

INFLUÊNCIA DE PERÍODOS DE REPOUSO NA RESISTÊNCIA À FADIGA DE UMA MISTURA ASFÁLTICA ENSAIADA NO APARATO A QUATRO PONTOS

João Victor Staub de Melo

Danilo Panetta de Faria

Luana Schuster

Wellington Broering

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Federal de Santa Catarina

RESUMO

Dentre os defeitos de maior incidência nos pavimentos asfálticos nacionais, a fadiga das misturas asfálticas configura um dos principais mecanismos de ruptura da camada de revestimento. Devido às suas propriedades reológicas, os ligantes asfálticos apresentam potencial autorreparador, fator que tem despertado o interesse de pesquisadores da comunidade acadêmica nacional e internacional. Dentro deste contexto, este artigo apresenta os resultados de um estudo sobre os efeitos de períodos de repouso na resistência à fadiga de uma mistura asfáltica ensaiada no aparato a quatro pontos. Para tanto, foi realizada a formulação de uma mistura asfáltica em laboratório, obtidos corpos de prova prismáticos e realizados ensaios de fadiga com e sem períodos de repouso. Os resultados comprovam o efeito reparador de períodos de repouso na mistura asfáltica estudada. Os tempos de repouso quando inseridos em um protocolo de ensaio de fadiga, podem resultar em significativos incrementos na vida do material.

ABSTRACT

Among the defects of higher incidence in national asphalt pavements, the fatigue of asphalt mixtures constitutes one of the main mechanisms of rupture of the surface layer. Due to its rheological properties, asphaltic binders have a self-healing potential, a factor that has attracted the interest of researchers from the national and international academic community. In this context, this paper presents the results of a study on the effects of rest periods on the fatigue of an asphalt mixture in four-point tests. For that, the formulation of an asphalt mixture was carried out in the laboratory, obtained prismatic test specimens and fatigue tests were performed with and without rest periods. The results confirm the cicatrizing effect of rest periods on the asphalt mixture studied. Resting times when inserted into a fatigue test protocol may result in significant increases in the life of the material.

1. INTRODUÇÃO

Através da análise do desempenho de pavimentos asfálticos, em termos de vida de fadiga, diferenças entre resultados de avaliações laboratoriais e de campo têm sido observadas. Dentre as hipóteses estabelecidas na literatura para tal divergência, tem-se que, em oposição ao carregamento cíclico estabelecido em laboratório durante ensaios de fadiga, o pavimento (em campo) está sujeito a solicitações produzidas pelo tráfego com diferentes intervalos de repouso; controlados pela respectiva velocidade e carga dos veículos (Carpenter et al., 2006; Lu, 2013). Ao longo destes intervalos de repouso, verifica-se a ocorrência do fenômeno de autorreparação. A autorreparação configura uma propriedade relevante no estudo dos materiais asfálticos, uma vez que possui capacidade de expandir a vida útil do pavimento, além de influenciar aspectos econômicos e de segurança (Bhasin et al., 2009; García et al., 2011; Qiu, 2012; Lu, 2013). Nesse contexto, o conceito de capacidade autorreparadora tem sido gradativamente incorporado ao estudo de pavimentos asfálticos (Lytton, 2000).

A determinação da capacidade autorreparadora de materiais betuminosos está, em maior parte, relacionada a ensaios mecânicos, sendo analisada a partir da introdução de uma série de períodos de repouso entre carregamentos sucessivos. O efeito autorreparador é avaliado comparando a resposta do material ensaiado com e sem períodos de repouso (Qiu, 2012). Os resultados destes ensaios são extremamente úteis para estabelecer indicativos da capacidade de reparo, bem como a classificação relativa à propensão dos diferentes tipos de ligante de se autorrecuperar (Bhasin et al., 2009).

Os estudos acerca da caracterização dos materiais asfálticos em termos de propriedades autorreparadoras concentram-se em diversos níveis, dependendo da temática a ser avaliada. Seu conteúdo pode abranger: ligantes asfálticos, mástiques asfálticos (sistema ligante + fíler), misturas asfálticas e o próprio pavimento asfáltico (Qiu, 2012). Pesquisas como as de Kim e Little (1988), García (2009), Lytton (2000), Kim e Roque (2006), Van Den Bergh (2011), Qiu (2012) e Lu (2013) tem evidenciado a existência da capacidade reparadora destes materiais e o seu impacto na vida de fadiga de materiais asfálticos.

Este artigo apresenta os resultados de um estudo sobre a influência da incorporação de períodos de repouso em ensaios de fadiga na capacidade autorreparadora uma mistura de asfalto-borracha.

2. MATERIAIS

Para a realização do estudo foi necessária a produção de uma mistura asfáltica, na qual foram utilizados os seguintes materiais: agregados minerais, cal hidratada (CH-1) e ligante asfáltico modificado por borracha. Considerou-se para o projeto da mistura asfáltica que esta deveria atender a um volume de tráfego pesado.

O agregado selecionado para a formulação da mistura asfáltica é proveniente de uma formação rochosa metamórfica, tipo Gnaiss, resultante da deformação de sedimentos arcóicos e/ou de granitos, cujas propriedades são: porcentagem de partículas lamelares de 8% (ASTM, 2010); equivalente de areia de 65,2% (AASHTO, 2008); dureza – Los Angeles de 26,9% (ASTM, 2014a); massa específica real de 2,796 g/cm³ (ASTM, 2015a); massa específica aparente de 2,767 g/cm³ (ASTM, 2015a) e absorção de 0,38% (ASTM, 2015a).

A curva granulométrica utilizada para a produção da mistura asfáltica foi composta de 20% de brita 3/4" (19,1 mm), 25% de pedrisco 3/8" (9,5 mm), 53,5% de pó de pedra e 1,5% de cal hidratada CH-1. A curva granulométrica foi definida para se enquadrar na faixa IV-B do Instituto do Asfalto, conforme Figura 1. A mistura é composta por 39,6% de agregado graúdo, 53,2% de agregado miúdo e 7,2% de fíler. O agregado graúdo é a fração passante na peneira 3/4" (ASTM) e retido na peneira nº 4 (ASTM); o agregado miúdo representa a fração passante na peneira nº 4 (ASTM) e retida na peneira nº 200 (ASTM); e o material pulverulento é o passante na peneira nº 200 (ASTM).

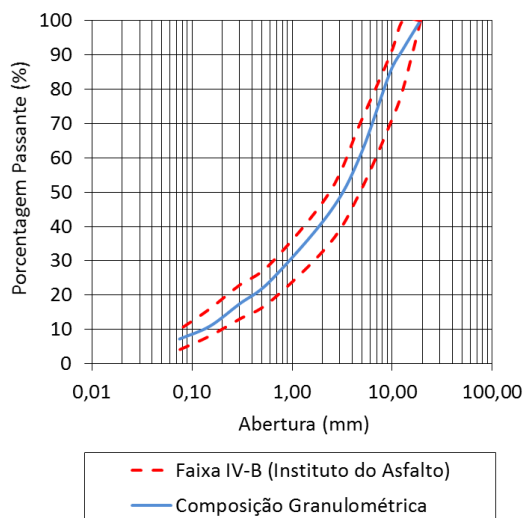


Figura 1: Curva granulométrica.

A cal hidratada empregada neste estudo é do tipo CH-1, de origem dolomítica e classificada como tipo II, segundo a AASHTO M303 (2014). De acordo com o fabricante Pinocal Indústria e Comércio de Cal Ltda., esta cal apresenta as seguintes propriedades: perda ao fogo de 26,2%; resíduo insolúvel de 3,6%; anidrido carbônico (CO₂) de 3,0%; óxido de cálcio (CaO) de 40,9%; óxido de magnésio (MgO) de 29,0%; óxidos totais não voláteis (CaO + MgO) de 94,7% e óxidos totais não hidratados de 3,7%.

O ligante asfáltico utilizado no estudo é do tipo asfalto-borracha (CAPFLEX-B) e apresenta as seguintes características: penetração de 37 (0,1 mm) (ASTM, 2013), ponto de amolecimento de 55° C (ASTM, 2014b), viscosidade aparente a 175° C (spindle 3 e 20 RPM) de 3568 cP (ASTM, 2015b); recuperação elástica de 51,5% (ABNT, 2006) e índice de susceptibilidade térmica (Pfeiffer and Van Doormaal) de -0,7.

3. MÉTODO

Para o desenvolvimento do estudo, foi produzida uma mistura asfáltica em laboratório e dela obtidos corpos de provas prismáticos destinados à realização de ensaios de fadiga com e sem períodos de repouso no aparato a quatro pontos. A estrutura da investigação foi organizada da seguinte forma: (i) formulação da mistura asfáltica em laboratório; (ii) obtenção de corpos de prova da mistura asfáltica; e, (iii) realização de ensaios de fadiga com e sem períodos de repouso.

3.1. Formulação da mistura asfáltica em laboratório

A dosagem da mistura asfáltica foi realizada segundo a metodologia Marshall. Os procedimentos adotados na dosagem seguiram as recomendações das normas ASTM D6926 (2016) e ASTM D6927 (2015c). Utilizou-se na fase de dosagem uma energia correspondente a 75 golpes por face dos corpos de prova. A mistura asfáltica foi projetada para atender aos seguintes critérios volumétricos: volume de vazios entre 3-5%; relação betume-vazios entre 65-78%; estabilidade maior que 8006 N; vazios do agregado mineral maior que 13%; e, fluência entre 8-14 (0,25 mm); relação finos/betume entre 0,8-1,2. Para o processo de produção da mistura asfáltica em laboratório, utilizou-se um misturador mecânico. Os materiais foram aquecidos nas temperaturas recomendadas pela normativa ASTM D6114/D6114M (2009). Neste sentido, o ligante asfáltico foi aquecido a temperatura de 170 °C e os agregados a uma temperatura de 177 °C. Levando em consideração as recomendações da AASHTO R30 (2015), após a homogeneização mecânica da mistura, e antes da compactação, esta ficou condicionada em estufa durante duas horas na temperatura de compactação (155 °C).

3.2. Obtenção de corpos de prova da mistura asfáltica

Após a dosagem da mistura asfáltica em laboratório, foi compactada 1 placa de mistura asfáltica, com dimensões de 60 cm x 40 cm x 9 cm, para posterior obtenção de corpos de prova prismáticos, destinados aos ensaios de resistência à fadiga no equipamento de flexão a quatro pontos. A compactação das placas foi realizada através da mesa compactadora LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées), atual IFSTTAR (Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux). O processo seguiu a especificação francesa AFNOR NF P 98-250-2 (1991), para tráfego pesado. Após a desforma da placa, a mesma foi serrada, obtendo-se 5 corpos de provas prismáticos, com as seguintes dimensões: 5,08 cm x 6,35 cm x 38,1 cm (± 0,1 mm) (Figura 2).

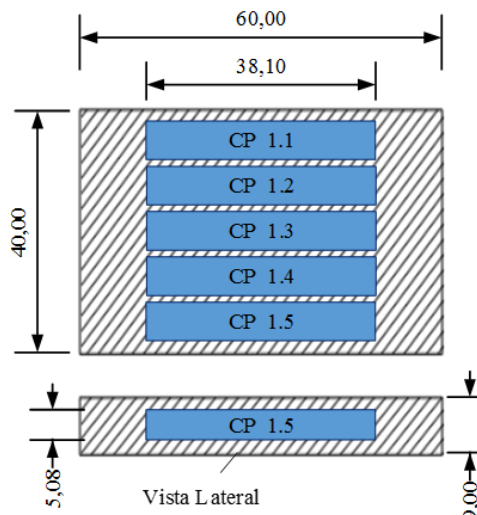


Figura 2: Plano de corte da placa de mistura asfáltica (Melo, 2014).

Conforme a Figura 2, o corte dos corpos de prova foi realizado no mesmo sentido da compactação das placas, de forma a garantir, que os ensaios laboratoriais de resistência à fadiga representem o mais perto possível a sollicitação que ocorre em campo.

3.3. Realização de ensaios de fadiga com e sem períodos de repouso

Nesta fase, os corpos de prova prismáticos foram divididos em dois grupos de corpos de prova e foram ensaiados à fadiga no equipamento a quatro pontos. O primeiro grupo (CPs 1.1, 1.2 e 1.3) foi ensaiado na metodologia tradicional, sem períodos de repouso (metodologia 1) e o segundo grupo (CPs 1.4 e 1.5) com períodos de repouso (metodologia 2). Todos os ensaios de fadiga foram realizados sob deformação controlada, carregamento sinusoidal, temperatura de 20 °C e frequência de 10 Hz. O critério de ruptura foi o mesmo para ambos os grupos, redução da rigidez a 50% do valor inicial, medido no centésimo ciclo de carregamento. A metodologia 1 seguiu a norma da EN 12697-24 (2018). A metodologia 2, com períodos de repouso, se fundamentou no estudo de Karki et al. (2015). Este método contempla 13 etapas, cada etapa é constituída de um tempo de carregamento seguido por um período de repouso, ao final de cada etapa inicia-se a próxima, até que se conclua a metodologia, conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Metodologia 2 (com períodos de repouso).

Etapas	Aplicação de Ciclos de Carregamento*	Período de Repouso (min)
1 ^a	Até 80% da rigidez inicial	40
2 ^a	Até 80% da rigidez inicial	20
3 ^a	Até 80% da rigidez inicial	10
4 ^a	Até 80% da rigidez inicial	5
5 ^a	Até 70% da rigidez inicial	40
6 ^a	Até 70% da rigidez inicial	20
7 ^a	Até 70% da rigidez inicial	10
8 ^a	Até 70% da rigidez inicial	5
9 ^a	Até 60% da rigidez inicial	40
10 ^a	Até 60% da rigidez inicial	20
11 ^a	Até 60% da rigidez inicial	10
12 ^a	Até 60% da rigidez inicial	5
13 ^a	Até 50% da rigidez inicial	Fim de Ensaio

*A rigidez inicial considerada para todas as etapas foi a do 100^o ciclo da 1^a etapa.

Após cada etapa (carregamento + período de repouso) foi calculado o Índice de Cicatrização do material (*Healing Index – HI*), segundo a Equação 1 proposta por Xiao (2017).

$$HI = \frac{|E^*|_{após}}{|E^*|_{inicial}} \quad (1)$$

em que HI: Índice de Cicatrização;
 $|E^*|_{inicial}$: Módulo dinâmico inicial do material (100º ciclo) (MPa);
 $|E^*|_{após}$: Módulo dinâmico após o reparo (MPa).

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1. Formulação da mistura asfáltica em laboratório

No que diz respeito aos resultados, foi formulada uma mistura asfáltica com teor de ligante asfáltico de 6,10% e as seguintes características volumétricas: densidade teórica máxima de 2,501 g/cm³; massa específica aparente de 2,390 g/cm³; volume de vazios de 4,20%; relação betume-vazios de 77,2%; estabilidade de 1167 kgf; fluência de 13,4 (1/100"); e, relação finos/ligante de 1,18.

4.2. Obtenção de corpos de prova da mistura asfáltica

Após a dosagem da mistura asfáltica em laboratório, realizou-se a moldagem da placa, destinada à obtenção dos corpos de prova prismáticos. Na compactação da placa foi utilizada a mesa compactadora LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées), atual IFSTTAR (Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux). Foi moldada 1 placa de 60 cm x 40 cm x 9 cm, da qual foi obtido 5 corpos de prova prismáticos após a serragem. A Figura 3 apresenta 4 dos corpos de prova obtidos.

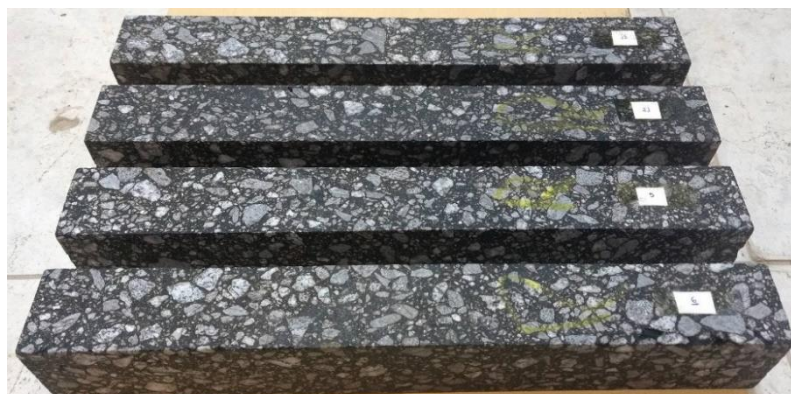


Figura 3: Corpos de prova prismáticos.

4.3. Realização de ensaios de fadiga com e sem períodos de repouso

A Figura 4 apresenta os resultados dos ensaios de fadiga conduzidos sem tempos de repouso (metodologia 1). Já as Figuras 5 e 6 apresentam os resultados dos ensaios realizados com tempos de repouso, segundo a metodologia 2. Os gráficos apresentam o módulo dinâmico versus o número de ciclos aplicados até a degradação de 50% do módulo inicial, todos os ensaios foram conduzidos sob deformação controlada de 365 µm/m (nível típico de deformação aplicada em ensaios de resistência à fadiga de mistura asfáltica modificada com borracha). A Tabela 2 resume os resultados obtidos para todos os ensaios.

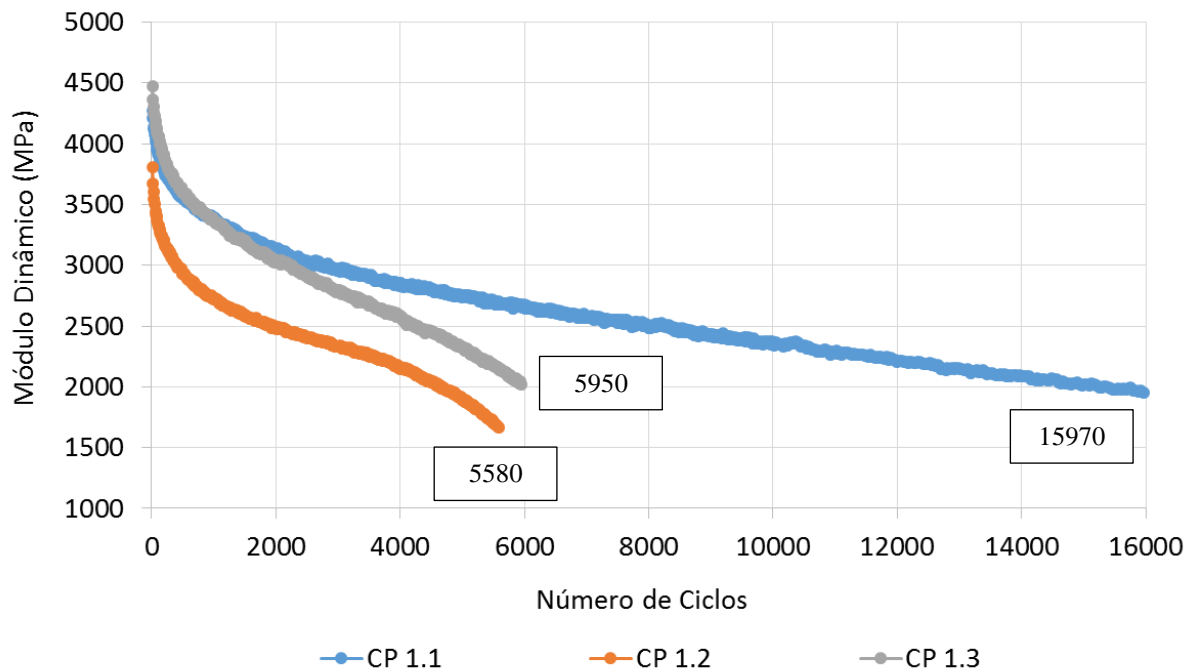


Figura 4: Resultados do ensaio de fadiga sem tempos de repouso para os CPs 1.1, 1.2 e 1.3.

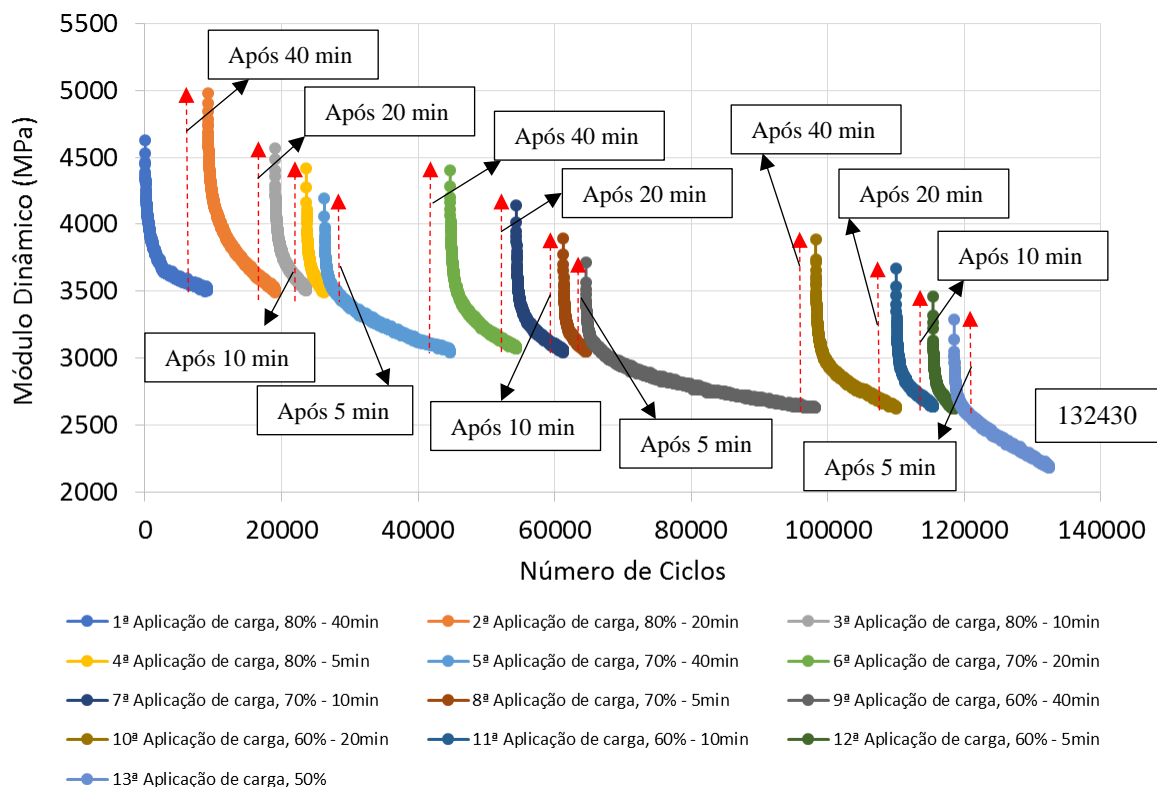


Figura 5: Resultado do ensaio de fadiga com tempos de repouso para o CP 1.4.

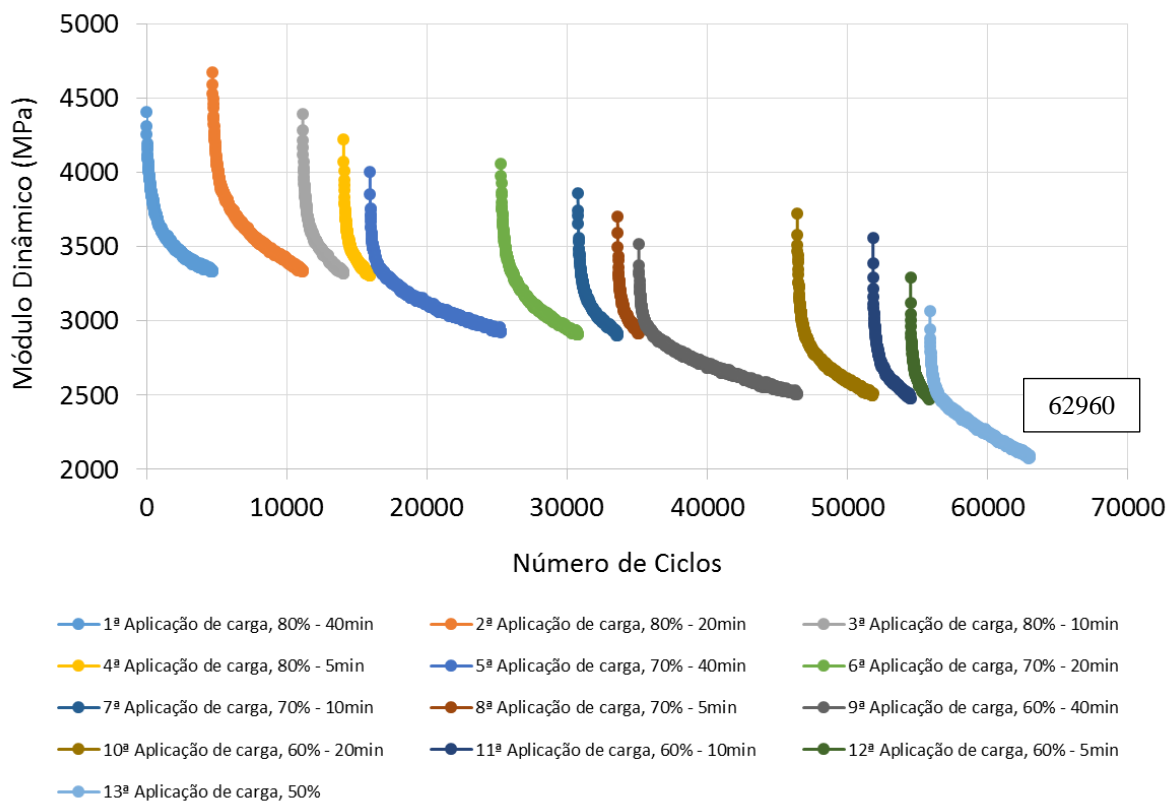


Figura 6: Resultado do ensaio de fadiga com tempos de repouso para o CP 1.5.

Tabela 2: Resultados de resistência à fadiga de todos os CPs.

CPs	Método de Ensaio	Deformação (x 10 ⁻⁶)	Módulo Inicial (MPa)	Módulo Final (MPa)	Nº de Ciclos (50% do Módulo Inicial)	Média de Ciclos	Aumento Médio de Resistência à Fadiga
CP 1.1	1	365	3916	1954	15970		
CP 1.2	1	365	3338	1664	5580	9167	-
CP 1.3	1	365	4072	2023	5950		
CP 1.4	2	365	4307	2183	132430	97695	1065%
CP 1.5	2	365	4095	2085	62960		

Conforme as Figuras 4, 5 e 6, ressaltado pela Tabela 2, a adição de tempos de repouso nos ensaios de fadiga tiveram grande repercussão nos resultados. Os ensaios conduzidos pela metodologia 1 (sem tempos de repouso) apresentaram em média resistência à fadiga de 9167 ciclos, enquanto os ensaios realizados pela metodologia 2 (com tempos de repouso) resistiram em média 97695 ciclos. Esta melhora observada na resistência, corresponde a um aumento de 1065% (10,6 vezes) quando é aplicada a metodologia 2, um incremento extremamente significativo, evidenciando a natureza autorreparadora da matriz asfáltica. Na Figura 5 é destacado o efeito positivo do período de repouso em termos de recuperação de módulo, pode-se verificar que quanto maior o período de repouso, maior é o módulo reparado. O acréscimo de cada tempo de repouso no ensaio, ocasiona a adição de uma sobrevida ao material. A seguir, a Figura 7 e a Tabela 3 destacam a influência dos diferentes tempos de repouso em relação a sobrevida adicionada (prolongamento da vida à fadiga em termos de números de ciclos de carregamento).

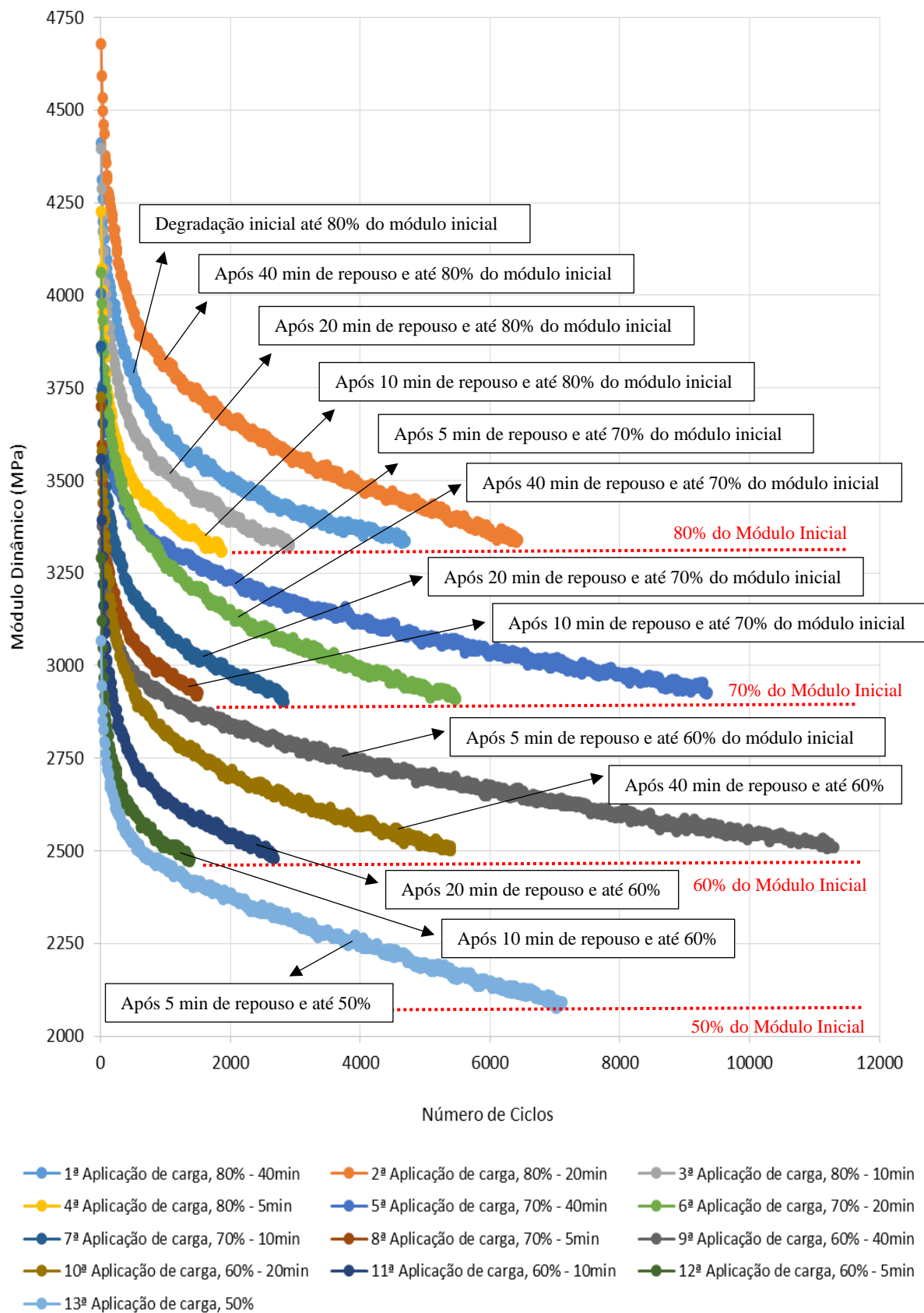


Figura 7: Influência dos tempos de repouso no prolongamento da vida à fadiga do CP 1.5.

Tabela 3: Números de ciclos aplicados em cada etapa do ensaio de fadiga com tempos de repouso para o CP 1.5.

Etapas	Após o Período de Repouso (min) de:	Aplicação do Carregamento Até:	Número de Ciclos	
			Para Cada Etapa	Acumulado
1ª Etapa	0	80% do Módulo Inicial	4700	4700
2ª Etapa	40	80% do Módulo Inicial	6430	11130
3ª Etapa	20	80% do Módulo Inicial	2920	14050
4ª Etapa	10	80% do Módulo Inicial	1880	15930
5ª Etapa	5	70% do Módulo Inicial	9350	25280
6ª Etapa	40	70% do Módulo Inicial	5480	30760
7ª Etapa	20	70% do Módulo Inicial	2830	33590
8ª Etapa	10	70% do Módulo Inicial	1510	35100
9ª Etapa	5	60% do Módulo Inicial	11300	46400
10ª Etapa	40	60% do Módulo Inicial	5400	51800
11ª Etapa	20	60% do Módulo Inicial	2680	54480
12ª Etapa	10	60% do Módulo Inicial	1380	55860
13ª Etapa	5	50% do Módulo Inicial	7100	62960

*Módulo inicial determinado no 100º ciclo de carregamento da 1ª etapa.

Conforme a Figura 7 e a Tabela 3, comprova-se, que quanto maiores forem os tempos de repouso, maiores são os prolongamentos da vida à fadiga do material. Por exemplo, para a faixa de aplicação do carregamento até 80% do módulo inicial, os 40 min iniciais de repouso incrementaram na resistência à fadiga 6430 ciclos, seguidos por mais 2920 ciclos e 1880 ciclos após os períodos de 20 e 10 minutos de descanso, respectivamente. Pode-se ainda observar, que quanto maiores forem os danos já sofridos pelo material, ou seja, nas faixas de aplicação da carga até 70% e 60% do módulo inicial, menores são os efeitos reparadores dos tempos de repouso aplicados (menor é a sobrevida adicionada).

As Tabelas 4 e 5 apresentam os dados de módulo dinâmico dos CPs 1.4 e 1.5, após o carregamento de cada etapa da metodologia 2, assim como, o módulo após o período de repouso. É ressaltado ainda, a porcentagem de recuperação do módulo degradado que é ocasionada pelo período de repouso, como também o Índice de Cicatrização.

Tabela 4: Módulo dinâmico do CP 1.4 durante as etapas do ensaio de fadiga com tempos de repouso (metodologia 2).

Etapas	Após o Carregamento das Etapas			Após o Repouso das Etapas				
	Módulo (MPa)	% Módulo Inicial	Módulo Degradado Após o Carregamento (MPa)	Período de Repouso (min)	Módulo Após o Repouso (MPa)	Módulo Reparado Após o Repouso (MPa)	% Reparação do Módulo Degradado	Índice de Cicatrização (HI)
Módulo Inicial*	4307*	100	-	-	-	-	-	-
1ª Etapa	3505	81	802	40	4649	1144	108	1,08
2ª Etapa	3510	81	797	20	4178	668	97	0,97
3ª Etapa	3509	81	798	10	3964	456	92	0,92
4ª Etapa	3497	81	810	5	3821	324	89	0,89

5ª Etapa	3050	71	1257	40	3981	931	92	0,92
6ª Etapa	3079	71	1228	20	3740	661	87	0,87
7ª Etapa	3056	71	1251	10	3476	420	81	0,81
8ª Etapa	3050	71	1257	5	3381	332	79	0,79
9ª Etapa	2628	61	1679	40	3468	840	81	0,81
10ª Etapa	2630	61	1677	20	3240	610	75	0,75
11ª Etapa	2636	61	1671	10	3047	411	71	0,71
12ª Etapa	2618	61	1689	5	2896	278	67	0,67
13ª Etapa	2183	51	2124	0	0	0	0	0

*Determinado no 100º ciclo de carregamento da 1ª etapa.

Tabela 5: Módulo dinâmico do CP 1.5 durante as etapas do ensaio de fadiga com tempos de repouso (metodologia 2).

Etapas	Após o Carregamento das Etapas			Após o Repouso das Etapas				
	Módulo (MPa)	% Módulo Inicial	Módulo Degradado Após o Carregamento (MPa)	Período de Repouso (min)	Módulo Após o Repouso (MPa)	Módulo Reparado Após o Repouso (MPa)	% Reparação do Módulo Degradado	Índice de Cicatrização (HI)
Módulo Inicial*	4095*	100	-	-	-	-	-	-
1ª Etapa	3338	81	758	40	4324	986	106	1,06
2ª Etapa	3340	82	755	20	3972	632	97	0,97
3ª Etapa	3323	81	773	10	3748	426	92	0,92
4ª Etapa	3311	81	785	5	3633	322	89	0,89
5ª Etapa	2928	71	1167	40	3725	797	91	0,91
6ª Etapa	2910	71	1186	20	3456	546	84	0,84
7ª Etapa	2904	71	1191	10	3284	380	80	0,80
8ª Etapa	2927	71	1168	5	3199	272	78	0,78
9ª Etapa	2511	61	1585	40	3260	749	80	0,80
10ª Etapa	2512	61	1584	20	3016	504	74	0,74
11ª Etapa	2479	61	1616	10	2816	337	69	0,69
12ª Etapa	2476	60	1620	5	2737	261	67	0,67
13ª Etapa	2085	51	2010	0	0	0	0	0

*Determinado no 100º ciclo de carregamento da 1ª etapa.

De acordo com as Tabela 4 e 5, é possível observar que: os tempos de repouso recuperam o módulo degradado pelo carregamento; quanto maior o tempo de repouso, maior é o valor de módulo recuperado e, conseqüentemente, o Índice de Cicatrização; quanto maiores forem os danos já sofridos pelo material, menor é o Índice de Cicatrização ocasionado pelos períodos de repouso.

5. CONCLUSÕES

Os estudos conduzidos neste trabalho comprovaram o efeito reparador de períodos de repouso em misturas de asfalto-borracha. Os tempos de repouso quando inseridos em um protocolo de ensaio de fadiga, podem resultar em significativos incrementos na vida do material. Quanto maior for o período de repouso, maior será o Índice de Cicatrização. O Índice de Cicatrização

é influenciado pelo dano já ocasionado no material, quanto mais danificado está o material, menor é o Índice de Cicatrização para um mesmo período de repouso. Este estudo mostra que a autorreparação da mistura asfáltica é um fenômeno que merece ser investigado e levado em consideração em projetos de estruturas de pavimentos flexíveis.

Destaca-se, que este foi um estudo inicial, onde foram apresentados alguns dos resultados já obtidos em uma pesquisa mais ampla e que está atualmente em desenvolvimento. Acerca da temática em questão, há uma gama de questionamentos que devem ser respondidos, a saber: influência da natureza do ligante asfáltico, da temperatura de ensaio, da frequência de carregamento no ensaio, do modo de carregamento do ensaio, do envelhecimento do material, da incorporação de aditivos (rejuvenescedores, nanomateriais, fibras e partículas condutivas, etc.), dos períodos de repouso, de induções térmicas no material, entre outros diversos fatores.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Rede Temática do Asfalto/Petrobras pelos investimentos realizados no Laboratório de Pavimentação da UFSC e ao Laboratório de Pavimentação da UFSC pelo suporte na realização dos ensaios.

REFERÊNCIAS

- AASHTO (2008) AASHTO T176: Standard method of test for plastic fines in graded aggregates and soils by use of the sand equivalent test. American Association Of State Highway And Transportation, USA.
- AASHTO (2014) AASHTO M 303: Standard specification for lime for asphalt mixtures, Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. American Association Of State Highway And Transportation, USA.
- AASHTO (2015) AASHTO R30: Standard practice for mixture conditioning of hot mix asphalt (HMA). American Association Of State Highway And Transportation, USA.
- ABNT (2006) NBR 15086 Materiais betuminosos - determinação da recuperação elástica pelo ductilômetro. Associação Brasileira De Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- AFNOR (1991) NF P 98-250-2 Essais relatifs aux chaussées - préparation des mélanges hydrocarbonés, partie 2: compactage des plaques. Association Française De Normalisation, France.
- ASTM (2009) ASTM D6114/D6114M: Standard specification for asphalt-ruber binder. American Society For Testing And Materials, USA.
- ASTM (2010) ASTM D4791: Standard test method for flat particles, elongated particles, or flat and elongated particles in coarse aggregate. American Society For Testing And Materials, USA.
- ASTM (2013) ASTM D5: Standard test method for penetration of bituminous materials. American Society For Testing And Materials, USA.
- ASTM (2014a) ASTM C131: Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine. American Society For Testing And Materials, USA.
- ASTM (2014b) ASTM D36: Standard test method for softening point of bitumen (ring-and-ball apparatus). American Society For Testing And Materials, USA.
- ASTM (2015a) ASTM C127: Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate. American Society For Testing And Materials, USA.
- ASTM (2015b) ASTM D4402: Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotational viscometer. American Society For Testing And Materials, USA.
- ASTM (2015c) ASTM D6927: Standard test method for Marshall stability and flow of asphalt mixtures. American Society For Testing And Materials, USA.
- ASTM (2016) ASTM D6929: Standard practice for preparation of asphalt mixture specimens using Marshall apparatus. American Society For Testing And Materials, USA.
- BHASIN, Amit; NARAYAN, Atul; LITTLE, Dallas N. (2009) Laboratory Investigation of a Novel Method to Accelerate Healing in Asphalt Mixtures Using Thermal Treatment. Texas A&M University. Texas, United States.
- CARPENTER, Samuel; SHEN, Shihui. (2006) Dissipated Energy Approach to Study Hot-Mix Asphalt Healing in Fatigue. Journal of the Transportation Research Board. P. 178-185.
- EN (2018) EN 12697-24: Bituminous mixtures - test methods for hot mix asphalt, part 24: Resistance to fatigue. European Standard, Brussels, Belgium.

- GARCÍA, Álvaro. (2011) Self-healing of open cracks in asphalt mastic. Fuel: The Science and Technology of Fuel and Energy.
- GARCÍA, Álvaro; SCHLANGEN, Erik; VEN, Martin van de; LIU, Quantao. (2009) Electrical conductivity of asphalt mortar containing conductive fibers and fillers. Construction and Building Materials. V.23. P. 3175-3181.
- KIM, Booil; ROQUE, Reynaldo. (2006) Evaluation of Healing Property of Asphalt Mixtures. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. P. 84-91.
- LITTLE, Dallas N.; LYTTON, Robert L.; WILLIAMS, Devon; KIM, Richard Y. (1998) An Analysis of the Mechanism of Microdamage Healing based on the Application of Micromechanics First Principles of Fracture and Healing. Association of Asphalt Paving Technologists. P. 1-41.
- LU, Xin. (2013) Investigation of the Fracture Healing and Mechanism of Asphalt Binders. Doctoral Thesis. Washington State University. Washington D.C., United States.
- LYTTON, Robert L. (2000) Characterizing Asphalt Pavements for Performance. Transportation Research Record - 1723. P. 5-16.
- MELO, João V. S. (2014) Desenvolvimento e Estudo do Comportamento Reológico e Desempenho Mecânico de Concretos Asfálticos Modificados com Nanocompósitos. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, Brasil.
- QIU, Jian. (2012) Self Healing of Asphalt Mixtures: Towards a Better Understanding of the Mechanism. Doctoral Thesis. Delft University of Technology. Delft, Netherlands.
- VAN DEN BERGH, Win. (2011) The Effect of Ageing on the Fatigue and Healing Properties in Bitumen Mortars. Doctoral Thesis. Delft University of Technology. Delft, Netherlands.
- XIAO, Dong. (2017) State-of-the-art and Prospect for Self-Healing Asphalt Concrete. AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics.

João Victor Staub de Melo (joao.victor@ufsc.br)
Danilo Panetta de Faria (danpfaria@gmail.com)
Luana Schuster (luana.schuster@posgrad.ufsc.br)
Wellington Broering (wellington.bb@posgrad.ufsc.br)
Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina
Rua João Pio Duarte da Silva, 205, Córrego Grande, Florianópolis, SC, Brasil, CEP 88040-900