

Estudos laboratoriais para determinação do comportamento da vida de fadiga de misturas asfálticas rejuvenescidas

João Paulo Souza Silva¹, Márcio Muniz Farias²

¹Universidade Federal de Goiás, Goiás – Brasil, profjpss@gmail.com

²Diretor da Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Brasília, Distrito Federal – Brasil, munz@unb.br

Recebido:

15 de outubro de 2018

Aceito para publicação:

6 de fevereiro de 2019

Publicado:

30 de abril de 2020

Editor de área:

Jorge Barbosa Soares

Palavras-chaves:

Misturas asfálticas,
Reciclagem,
Material fresado,
Fadiga.

Keywords:

Asphalt mixtures; Recycling,
Reclaimed Asphalt Pavement,
Fatigue.

DOI:10.14295/transportes.v28i1.1869



RESUMO

A reciclagem de revestimentos asfálticos é um assunto que desperta grande interesse, mas que requer estudos mais aprofundados. Nesse sentido, o presente artigo tem como objetivo estudar os efeitos de produtos rejuvenescedores na vida de fadiga de misturas asfálticas utilizando material fresado de revestimento asfáltico. O fresado recebeu adição de rejuvenescedores a base de alcatrão (RejuvaSeal) e outros a base de óleo de xisto, conhecidos comercialmente com AR-5, AR-250 e AR-500, nas taxas de 15, 20 e 25%, de modo a verificar qual teor seria apropriado para fazer com que a mistura rejuvenescida apresentasse características semelhantes às de uma mistura asfáltica nova do tipo CBUQ, na Faixa C, aqui tomada como mistura de referência. Em seguida, as propriedades mecânicas (RT e Vida de Fadiga) foram determinadas, de onde se observou que a mistura contendo 20% de AR-5 foi a que mais se aproximou de uma mistura nova de referência.

ABSTRACT

Recycling of asphalt coatings is a subject of great interest, but requires further study. In this sense, the present article aims to study the effects of rejuvenating products in the fatigue life of asphalt mixtures using reclaimed asphalt pavement - RAP. RAP was supplemented with rejuvenators (RejuvaSeal) and other shale oil base, known commercially with AR-5, AR-250 and AR-500, at rates of 15, 20 and 25%, so as to check what content would be appropriate to cause the rejuvenated blend to exhibit characteristics similar to those of a new hot mix asphalt as the reference blend. Moreover, the mechanical properties of the Indirect Tensile strength and Fatigue life were determined, from which it was observed that the mixture containing 20% of AR-5 was the closest to a new reference mixture.

1. INTRODUÇÃO

O meio técnico rodoviário tem se esforçado para buscar novas tecnologias e desenvolver soluções mais econômicas de restauração dos pavimentos, muitos já bastante deteriorados. Entre as novas metodologias estudadas, destaca-se a reciclagem dos revestimentos asfálticos, que além de apresentar rapidez executiva e custos competitivos, preza pelo aspecto ambiental (Dellabianca, 2004; Silva, 2011).

Segundo Bonfim & Domingues (1995), a reciclagem de misturas asfálticas vem sendo executada no Brasil desde meados da década de 1980, principalmente após a introdução de máquinas fresadoras no país. Este tipo de reciclagem reaproveita o material da capa asfáltica fresado, posteriormente utilizado com revestimento ou binder a partir da incorporação de agentes rejuvenescedores que buscam recuperar as características do ligante original envelhecido.

A reciclagem de materiais para pavimentação surgiu devido à necessidade de proteger o meio ambiente no que diz respeito à economia de recursos naturais, aos espaços físicos (descargas), ao desperdício de energia e à redução dos gases de efeito estufa (Genesseeux, 2015).

O envelhecimento do ligante em misturas asfálticas ocorre devido ao efeito da temperatura, do ar, da luz solar, da chuva e do tempo, que resulta em um aumento da consistência do asfalto e em maior rigidez da camada betuminosa. Este “endurecimento” do ligante asfáltico, combinado com a ação do tráfego, acarreta o aparecimento de fissuras e degradação acelerada no pavimento (Silva, 2005; Araújo, 2012).

Essas misturas asfálticas envelhecidas, entretanto, podem ser recuperadas por meio da incorporação de aditivos químicos, chamados agentes rejuvenescedores, que têm como finalidade repor os compostos aromáticos e resinas para que as propriedades originais do ligante sejam restabelecidas.

2. RECICLAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Segundo Pasche (2016), a reciclagem asfáltica não é uma técnica nova. O autor comenta ainda, que o uso das técnicas de reciclagem de pavimentos asfálticos data do início do século passado, mais precisamente por volta de 1915. Entretanto a utilização do cimento asfáltico de petróleo (CAP) neste tipo de obra é anterior aos anos 30, período em que surgiram as primeiras máquinas fresadoras nos Estados Unidos. Contudo, foram às exigências crescentes da economia e da proteção ambiental, que promoveram em um maior destaque as técnicas e procedimentos de reciclagem.

Quando se trata de uma obra rodoviária de pavimentação, somente é considerado reciclagem quando há regeneração, ou rejuvenescimento, dos materiais asfálticos, com aplicação do material para exercer a mesma função inicial (Centofane, 2016). Esse processo é realizado através de um equipamento especial (fresadora).

Uma das principais vantagens da utilização de materiais fresados na pavimentação asfáltica está no fato de que a maioria dos materiais já se encontram no local, dispensando o transporte e a exploração de jazidas para empréstimo de novos materiais. Segundo o DNIT (DNER, 1998), o principal que a reciclagem pode oferecer é a conservação de agregados, de ligantes e na redução do consumo energético, na diminuição das emissões de CO₂, preservando o meio ambiente e mantendo as condições de geometria da via (Lima, 2003; Cunha, 2010).

Silva (2011) comenta que a fresagem pode reabilitar o pavimento danificado que apresenta desgaste ou se encontra envelhecido, sendo o estado geral do pavimento o que determinará como o serviço de fresagem será executado. A utilização deste tipo de material em uma nova camada asfáltica permite dar uma resposta adequada ao problema cada vez maior de escassez de agregados, bem como atender às exigências ambientais em termos de disposição do mesmo.

Além disso, Castro (2003) afirma que o ligante asfáltico remanescente também apresenta valor econômico elevado, podendo ter recuperadas algumas de suas propriedades físicas e reológicas originais, que durante sua utilização foram comprometidas devido a processos de envelhecimento. A utilização de novos aditivos, emulsões ou rejuvenescedores, atualmente, faz com que este tipo de serviço se torne naturalmente mais econômico em relação à demolição e reconstrução de uma nova mistura betuminosa.

Para Pradyumna et al. (2013), a reciclagem consiste em um processo no qual são recuperados os materiais asfálticos e combinados com materiais novos, com a presença ou não de agente

rejuvenecedor, objetivando reproduzir novas misturas para aplicação em pavimentos. Um projeto executado corretamente com misturas recicladas, pode ter um desempenho melhor ou semelhante aos de novas misturas asfálticas convencionais.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Misturas rejuvenescidas

Corpos de prova com material fresado foram moldados a fim de verificar qual seria o comportamento mecânico de uma mistura composta por 100% de material reciclado, ou seja, não foram realizadas correções granulométricas, pois o material apresentava granulometria dentro dos limites preconizados pela Faixa "C" de um CBUQ (DNIT 031/2004-ES). Essa mistura recebeu a incorporação de agentes rejuvenecedores à base de alcatrão e óleo de xisto em diferentes taxas em relação ao peso do ligante impregnado no fresado.

Por meio de ensaios de extração de betume, foi verificado que o material fresado possuía 5% em peso de ligante envelhecido, o que para um corpo de prova de 1200g representa um total de 60g. Sendo assim, adotaram-se as faixas de teor de 15, 20 e 25% de agente rejuvenecedor em relação ao CAP original, correspondendo à incorporação de 9, 12 e 15g, respectivamente, para um corpo de prova de 1200g de material fresado moldado segundo a metodologia Marshall, com 75 golpes por face.

Para os testes de Resistência à tração e Vida de Fadiga, foram utilizados seis corpos de prova de cada configuração, os demais foram utilizados para testes de Estabilidade Marshall e Módulo Resiliente, cujos resultados não são apresentados nesse trabalho.

Estas amostras foram utilizadas para verificação da melhor taxa de aplicação em função dos benefícios obtidos para reciclagem do material fresado. Isto observando se, após rejuvenescimento, a mistura atende às exigências mínimas para determinados tipos de projetos de rodovias brasileiras. Todos os parâmetros volumétricos e de resistência mecânica foram determinados no Laboratório de Infraestrutura Rodoviária da Universidade de Brasília.

3.2. Avaliação Mecânica

3.2.1. Resistência à tração

O ensaio foi realizado em corpos de prova cilíndricos segundo a norma DNIT 136/2018-ME e consistiu na aplicação de uma carga estática de compressão distribuída ao longo de duas geratrizes opostas, a fim de se obter tensões de tração ao longo do diâmetro horizontal, perpendicular à carga.

A resistência à tração de corpos de prova cilíndrico foi determinada, segundo a Equação 1, a seguir:

$$RT = \frac{2F_R}{100 \cdot \pi \cdot D_{cp} \cdot h_{cp}} \quad (1)$$

onde: RT: resistência à tração, MPa;
FR: carga de ruptura, N;
D_{cp}: diâmetro do corpo de prova, cm;
h_{cp}: altura do corpo de prova, cm.

As amostras ficaram em sala climatizada com temperatura em torno de 25°C, logo após foram medidas utilizando paquímetro digital. Os resultados obtidos para as misturas analisadas serão apresentados e discutidos posteriormente.

3.2.2. Vida de Fadiga

O ensaio foi realizado baseado na Norma DNIT 183/18 que trata do ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada. A fadiga na camada de revestimento ocorre devido à aplicação de um carregamento solicitando dinamicamente o pavimento, despertando uma tensão de tração (σ_t) na face inferior do revestimento betuminoso e provocando a ruptura do mesmo após, a n -enésima aplicação da carga, considera-se, geralmente, a carga proveniente do “eixo simples padrão” de 8,2 tf.

Para a estimativa da vida de fadiga, inicialmente foi calculado o carregamento vertical a ser aplicado em função de uma porcentagem da carga de ruptura, utilizando-se a Equação abaixo.

$$F_v = \frac{100 \cdot \pi \cdot D_{cp} \cdot h_{cp} \cdot \sigma_t^*}{2} \quad (2)$$

onde: F_v : Carga vertical aplicada (N);
 σ_t^* : Tensão de tração, correspondente a uma porcentagem da resistência à tração (MPa);
 h_{cp} : Altura do corpo de prova (cm);
 D_{cp} : Diâmetro do corpo de prova (cm).

As diferenças de tensões foram obtidas pela Equação abaixo.

$$\Delta\sigma = \frac{8F_v}{100 \cdot \pi \cdot D_{cp} \cdot h_{cp}} \quad (3)$$

onde: $\Delta\sigma$: diferença de tensões no centro do corpo de prova (MPa)

Neste trabalho, o ensaio realizado para estimar a vida de fadiga consistiu na aplicação de pulsos de carga, com frequência de 1s, sendo 0,1s correspondentes ao tempo de aplicação da carga e 0,9s correspondente ao tempo de descanso. Os carregamentos utilizados foram 20%, 30% e 40% da resistência à tração referente a cada mistura asfáltica avaliada, foi executado conforme prevê Norma DNIT 183/18, cujos valores devem estar entre 5% e 40%. Foram realizados ensaios sob carga controlada, cujo critério de fadiga está associado à fratura total da amostra. Em geral, a vida de fadiga (N) é definida como o número total de aplicações de uma carga necessária à ruptura total da amostra, em condições térmicas em torno de $25 \pm 0,5$ °C. O critério de parada utilizado, nesta pesquisa, foi a ruptura total do corpo-de-prova.

Em quaisquer das condições de ensaio a vida de fadiga é expressa pelo número de solicitações (N), relacionado à tensão de tração (σ_t) ou a deformação inicial de tração (ϵ_i) em gráficos mono-log. No presente trabalho foi aplicada solicitação com tensão controlada, de onde se têm a Equação 2.

$$N = k \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^n \quad (4)$$

onde: N: vida de fadiga;
 $\Delta\sigma$: diferença de tensão (MPa);
k, n: parâmetros experimentais (determinados no ensaio).

A estimativa da vida de fadiga das configurações estudadas neste trabalho, se deu por meio da aplicação de carregamento repetido, à tensão constante, usando o ensaio de compressão diametral de tração indireta.

4. RESULTADOS, ANÁLISES E DISCUSSÃO

Utilizaram-se, para os ensaios de caracterização mecânica das misturas asfálticas recicladas, cinco configurações de misturas de CBUQ com diferentes teores de aditivos (15%, 20%, 25%) e

uma mistura asfáltica sem a presença de aditivos, assim definidas: Mistura 1: 100% de fresado; Mistura 2: 100% fresado+AR-5; Mistura 3: 100% fresado+AR-250; Mistura 4: 100% fresado+AR-500; Mistura 5: 100% fresado+“RejuvaSeal”; Mistura 6: 100% fresado+CAP 50/70; Mistura 7: Mistura nova (agregado novo+CAP 50/70).

Inicialmente, os corpos de prova moldados foram avaliados quanto aos parâmetros físicos de Volume de Vazios (Vv) e Relação Betume-Vazios (RBV). De acordo com a norma DNIT ES-031/2004, todas as misturas apresentaram volume de vazios e relação betume-vazios satisfatórios quando comparados à respectiva norma. Apesar disso, conclusões mais apuradas só poderão ser estabelecidas após avaliação da resistência mecânica por meio dos ensaios de Resistência à Tração, Módulo de Resiliência e Fadiga.

4.1. Resistência à tração

Os corpos de prova, foram submetidos ao ensaio de Resistência à Tração para estimativa aproximada da tensão máxima de ruptura das misturas, além de estimar as tensões que poderiam ser utilizadas nos ensaios de Módulo de Resiliência e fadiga por compressão diametral dinâmica.

Os gráficos com os resultados obtidos de RT versus deslocamento são apresentados na Figura 1 e Figura 2.

Todas as configurações estudadas apresentaram valores de Estabilidade Marshall superiores ao valor mínimo estabelecido pela norma, que é 500 kgf. Os resultados de Resistência a tração, por sua vez, são apresentados na Tabela 1.

Observa-se que o acréscimo de aditivo à mistura faz com que os valores de Resistência à Tração sejam sensivelmente reduzidos. Este fato pode ser explicado devido à recuperação das frações leves do ligante envelhecido, conforme apresentado na avaliação química dos mesmos, fazendo com que a mistura se torne novamente mais flexível e também com menor resistência.

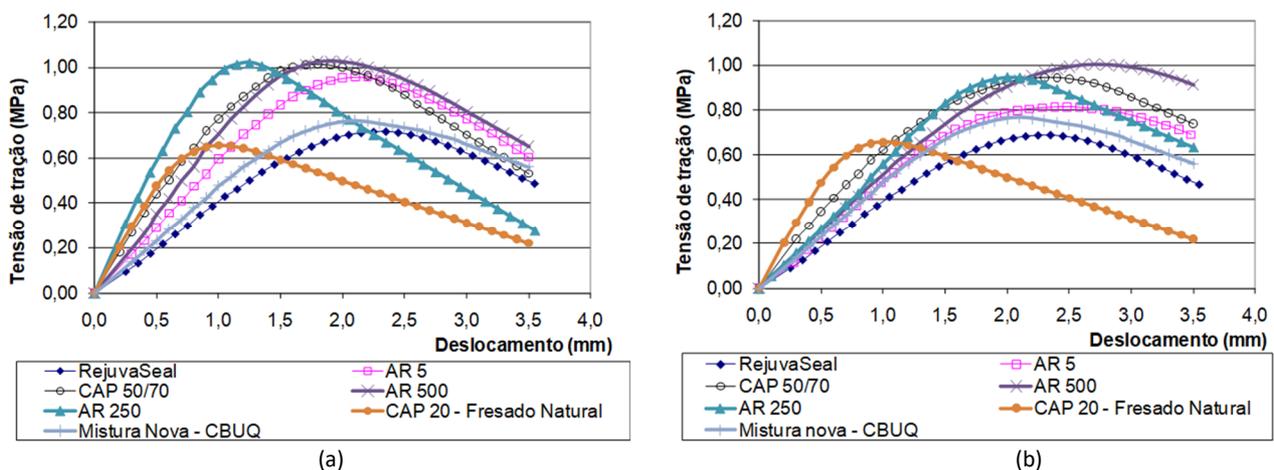


Figura 1. Resistência à Tração para amostras: (a) com 15% e (b) com 20% de rejuvenescedor

Embora a queda de resistência seja um fator negativo, a recuperação da flexibilidade da mistura, por outro lado, é altamente favorável para projetos de pavimentação do ponto de vista de vida de fadiga. Além do mais é desejável que o pavimento não sofra ruptura frágil e brusca após um carregado além do limite de resistência, o que geralmente ocorre com pavimentos em que as misturas são extremamente rígidas. Entretanto, essa análise também dependerá da própria

estrutura do pavimento que terá todas as camadas trabalhando em conjunto para que a estrutura trabalhe em conjunto.

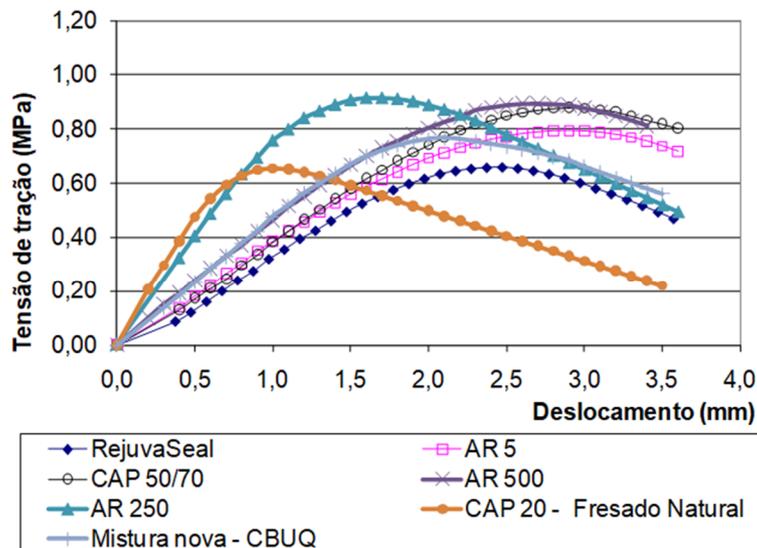


Figura 2. Resistência à Tração para amostras com 25% de rejuvenescedor

Tabela 1 – Resumo dos resultados de Resistência à Tração

Parâmetro	% aditivo	RejuvaSeal	AR-5	CAP	AR-250	AR-500	Mistura nova	Fresado Natural
RT (MPa)	15%	0,70	0,96	1,02	1,02	1,03		
	20%	0,68	0,81	0,95	0,95	1,00	0,77	0,66
	25%	0,65	0,79	0,88	0,91	0,89		

Os ensaios de Resistência não se limitam em determinar um valor numérico. Para misturas que tenham recebido algum aditivo, é interessante verificar o comportamento da ruptura, seja ela dúctil ou frágil. O mecanismo de ruptura dúctil geralmente é melhor, pois uma fratura frágil ocorre subitamente e catastróficamente, sem qualquer aviso, o que é uma consequência da propagação de trincas de maneira espontânea e rápida (Souza, 2010).

Por outro lado, uma fratura dúctil apresenta presença de deformação plástica pós-pico, resistindo por mais tempo antes da falha total do material. Além disso, a energia necessária para induzir a fratura em materiais dúcteis é geralmente maior. Assim os ensaios aqui conduzidos também registraram os deslocamentos durante a ruptura de cada corpo de prova, para evidenciar o comportamento de ruptura das amostras e a energia desprendida durante o processo de ruptura, medida indicativamente pela área sob as respectivas curvas tensão-deslocamento.

A Figura 2 ilustra o mecanismo de determinação de um “indicador de energia de deformação” durante o processo de ruptura das configurações estudadas nesta pesquisa.

Todas as configurações estudadas tiveram calculados os indicadores de energia de deformação durante o processo de ruptura até o deslocamento de 3,5mm para resistência à tração, apresentadas na Tabela 2.

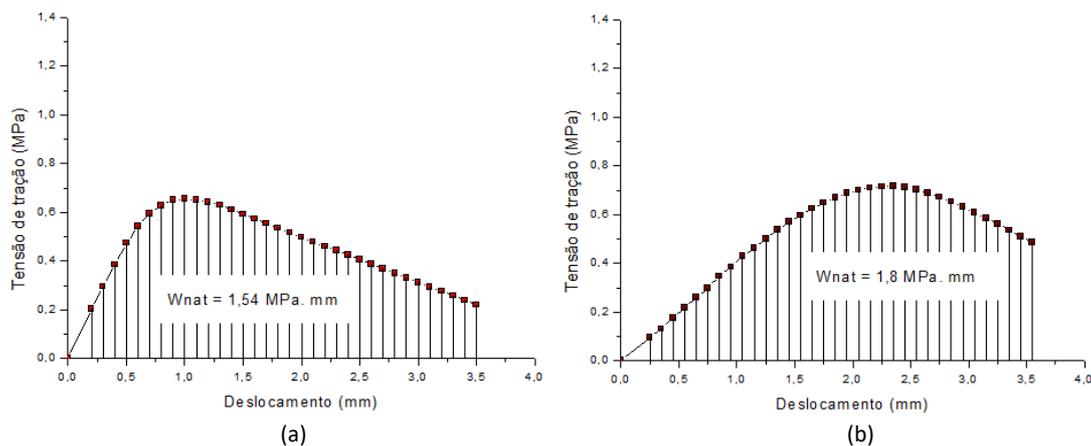


Figura 3. Gráfico de área entre a resistência à tração média versus deslocamento para duas condições avaliadas: (a) Fresado Natural (CAP20), (b) Fresado+15% de RejuvaSeal

Apesar de exibirem valores de Resistência à Tração, da ordem 660 kPa, o que está próximo de uma mistura nova, foi observado durante o teste de ruptura que as amostras de fresado sem adição de rejuvenescedor apresentaram rompimento brusco, ou seja, quando fraturaram, partes da amostra se desprenderam rapidamente do aparato do equipamento.

Tabela 2 – Indicadores de energia de deformação observadas durante o processo de ruptura

Parâmetro	% aditivo	RejuvaSeal	AR-5	CAP	AR-250	AR-500	Mistura nova	Fresado Natural
Indicador de energia de deformação (Mpa.mm)	15%	1,8	2,3	2,5	2,3	2,6	1,9	1,54
	20%	1,7	2,1	2,4	2,2	2,4		
	25%	1,3	1,8	2,1	2,3	2,2		

As demais amostras para as configurações em que foram adicionados aditivos ao material fresado apresentaram ruptura mais dúctil, ou seja, se partiam, mas não desprendiam do aparato, semelhante a uma mistura nova de CBUQ, tendo valores de indicadores de energia de deformação decrescentes com o acréscimo de aditivo. Essa situação pode ser evidenciada nos resultados na Tabela 3, nos quais é possível verificar que o incremento de aditivo na mistura asfáltica para todas as configurações e porcentagens estudadas faz com que haja uma “redução na área da curva” nas respectivas curvas de Resistência à Tração.

4.2. Módulo de Resiliência

O módulo de resiliência foi determinado em corpos de prova moldados em laboratório, e ensaiado a 25°C, segundo a Norma DNIT 135/2018. Conforme preconizado na norma brasileira, em todas as misturas foi utilizada uma carga que em nenhum caso ultrapassou o limite de 25% da Resistência à Tração. Os resultados obtidos para as três misturas analisadas encontram-se resumidos na Tabela 3. Estes valores apresentados são a média aritmética de três corpos de prova (CPs) dentro do intervalo determinado pela distribuição “t” de “Student”.

Tabela 3 – Valores médios dos módulos de resiliência das misturas estudadas.

Parâmetro	% aditivo	RejuvaSeal	AR-5	CAP	AR-250	AR-500	Mistura nova	Fresado Natural
MR (MPa)	15%	2957	4860	4335	5159	5291	5230	2718
	20%	2569	4673	3853	4945	4436		
	25%	2313	4216	3334	4124	4097		

O valor do Módulo de Resiliência é importante enquanto se estuda uma mistura asfáltica para uso em pavimentação. Quando se compara os resultados com o MR de uma mistura nova do tipo CBUQ (5230 MPa) é possível observar que os valores aqui obtidos para as configurações AR-5, AR-250, AR-500 e CAP para adição de 15 ou 20 %, apresentaram-se muito próximos aos valores encontrados na literatura especializada, geralmente na faixa de 3000 a 6000 MPa.

Além disso, nota-se, como no ensaio de Resistência à Tração, o aumento na porcentagem de aditivo adicionado ao fresado fez com que as misturas apresentassem valores de módulos inferiores quando comparados ao valor de referência do material fresado natural. Este comportamento também pode ser explicado pelo fato de que os aditivos recuperaram as frações leves do ligante asfáltico envelhecido, fazendo com que as misturas tornem-se mais flexíveis, o que favorece sua utilização em projetos de pavimentação.

4.3. Vida de Fadiga

Além dos módulos de resiliência, um importante dado utilizado para dimensionamento mecânico de um pavimento é a curva de fadiga, a qual permite prever quantos ciclos de carga determinada estrutura poderá suportar, o que será comparado com o tráfego real previsto para o segmento. De forma geral, a curva de fadiga de cada material pode ser comparada com a de outras misturas para indicar qual das misturas terá melhor comportamento em um pavimento, comparando-se arranjos estruturais iguais e analisando-se as tensões geradas com substituição do material do revestimento em cada caso, representado pelo seu módulo de resiliência.

O ensaio realizado para estimar a vida de fadiga das misturas avaliadas nesta pesquisa consistiu na aplicação de pulsos de carga, com frequência de 1s, sendo 0,1s correspondentes ao tempo de aplicação da carga e seguindo por 0,9s de tempo de descanso. Os carregamentos utilizados foram um percentual da resistência à tração referente a cada mistura (20%, 30% e 40% de RT), devido ao tempo disponível para execução dos ensaios.

Para cada nível de tensão foram ensaiados de três corpos de prova, a depender da dispersão dos resultados. Foram realizados ensaios a tensão controlada, cujo critério de fadiga está associado à fratura total da amostra, em condições térmicas em torno de $25 \pm 0,5$ °C. O desempenho apresentado pelas misturas com adição de 15%, 20% e 25% de aditivos rejuvenescedores, sob esforços repetitivos, pode ser visualizado na Figura 4, Figura 5 e Figura 6 num gráfico log-log. Tem-se nas abscissas a diferença de tensão (diferença entre a tensão de tração e tensão de compressão, ambas solicitadas no centro do corpo de prova) e nas ordenadas o número de solicitações (N).

É possível observar que os resultados aqui apresentados para as três porcentagens de adição de rejuvenescedores possuem baixa dispersão, apresentado R^2 próximos de um. Para a vida de fadiga, as misturas cujos materiais são mais viscosos (AR-250, AR500, e CAP 70-70) apresentam uma tendência de terem maiores valores para as misturas que receberam 20% de aditivo, seguido das misturas com 25% de aditivo, e finalmente aquelas que receberam 15% de rejuvenescedores. Além disso, nota-se que para quaisquer configurações avaliadas, o material com RejuvaSeal ou o Fresado em Estado Natural foram aquelas misturas as quais apresentaram os menores valores de Vida de Fadiga, quando comparadas a uma mistura nova de CBUQ-Faixa C, apesar de estarem aproximados.

Silva (2005) comenta que os compostos aromáticos sofrem com a ação da temperatura e exposição ao ar, fazendo com que sejam condensados (reduzidos), produzindo resinas e parte das resinas produz asfaltenos, formando assim uma mistura bastante instável. Então, é necessário

recuperá-las no intuito de prolongar a vida útil do pavimento, melhorando assim sua vida de fadiga, por exemplo. Além do mais a vida de fadiga em campo é dependente também da rigidez do material, a qual também afeta o nível de tensões que será observado na camada de revestimento em função de sua rigidez relativa comparando-se com as demais camadas que compõem a estrutura do pavimento.

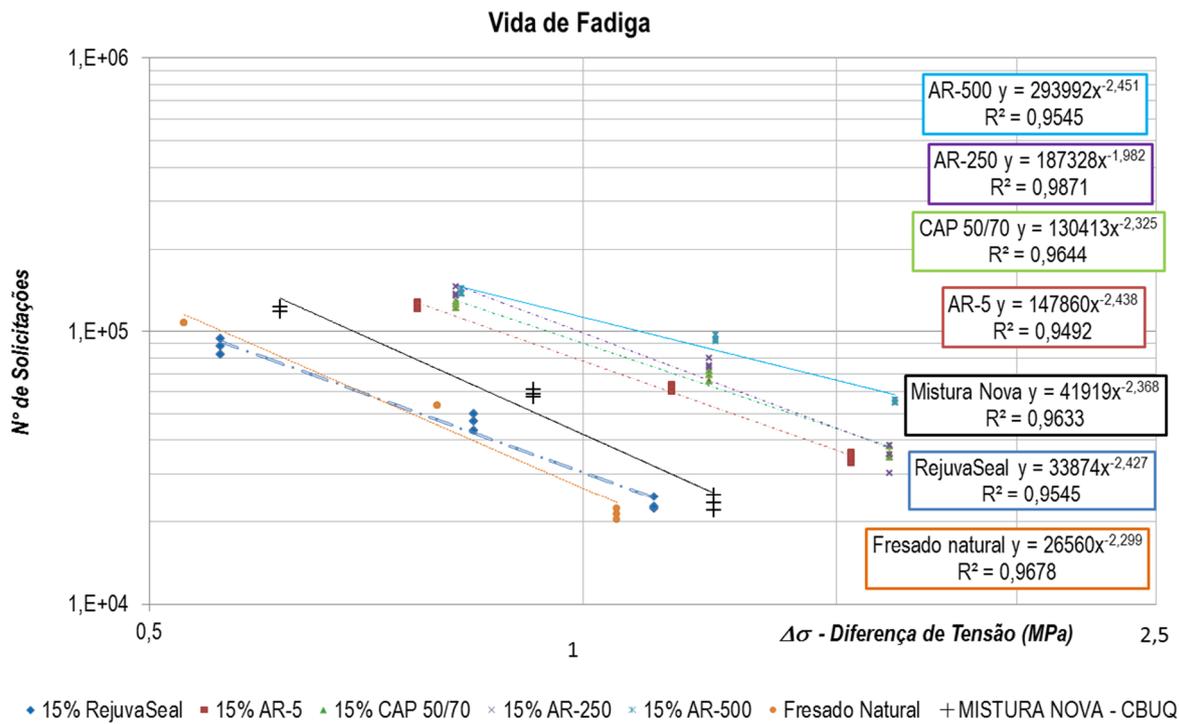


Figura 4. Curvas da vida de fadiga das misturas com 15% de rejuvenescedores

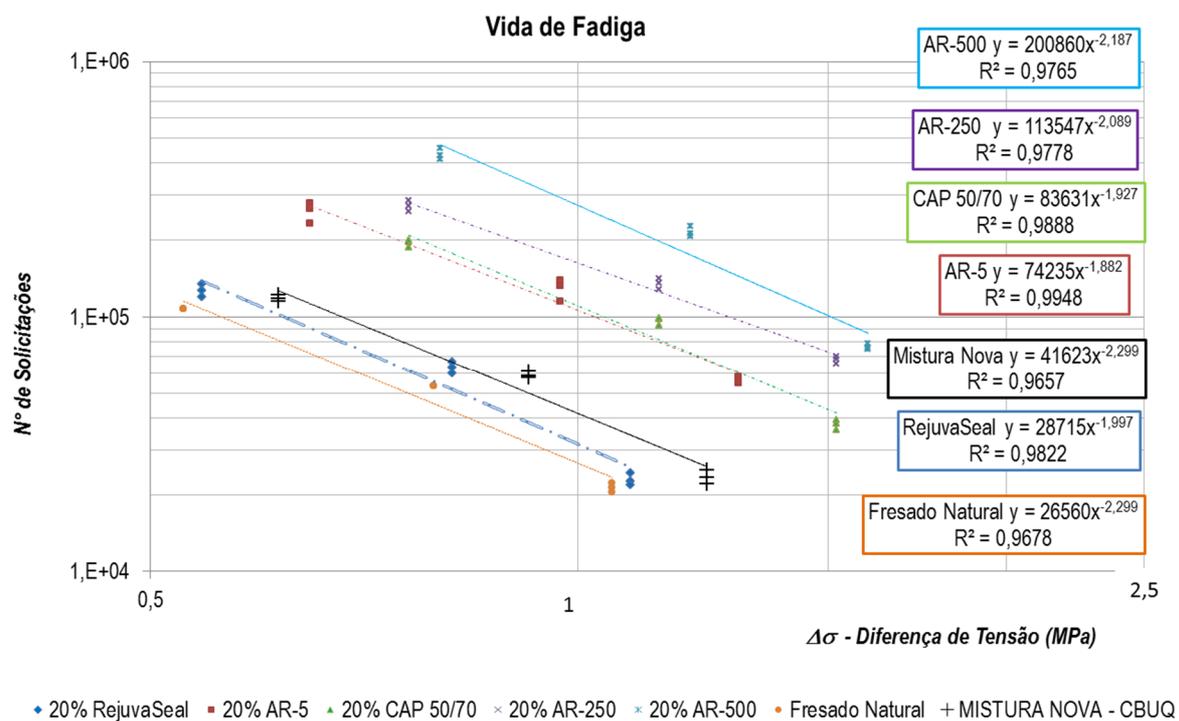


Figura 5. Curvas da vida de fadiga das misturas com 20% de rejuvenescedores

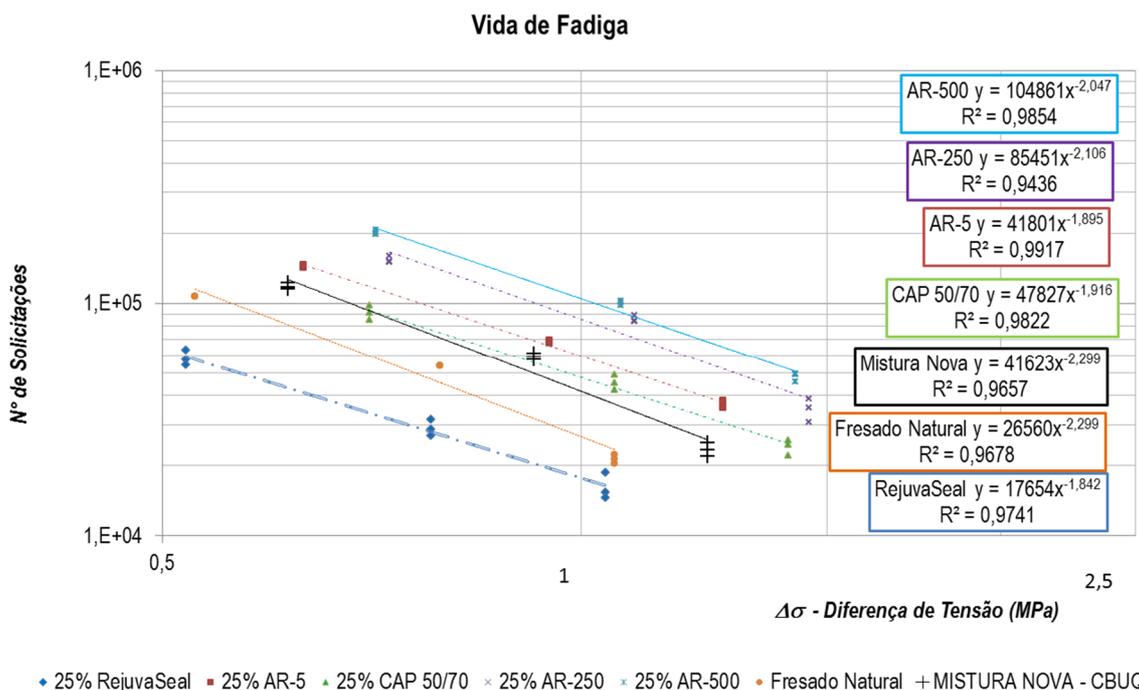


Figura 6. Curvas da vida de fadiga das misturas com 25% de rejuvenescedores

Além disso, em teste de Cromatografia SARA, baseado nos preceitos da Shell (2003), foi observado que a mistura de 20% de AR-5 apresentou o melhor comportamento de após rejuvenescimento: Saturados 8,3% (5 – 20%); Aromáticos 40% (40-65%); Resinas 35% (ná há valor estipulado); Asfaltenos 17% (5 a 27%) e ainda Índice de Instabilidade Coloidal (Ic) de 0,34.

Então, após cruzar os dados de vida de fadiga com os resultados dos ensaios químicos realizados por Silva e Farias (2018), fica evidente que a mistura de 20% de AR-5 é a mistura que tem a melhor vida de Fadiga dentre todas as configurações que tiveram resultados de recuperação das frações SARA. De acordo com os critérios de Glita (1988), o Índice de Instabilidade Coloidal (Ic) que foi enquadrado numa condição muito boa ($0,1 \leq Ic \leq 0,5$), onde quanto maior for Ic, mais estável será o asfalto.

Apesar de observado nesta seção quais as misturas que se comportam mais próximo a um CBUQ – Faixa C, é necessário realizar análises em um sistema de várias camadas, verificando o comportamento estrutural como um todo (revestimento+camadas subjacentes) e avaliando então se esta mistura possui um desempenho satisfatório ou não.

5. CONCLUSÕES

Com exceção do RejuvaSeal, todos os aditivos incorporados ao material fresado produziram misturas com propriedade para utilização em camadas de rolamento que têm como base a Faixa “C” do DNIT.

Foi observado que o acréscimo de aditivo nas misturas fez com que os valores de Resistência à Tração, fossem sensivelmente reduzidos em função da maior flexibilidade das misturas, o que pode ser favorável para projetos de pavimentação, caso isto venha acompanhado de ganho de vida de fadiga.

Outro fato interessante, diz respeito a energia desprendida durante o processo de ruptura dos corpos de prova no ensaio de RT. Os valores indicaram que a adição de rejuvenescedores ao fresado fez com que estas apresentassem ruptura mais dúctil, o que favorece modificar o

material fresado (envelhecido e rígido), num material mais flexível, compatível com o que se espera de uma mistura asfáltica do tipo CBUQ.

A vida de fadiga (N), avaliada para todas as misturas apresentaram baixa dispersão, sendo “N” crescente com a quantidade de aditivo até os limites investigados. Com exceção do Rejuvena-Seal e o material fresado sem adição de qualquer material, todas as demais configurações de material fresado que recebeu aditivos (CAP 50-70, AR-5, AR-250 e AR-500) se mostraram com vida de fadiga superior à de uma mistura nova do tipo CBUQ – Faixa C.

Apesar disso, a única configuração que teve comportamento químico (frações SARA) compatível com um ligante novo do tipo CAP 50-70, foi aquela com 20% de AR-5.

REFERÊNCIAS

- Araújo, M.F.A de S (2012). Efeito da radiação solar no envelhecimento de ligantes asfálticos modificados. Tese de Doutorado em Engenharia Química. Escola de Engenharia. Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte-MG, 104f.
- Castro, L. N. de. (2003). Reciclagem à Frio "in situ" com Espuma de Asfalto. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 171 p.
- CENTOFANTE, R. Estudo laboratorial da utilização de material fresado em misturas asfálticas recicladas a quente. 2016. 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2016.
- CUNHA, C M.(2010) Reciclagem de pavimentos rodoviários flexíveis diferentes tipos de reciclagem. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Julho 2010.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Pavimentos Flexíveis - Concreto Asfáltico. Especificação de Serviço ES-031/2004.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). Manual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos, Rio de Janeiro, 1998.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio - ME136/2018.
- GENNESSEAU, M. M. L.(2015) Avaliação da durabilidade de misturas asfálticas a quente e mornas contendo material asfáltico fresado. 2015. 195 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia dos Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.
- Lima, A.T. (2003). Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente. Dissertação de mestrado em Engenharia de Transportes. Programa de Mestrado em Engenharia de Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 99 fl.
- PRADYUMNA, T. A.; MITTAL, A.; JAIN, P.K. (2013). Characterization of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) for Use in Bituminous Road Construction. 2° Conference of Transportation Research Group of India. Procedia-Social and Behavioral Sciences, v. 104, p. 1149-1157, 2013. DOI: 10.1016/j.sbspro.2013.11.211
- Pinto, S., (1991). Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ.
- Roberts, F.L.; Kandhal, P.S; Brown, R.E.; Lee, D. E Kenned, Y. T. W.(1996). Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction. NAPA, Maryland, USA.
- Shell, (2003). SHELL Bitumen Handbook. SHELL, Inglaterra.
- SHRP (1994) Superior Performing Asphalt Pavements (SUPERPAVE): The Products of the SHRP Asphalt Research Program. Strategic Highway Research Program A-410. National Research Council, Washington, D.C.
- SILVA, J.P.S. (2011). Avaliação dos efeitos de produtos rejuvenescedores em misturas asfálticas. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-067/2011, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 145 p.
- Silva, J.P.S; Farias, M.M. (2018). Avaliação química e ambiental de misturas asfálticas rejuvenescidas. Revista Matéria – UFRJ. V.23 nº03 – 2018. DOI: doi.org/10.1590/s1517-707620180003.0523
- Souza, M.V.R (2010). Efeitos de fibras sintéticas nas propriedades de ligantes e concretos asfálticos. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Programa de Pós-graduação em Geotecnia. Universidade de Brasília. Brasília, 147f.