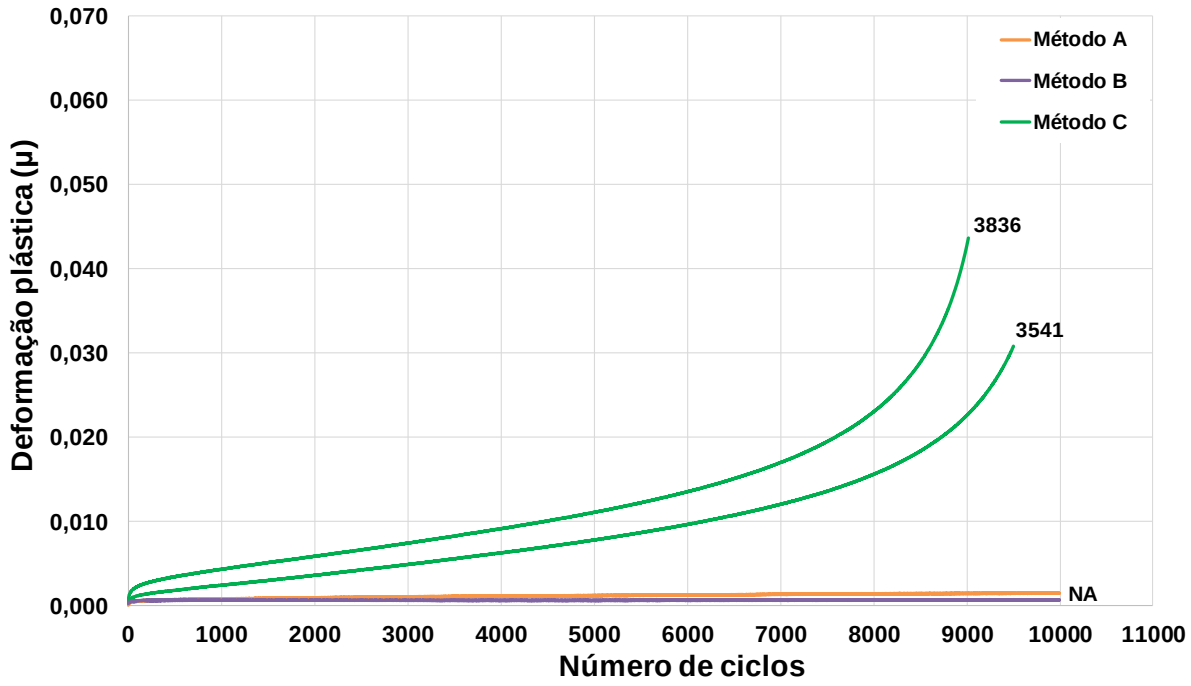
Tempo de cura: 28 dias

Obs.: NA (não ocorreu o *Flow Number*).

(ii) Mistura: RAP_3F2C

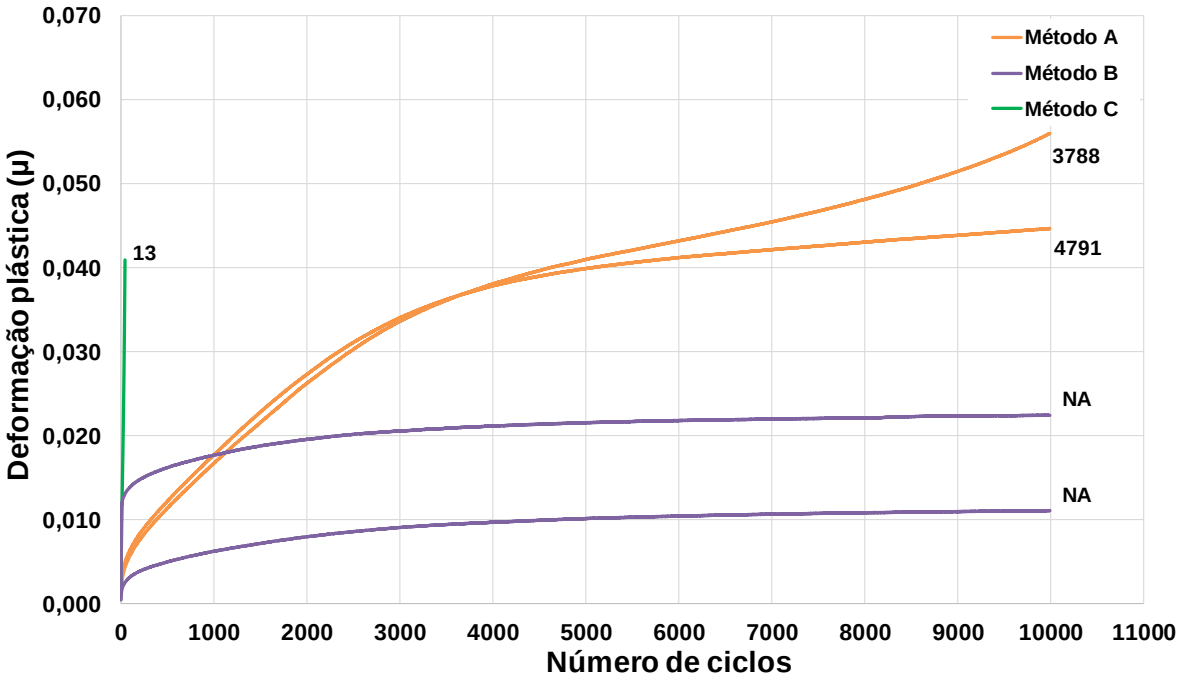


Tempo de cura: zero

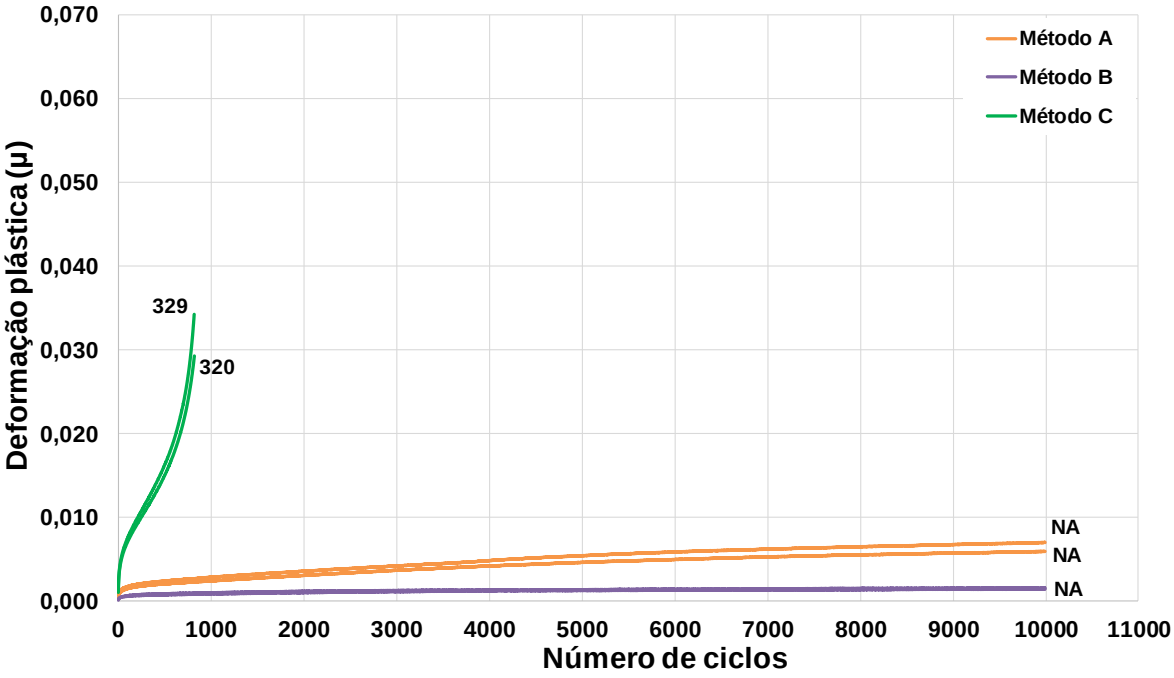


Tempo de cura: 28 dias

(iii) Mistura: RAP_2F1H

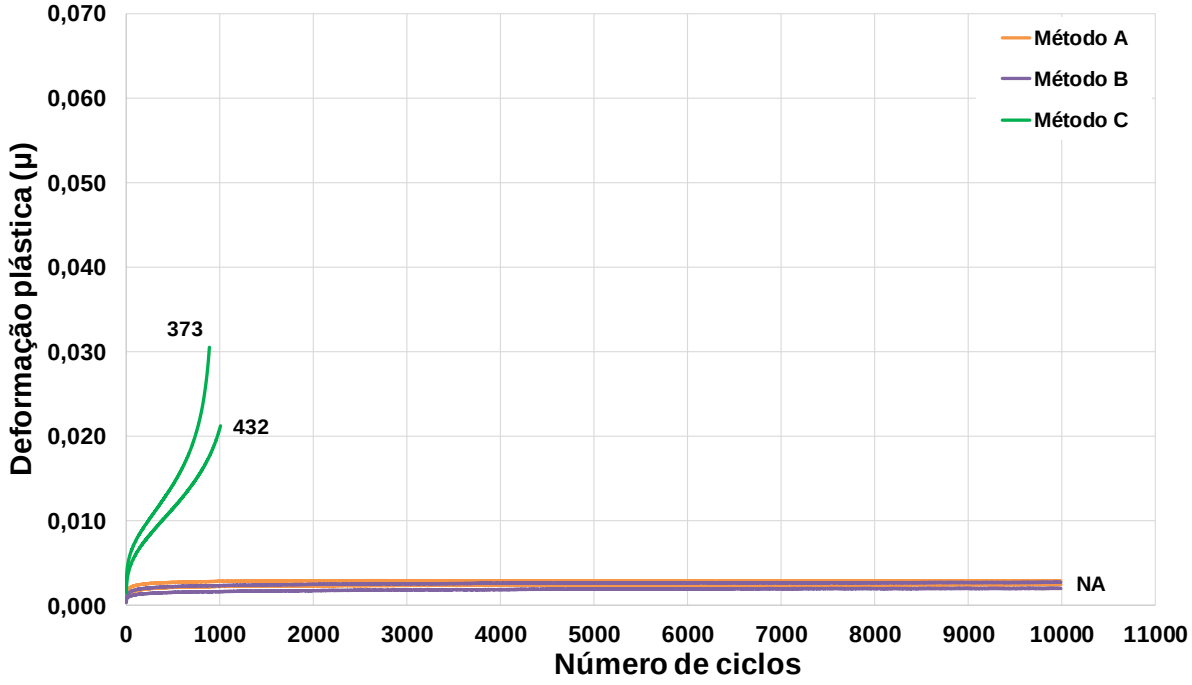


Tempo de cura: zero

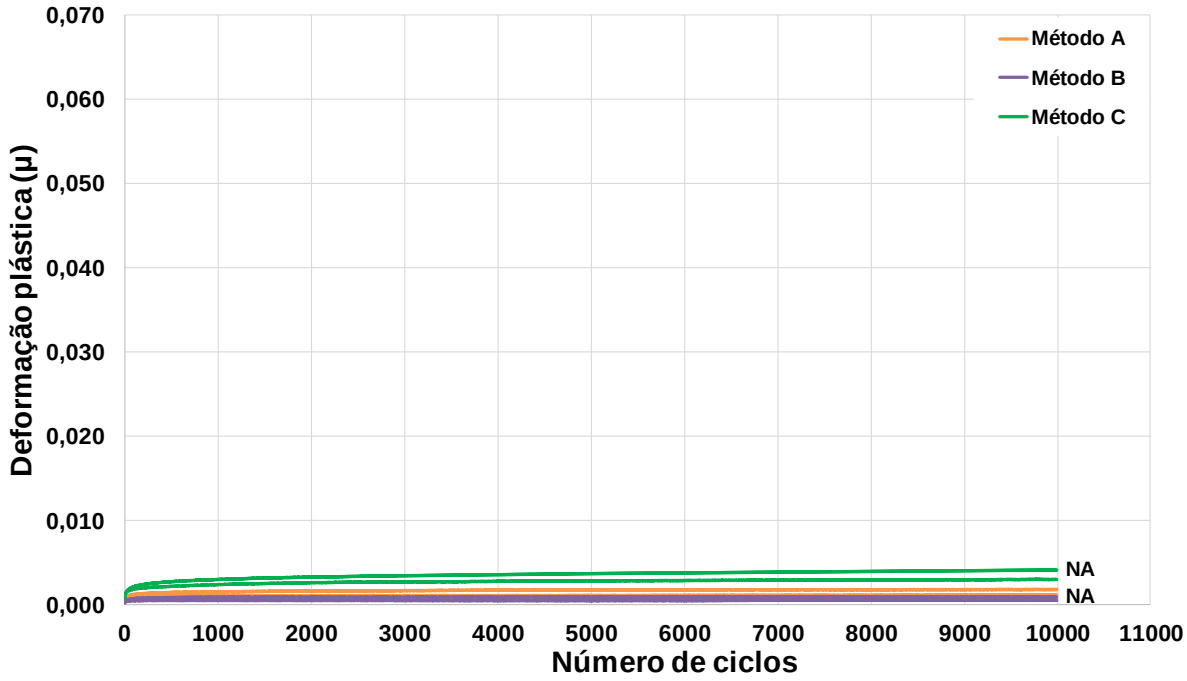


Tempo de cura: 28 dias

(iv) Mistura: GCS_2F1H



Tempo de cura: zero



Tempo de cura: 28 dias