

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO PERMANENTE E AO DANO POR FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM DOIS LIGANTES MODIFICADOS E UM CONVENCIONAL DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

Andressa Ambrós de Oliveira

Victória Nunes Ramos

Chaveli Brondani

Évelyn Paniz Possebon

Luciano Pivoto Specht

Deividi da Silva Pereira

Universidade Federal de Santa Maria

Grupo de Estudo e Pesquisa em Pavimentação e Segurança Viária

RESUMO

A avaliação de ensaios laboratoriais de resistência a deformação permanente em trilha de roda, bem como da resistência ao dano por fadiga, é de suma importância para contribuir com os estudos que buscam minimizar esses defeitos tão comumente encontrados nas rodovias brasileiras. Tais mazelas reduzem consideravelmente a segurança do usuário, bem como causa uma degradação acelerada da estrutura do pavimento. Essa pesquisa tem o objetivo de comparar a resistência a deformação permanente de três misturas asfálticas, diferenciadas pelo uso de ligante convencional e modificado, comumente usadas em revestimentos asfálticos do estado do Rio Grande do Sul. Percebeu-se que a mistura asfáltica composta pelo ligante modificado AMP 60/85 apresentou os melhores resultados em critérios de vida à fadiga quando comparados as demais misturas asfálticas. Todavia, na avaliação quanto a deformação permanente, a mistura com ligante convencional suportou um maior número de ciclos, em relação as outras duas modificadas.

ABSTRACT

The evaluation of laboratory tests for resistance to permanent deformation on wheel rail as well as resistance to fatigue damage is important to help studies that search minimize that defects usually found on Brazilian highways. That problems reduces considerably the user safety as well as cause a quickly degradation of the pavement structure. This research whats to compare the resistance to permanent deformation of three asphalt mixtures differentiated by the use of conventional and modified asphalt binder, commonly used in coatings asphalt in the state of Rio Grande do Sul. It was noticed that the asphalt mixture made by the modified binder asphalt AMP 60/85 presented the bester results in terms of fatigue life when compared with other asphalt mixtures. However, in an evaluation relating to a permanent deformation, a conventional mixture has supported a bester number of cycles than the other two modified binder asphalts.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento da frota de veículos nas rodovias brasileiras demonstra a importância do transporte rodoviário na economia e organização social do país, sendo indispensável o correto dimensionamento e especificação de materiais para proporcionar o conforto, durabilidade e segurança aos usuários.

Os tipos de defeitos mais frequentes encontrados em pavimentos asfálticos no Brasil são o trincamento por fadiga e a deformação permanente. Segundo Mahmoud e Bahia (2004), a deformação permanente nos revestimentos asfálticos é caracterizada por depressões longitudinais nas trilhas de roda, as quais aumentam com a solicitação das cargas repetidas impostas pelo tráfego de veículos. Trata-se de um problema observado principalmente em lugares de clima tropical, onde a temperatura dos pavimentos asfálticos chega a ultrapassar 60°C, cenário não incomum no Brasil. Já Nascimento (2015), comenta que o trincamento por fadiga é o principal defeito dos pavimentos de concreto asfáltico no Brasil, sendo caracterizado por trincas induzidas por carregamento repetido do tráfego incidente no pavimento.

Diante destes fatos, percebe-se a importância de pesquisas que busquem materiais ou combinações que retardem e/ou amenizem estes defeitos. De acordo com Yildirim (2005), variados estudos abordaram a modificação de ligantes asfálticos com utilização de diversos tipos de aditivos. Essas modificações visam a melhoria de propriedades da mistura asfáltica tais como: resistência à deformação permanente, resistência à fadiga, resistência ao trincamento térmico, resistência ao dano por umidade (melhoria da aderência na interface agregado-ligante) e melhoria da afinidade química também.

Este trabalho, possui como objetivo principal a comparação de três misturas asfálticas, duas modificadas e uma convencional, no que diz respeito a avaliação quanto a resistência a deformação permanente e resistência ao dano por fadiga.

2. METODOLOGIA

Este capítulo descreverá os materiais e métodos empregados na pesquisa, como as características dos agregados e ligantes asfálticos, bem como os procedimentos laboratoriais necessários para atingir o objetivo de avaliar as misturas quanto a deformação permanente e o dano por fadiga. Os ensaios foram realizados no LMCC (Laboratório de Materiais de Construção Civil), da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

2.1. Materiais utilizados

Foram utilizadas três misturas diferentes, compostas do mesmo esqueleto pétreo e diferentes ligantes asfálticos.

Os agregados são provenientes do município de Itaara, no Rio Grande do Sul, fornecidos pela empresa Della Pasqua Engenharia e Construções LTDA. Foram utilizadas as frações brita 3/4, brita 3/8, pó de pedra e cal calcítica.

As misturas são diferenciadas pelo tipo de ligante asfáltico utilizado, um convencional e dois modificados. O CAP convencional, 50/70, é proveniente da refinaria REFAP (Refinaria Alberto Pasqualini). Quanto aos modificados, um é por polímero, AMP 60/85, proveniente da empresa Triunfo Concepa e o outro é por borracha, AMB - 08, fornecido pela empresa Della Pasqua. Os três ligantes asfálticos são oriundos do estado do Rio Grande do Sul. As especificações dos ligantes constam na tabela 1.

Tabela 1: Especificação dos ligantes utilizados na pesquisa.

PROPRIEDADE/UNIDADE	LIGANTES MODIFICADOS			LIGANTE CONVENCIONAL	
	NORMA	AMP 60/85	AMB 08	MÉTODO	50/70 REFAP
Penetração (0,1mm)	NBR 6576	58	50	D 5	57
Ponto de Amolecimento (°C)	NBR 6560	67	58	D 36	48,6
Viscosidade Brookfield a 135°C	NBR 15184	918	-	D 4402	300
Viscosidade Brookfield a 150°C	NBR 15184	437	-	D 4402	156
Viscosidade Brookfield a 177°C	NBR 15184	153	-	D 4402	60
Viscosidade Brookfield a 175°C	NBR 15529	-	1618	D 5	65
Ponto de Fulgor (°C)	NBR 11341	>236	>240	D 92	>236
Densidade relativa a 20/4 °C	NBR 6296	1,00	1,01	D 70	1,00

Fonte: (Adaptado de DNIT 095/2006 – EM, Laudos Betunel e Laudos Della Pasqua).

As misturas asfálticas estudadas nesta pesquisa foram realizadas com diferentes ligantes asfálticos, descritos anteriormente, com o mesmo esqueleto pétreo, com TMN (Tamanho

Máximo Nominal) de 19mm, e adição de 2% de cal, valor geralmente adotado nos projetos do RS. Ademais, utilizou-se uma curva granulométrica, enquadrada na Faixa C do DNIT e atendendo aos parâmetros Bailey. Segundo o Asphalt Institute (2011) a mistura analisada é considerada miúda pois 5,7% do material é passante na peneira 4,75mm, que é a peneira controle para este TMN.

Diante disso, e depois de ajustes para melhor enquadramento na Faixa C do DNIT, a proporção de agregados ficou definida em 29% de brita 3/4", 23% de brita 3/8", 46% de pó de pedra e 2% de cal. O teor de CAP de projeto foi definido pela metodologia Superpave (SHRP, 1994). A curva da composição granulométrica pode ser visualizada na Figura 1.

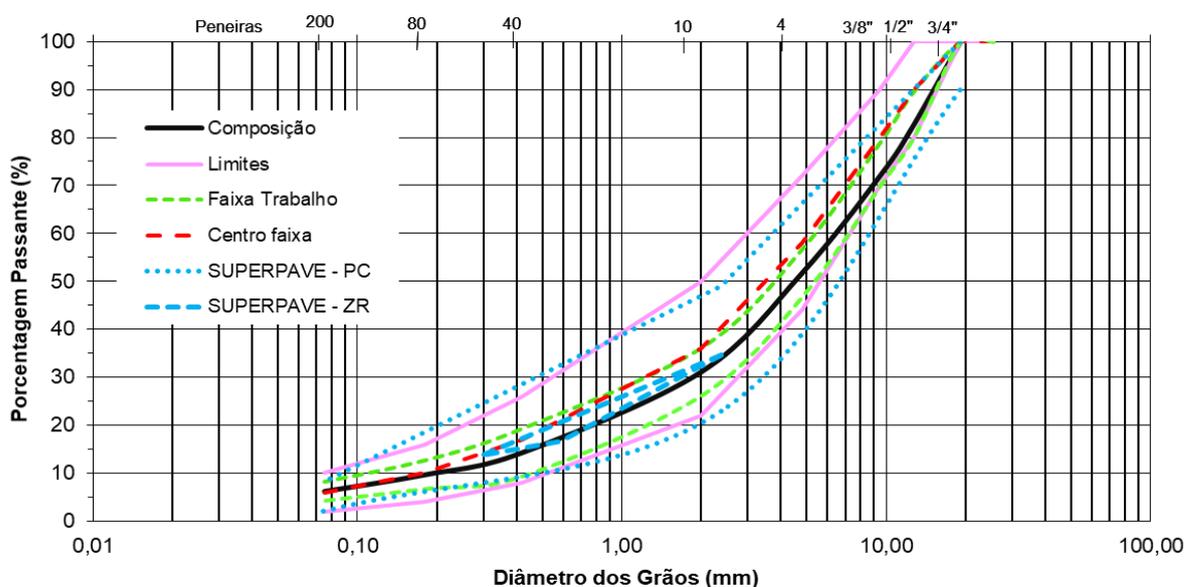


Figura 1: Curva da composição granulométrica - Faixa C DNIT-ESP 031/2006.

Para a dosagem dos corpos de prova foi usado o misturador *Infratest testing system*, afim de obter uma mistura mais homogênea e posteriormente foram moldados segundo a metodologia Superpave, no equipamento CGS, compactador giratório Superpave. Foi adotado um número de giros igual a 100, que corresponde a vias de tráfego médio a alto. Com o intuito de determinar o teor de projeto de ligante asfáltico foram moldados quatro teores por mistura, 5,0%, 5,5%, 6,0% e 6,5% com três corpos de prova por teor. Além disso, foi separado uma quantia de 1500 gramas de massa sem compactar para realização do Rice test, para definição da densidade máxima medida (DMM).

A definição do teor de ligante foi realizada por tentativas, com o objetivo de atingir o volume de vazios (VV) de 4% nas duas misturas. Os resultados obtidos para o teor de ligante de projeto estão na Tabela 2, assim como os valores calculados de teor de ligante absorvido e efetivo, VAM (Vazios do agregado mineral), RBV (Relação betume-vazios) e MEA (Massa Específica Aparente) para estes teores. Vale ressaltar que a única variação controlada entre as misturas é o tipo de ligante e seu teor.

De acordo com os critérios da dosagem Superpave, para um volume de vazios de 4%, o valor de VAM deve ser maior que 13% para um TMN de 19mm e RBV entre 65 a 75%. Para todas as misturas os valores de RBV ficaram acima da faixa estipulada, fato que deve ser relativo ao

tipo de agregado utilizado nas misturas, motivo de pesquisas futuras. Os teores de projeto ficaram com valores próximos, o que já era esperado pois a composição granulométrica dos agregados seguiu exatamente o mesmo escopo, variando apenas o tipo de modificador do ligante asfáltico.

Tabela 2: Teor de projeto de ligante asfáltico

Mistura	Teor de ligante de projeto (%)	Teor de ligante absorvido (%)	Teor de ligante efetivo (%)	VAM (%)	RBV (%)	MEA (g/cm ³)
AMP 60/85- E	5,88	0,41	5,86	18,1	77,9	2,263
ECOFLEX B-3G	5,60	0,41	5,58	17,5	77,2	2,277
50/70 REFAP	5,72	0,41	5,70	17,6	77,3	2,274

2.2 Ensaios laboratoriais

De forma a satisfazer os objetivos propostos, foi feita a dosagem das misturas asfálticas para posterior moldagem dos corpos de prova e realização dos ensaios. Para averiguar a deformação permanente as amostras foram submetidas ao ensaio de Flow Number e para avaliar o dano por fadiga foi realizado o ensaio de Fadiga Tração-compressão Uniaxial.

2.2.1. Resistência à deformação permanente

O ensaio uniaxial de carga repetida, com parâmetro Flow Number, objetiva avaliar a resistência das misturas asfálticas a deformações permanentes baseado em cargas repetidas. Ele segue a Norma Brasileira ABNT NBR 16505:2016 e é realizado na prensa Universal Testing Machine (UTM) da IPC Global.

Para realização do ensaio, são moldadas três amostras de $150 \pm 2,5$ mm de altura e 102 ± 2 mm de diâmetro. Também, é respeitado o limite de volume de vazios, entre 6,5% e 7,5%. O ensaio consiste na aplicação de pulsos de carga cíclica repetidas, de 204kPa e frequência de 1 Hz, na direção axial das amostras, em um tempo de pulso de 0,1s e repouso de 0,9s.

Antes de iniciar o ensaio, os Corpos de Prova ficam condicionadas a uma temperatura de 60°C por pelo menos 5 horas. Na prensa, o corpo de prova é posicionado de maneira que na parte superior sejam colocados dois LVDTs para mensurar os deslocamentos verticais gerados pelo carregamento axial cíclico de compressão.

O ensaio finda quando o número de ciclos da mistura chegar a 10000 ou quando atinge 5% de deformação. Este último caso ocorre quando a deformação de cisalhamento inicia a volume constante, ou seja, é o ponto em que há um aumento rápido da deformação permanente acumulada na amostra, ou ainda, é a transição da zona secundária para a zona terciária. Na Figura 2 é possível visualizar a curva de deformação permanente acumulada para o ensaio uniaxial de cargas repetidas e a amostra na prensa, antes e depois da deformação.

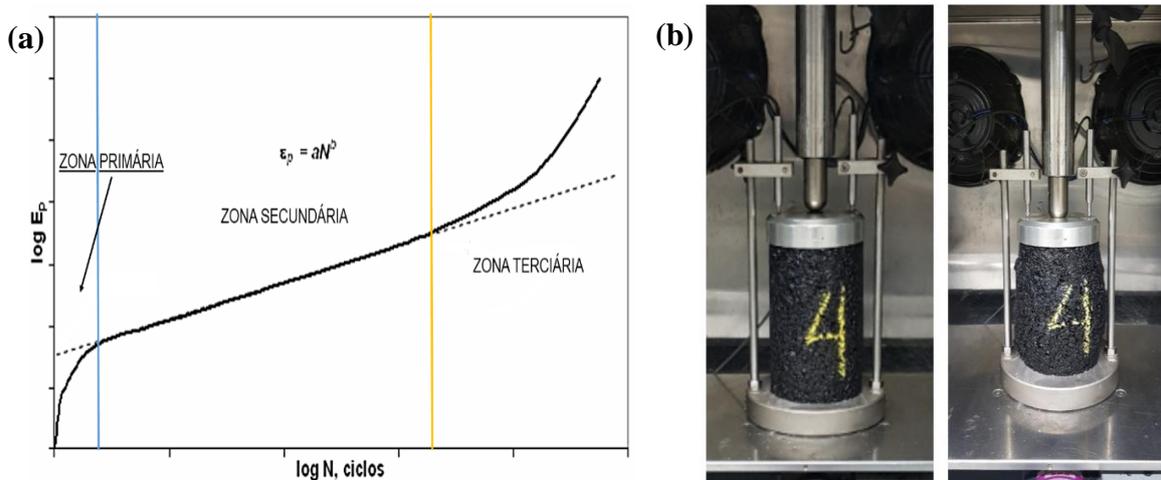


Figura 2: Curva de deformação permanente acumulada para o ensaio de FN (a) e Amostra antes do ensaio de Flow Number, à esquerda. CP deformado, à direita (b).

2.2.2. Resistência ao dano por fadiga

O ensaio de Fadiga Tração – Compressão Uniaxial segue as prescrições da norma AASHTO TP 107-14 e também é realizado na prensa UTM -25. O ensaio consiste em aplicar no corpo de prova uma deformação cíclica senoidal, de amplitude constante, até que ocorra a ruptura ou a queda do ângulo de fase.

As amostras foram moldadas no compactador giratório Superpave (CGS) nos teores de projeto determinados pela dosagem Superpave nas dimensões de 10x16cm e com volume de vazios de $5,5\% \pm 0,5\%$. Foi feita a retificação nas superfícies, de modo a buscar uma melhor aderência entre o corpo de prova e o equipamento. As dimensões finais das amostras, após retificação, ficaram iguais a 10x13cm. Em seguida, as amostras foram coladas com cola epoxídica, de alta resistência e baixa plasticidade, nas placas top e down, aproximadamente 1mm de cola, e conectadas à UTM-25 utilizando parafusos e rótula de tração. O procedimento de colagem foi feito com auxílio do gabarito para que o topo e a base do CP ficassem alinhados com o aparato. As amostras ficaram entre 20 e 24 horas no gabarito. Na Figura 3 está apresentado o aparato de ensaio, que foi desenvolvido por Boeira (2018) durante sua tese de doutorado.

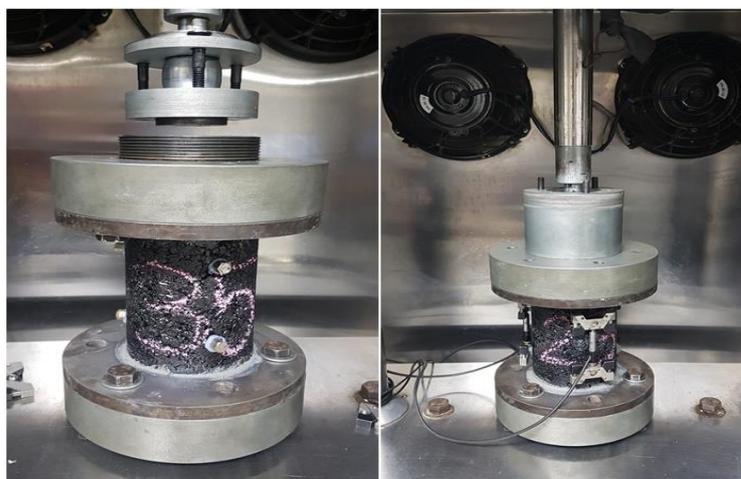


Figura 3: Equipamento para ensaio de fadiga.

Os ensaios foram realizados a uma frequência de 10Hz e temperatura de 19°C variando a amplitude de deformação (entre 150 a 300 μ S), buscando atingir a ruptura em um intervalo entre 1000 a 100000 ciclos.

A execução do ensaio, que segue os protocolos S-VECD desenvolvido por Daniel & Kim (2002), consiste em duas fases. Inicialmente, foi feito um *fingerprint*, que consiste na aplicação de um pequeno carregamento, provocando deformações de cerca de 50 a 75 μ S, medido nos LVDTs acoplados ao corpo de prova, em cada amostra, para determinar o módulo dinâmico nas condições do ensaio de fadiga. Em seguida, as amostras foram submetidas ao ensaio de fadiga, em que o atuador é programado para chegar a um deslocamento de pico constante em cada ciclo de carga até atingir o colapso. Após esses procedimentos, os dados dos ensaios são submetidos à uma rotina matemática no Software MATLAB, com sequência de código desenvolvida pela Universidade Federal do Ceará (UFC).

Uma das principais vantagens do S-VECD, de acordo com Nascimento et al. (2014), é a obtenção da propriedade de dano das misturas, independentemente das condições de ensaio. Dessa forma, o número de amostras é reduzido, pois ensaios feitos em uma condição específica, permitem a obtenção do comportamento do material em diversas outras condições. Babadopulos (2014) explica de forma prática a aplicação do S-VECD em misturas asfálticas, nos mesmos moldes em que foi aplicado nesta pesquisa, com deformações que correspondem a distância entre um pico e um vale do carregamento senoidal.

Para esta pesquisa as deformações escolhidas para calcular o número de ciclos até a falha (Nf) foram as obtidas pela simulação de um pavimento no Software AEMC-Sispav, que é um aplicativo de análise elástica para estruturas de múltiplas camadas.

Para análise no AEMC, as três misturas foram simuladas com a mesma espessura de camadas e valores de módulos, exceto o valor do módulo do revestimento asfáltico que mudou conforme a mistura. Considerou-se as camadas do pavimento como sendo não aderidas entre si, carga de eixo duplo igual a 8200kgf e pressão de inflação dos pneus igual 0,56MPa e raio do carregamento de 10,79m. Ainda, o pavimento proposto possui 4 camadas, sendo que o revestimento asfáltico tem 10cm de espessura, a base considerada de brita graduada simples (BGS) 15cm, a sub-base de macadame seco (MS) 20cm e o subleito de solo considerado infinito. Os valores dos módulos da camada superior utilizados foram os Módulos dinâmicos, a 25°C e 10Hz, de cada mistura obtidos pelos ensaios de Módulo Complexo, realizados por Oliveira (2019) e Possebon (2018). Os valores de MR adotados para as camadas de base e sub-base são a média dos resultados encontrados por Ribas (2014). O valor de módulo do subleito adotado foi encontrado por Santos (2015) para os solos da região central do Rio Grande do Sul. Para o coeficiente de Poisson os valores utilizados foram os sugeridos por Balbo (2007): 0,35 para o revestimento; 0,30 para a camada de base; 0,42 para a camada de sub-base; 0,45 para o subleito.

As deformações de tração na estrutura do pavimento foram analisadas na fibra inferior do revestimento asfáltico, a uma profundidade igual a 0,099m, ou seja, 0,001m antes do fim desta camada asfáltica. O valor escolhido dentre os pontos analisados foi o que teve a maior tensão de tração e, para as três misturas simuladas, esses valores foram encontrados no ponto imediatamente abaixo da roda (cr). A tabela 3 apresenta os resultados de deformação de tração no fundo do revestimento com os valores de $|E^*|$.

Tabela 3: Resultados de ϵ_t (μS) no fundo do revestimento simulando o pavimento no AEMC com os $|E^*|$ das misturas.

MISTURA	$ E^* $ @ 25°C e 10Hz (MPa)	ϵ_t no fundo do revestimento (μS)
AMP 60/85	8272	-201
AMB 08	9150	-193
CAP 50/70 REFAP	7074	-238

De forma a analisar os resultados obtidos no ensaio de fadiga tração-compressão, foi utilizada a Equação 1, proposta por Nascimento (2016). Esta equação abrange todos os parâmetros do ensaio de fadiga, o que torna o Nf (vida de fadiga) próximo da realidade de campo. Os dados de entrada para o conjunto de Equações de 1 a 5 são retirados dos resultados dos ensaios refinados pela rotina do MATLAB.

$$Nf = \left(\frac{\delta}{Y \left(\frac{C_{12}}{p} \right) + 1} \right)^{\frac{1}{\Delta + 1 - \left(\frac{C_{12}}{p} \right)}} \quad (1)$$

Onde:

$$\delta = \frac{1}{2} (\epsilon^R_{TA})^2 C_{11} \left(\frac{(p(C_{11}C_{12}))^\alpha (\epsilon^R_{TA})^{2\alpha}}{f_R^{2\alpha}} \right)^{\left(\frac{C_{12}}{p} \right)} \quad (2)$$

$$\epsilon^R_{TA} = \frac{1}{E_R} \frac{\beta + 1}{2} \left((\epsilon_{0,pp})_i |E^*|_{LVE} \right) \quad (3)$$

$$p = \alpha - \alpha C_{12} + 1 \quad (4)$$

$$Gr = Y(Nf)^\Delta \quad (5)$$

As variáveis do conjunto de equações representam:

- ϵ^R_{TA} : amplitude da pseudo-deformação;
- α : taxa de evolução do dano;
- C_{11} e C_{12} : coeficientes da curva CxS média das amostras;
- f_R : Frequência reduzida;
- Gr : taxa de variação média da energia de pseudo deformação liberada (por ciclo) durante todo o ensaio;
- Nf : número de ciclos até a falha;
- Y : coeficiente do critério de ruptura da curva Gr versus Nf ;
- Δ : expoente da equação Y ;
- $C(S)$: integridade do material ou a pseudo rigidez;
- S : parâmetro de dano;
- $\epsilon_{0,pp}$: amplitude de deformação pico a pico;
- β : parcela do ciclo em que ocorre tensão de tração (o valor usual é -0,08 e na prática significa que ocorre compressão em 8% do ciclo);
- $|E^*|_{LVE}$: módulo dinâmico viscoelástico linear nas condições de temperatura e frequência do ensaio.

Utilizando as deformações encontradas no AEMC para encontrar o Nf referente a cada mistura, de acordo com os valores obtidos da equação proposta por Nascimento (2016), foi possível ranquear as misturas quanto a fadiga.

3. RESULTADOS

Neste tópico, os resultados dos ensaios laboratoriais realizados nas três diferentes misturas são descritos e comparados.

3.1 Flow Number

Através do Modelo de Francken, foram obtidos os resultados de FN para as 3 misturas analisadas. Na Tabela 4 esses resultados estão representados, bem como os parâmetros do modelo utilizado, os coeficientes de variação (CV), os desvios padrões (DV), e o VV de cada corpo de prova.

Tabela 4: resultados de FN, VV, DP, CV e parâmetros do modelo de Francken.

MISTURA	CP	VV (%)	FN	FN médio	DP	CV (%)	Coeficientes do modelo de Francken			
							A	B	C	D
AMP 60/85	21	6,57	172	158	20,51	12,98	472,53	0,66	189,31	0,01
	27	6,97	144				535,07	0,68	29,39	0,02
AMB 08	30	6,59	120	124	9,29	7,47	390,82	0,74	31,78	0,02
	13	6,71	118				400,55	0,74	47,13	0,02
	02	6,68	135				459,35	0,71	22,14	0,02
CAP 50/70 REFAP	1	6,43	184	176	16,52	9,39	869,20	0,56	391,96	0,01
	2	6,46	187				655,10	0,61	123,26	0,01
	3	7,25	157				904,81	0,57	161,37	0,01

Quanto aos critérios de parada do ensaio, nenhuma das amostras ensaiadas na pesquisa suportou 10000 ciclos, todas foram finalizadas ao atingirem 5% de deformação.

Observa-se que dentre as misturas modificadas, a com adição de polímero tem uma leve supremacia quanto a modificada por borracha. Todavia, as duas misturas modificadas aguentaram um número de ciclos inferior à mistura com CAP convencional. Tal condição não era esperada, uma vez que para FN, ligantes modificados geralmente apresentam resultados maiores que os CAPs convencionais. Com isso, é possível inferir que as três misturas estão adequadas para os limites de tráfego médio (FN<100) proposto por Bastos (2017) e não atingiram o limite mínimo para tráfego médio (FN<300) conforme Nascimento (2008) e Faccin (2018).

Pode ser possível que devido ao fato das misturas com ligantes modificados estudadas terem exatamente as mesmas características da mistura convencional, alterando apenas o tipo de ligante e ainda os teores de projeto encontrados possuírem diferenças mínimas entre si, os valores de FN não tiveram muita discrepância.

3.2 Fadiga Tração - Compressão Uniaxial

Através da rotina no MATLAB, para considerar o S-VECD foram geradas, primeiramente, curvas de módulo dinâmico e ângulo de fase versus o número de ciclos para cada amostra, de forma a verificar o ciclo de ruptura da amostra. Observou-se então que o módulo dinâmico tem uma queda nos valores enquanto o ângulo de fase sobe até o pico e sofre uma queda súbita, que caracteriza a ruptura. O número de ciclos no pico do ângulo de fase é determinado como o valor de Nf.

O procedimento seguinte é obter a curva C versus S, que é uma curva característica do material, também através do MATLAB. Com os valores de integridade do material (C) versus acúmulo de dano (S) é possível gerar curvas, as quais devem se sobrepor mesmo quando aplicadas deformações diferentes no ensaio, fato este que foi observado para as três misturas da pesquisa.

Para o conjunto de curvas de cada corpo de prova da mistura foi feito um *fitting*, para obter a curva característica da mistura, como é apresentado na figura 4. A equação do modelo de potência (Power Law), ou curva *fitting* característica do material, é do tipo $C=1-C_{11}*S^{C_{12}}$, onde C11 e C12 são as constantes de regressão. Essas constantes são utilizadas, assim como os outros parâmetros descritos na metodologia, para calcular resultado de Nf com o modelo proposto por Nascimento (2016).

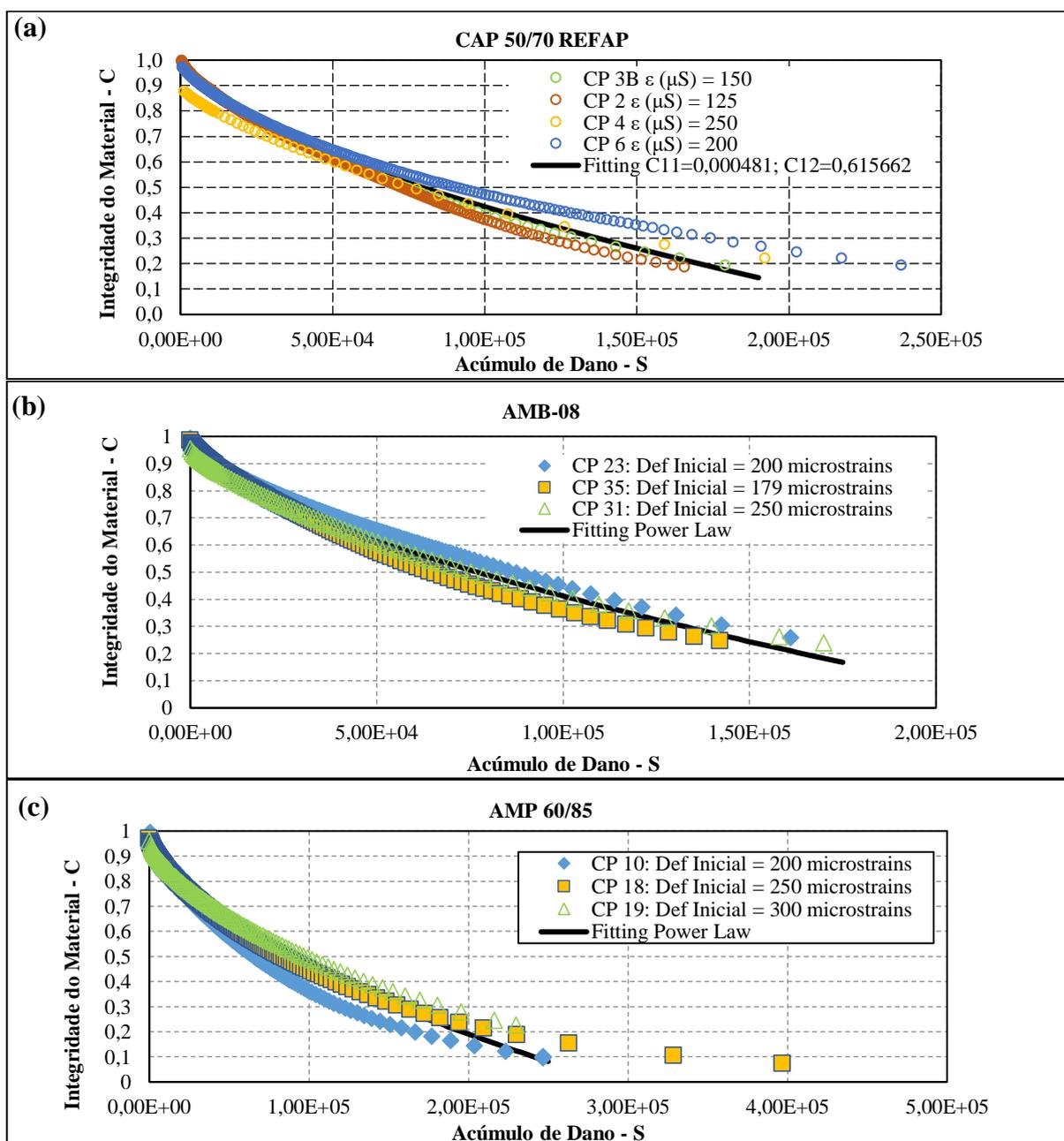


Figura 4: *Fitting* das misturas: (a) CAP 50/70 REFAP, (b) AMB-08 e (c) AMP 60/85.

Também, foi utilizado como critério de falha por fadiga, a taxa de variação média de energia de pseudo deformação liberada por ciclo de ensaio (G^R), desenvolvida por Sabouri e Kim (2014). Esse critério gera as envoltórias de ruptura G^R vs N_f que são ajustadas por um modelo de potência do tipo $G^R = Y * N_f^\Delta$, onde Y e Δ são os coeficientes do critério de ruptura.

Os parâmetros C11, C12 (retirados do *fitting* das curvas CxS), os coeficientes Y e Δ das envoltórias de ruptura G^R versus N_f , $|E^*|_{lve}$ (módulo dinâmico viscoelástico linear obtido no ensaio finger print) e α (taxa de evolução do dano), foram utilizados para calcular o N_f , pela Equação 1, de cada mistura e estão na Tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros C11, C12, Y , Δ , α e $|E^*|_{lve}$ utilizados para calcular N_f pela equação de Nascimento (2016).

Mistura	Fitting curvas CxS		Índices curvas $G^R \times N_f$		α	$ E^* _{lve}$ (kPa)
	C11	C12	Y	Δ		
AMP 60/85	0,0008206	0,564795	399382,37	-1,40	3,042854	10188,89
AMB 08	0,0004631	0,620724	467832522,7	-1,71	3,079726	9515,874
CAP 50/70 REFAP	0,0004812	0,615662	60000000,0	-1,462	3,277240	9906669,00

Após a aplicação das equações de Nascimento (2016) e utilizando as deformações obtidas no AEMC, têm-se os valores de N_f calculados para cada mistura, como consta na Tabela 6.

Tabela 6: Resultados de N_f e ranking das misturas quanto a fadiga.

Mistura	σ_t AEMC (μS)	N_f (calculado pela Equação 1)	Ranking	Porcentagem em relação ao primeiro do ranking
AMP 60/85	201	26551	1º	100%
AMB 08	193	17745	2º	67%
CAP 50/70 REFAP	238	12723	3º	48%

Percebe-se que no critério relativo a resistência a fadiga, as misturas com ligantes modificados tem melhores resultados comparados à de ligante convencional e dentre as duas modificadas, a que tem uma melhor avaliação quanto ao dano por fadiga é a mistura modificada por polímero.

4. CONCLUSÕES

O estudo de comparação de diferentes misturas asfálticas em que a única variável é o tipo de ligante asfáltico é de suma importância para o desenvolvimento de melhorias nos pavimentos brasileiros, uma vez que o ligante asfáltico tem ligação direta com o desempenho das misturas asfálticas. Com essa pesquisa foi possível reunir informações quanto a influência de ligantes modificados e convencional na resistência a deformação permanente e ao dano por fadiga das misturas asfálticas.

Com relação a deformação permanente, a mistura CAP 50-70 REFAP aguentou o maior número de ciclos de FN, seguida pela AMP 60/85 e depois pela AMB 08. Todavia, nenhuma das misturas atingiu os critérios de tráfego médio propostos por Nascimento (2008) e Faccin (2018), FN=300, apenas atingiram o limite de tráfego médio proposto por Bastos (2017), que é FN<100.

Também, a classificação da vida à fadiga pelas equações de Nascimento (2016), traz as misturas com ligantes modificados ocupando as melhores posições do Ranking, mais especificamente, AMP 60/85, AMB 08 e por último CAP 50/70 REFAP. Fato este que pode estar relacionado à

influência do tipo e teor de ligante asfáltico, uma vez que as misturas foram executadas com o mesmo esqueleto pétreo e curva de composição granulométrica.

Apesar dos resultados da pesquisa serem satisfatórios, para obter resultados em laboratório o mais próximo possível das condições de campo, seria interessante analisar o comportamento dessas misturas aplicadas em trechos experimentais de pavimentos, onde pudessem ser testadas situações cotidianas de tráfego e clima.

Agradecimentos

Os autores agradecem as seguintes instituições, que financiaram ou auxiliaram no desenvolvimento desta pesquisa: Petrobras, Laboratório de materiais de construção civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), CAPES, CNPq e Programa de pós-graduação em Engenharia Civil da UFSM.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO TP 107-14 (2016). Standard Method of Test for Determining the Damage Characteristic Curve of Asphalt Mixtures from Direct Tension Cyclic Fatigue Tests. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C.
- ABNT (2016) NBR 16505 - Misturas Asfálticas - Resistência à Deformação Permanente Utilizando o Ensaio Uniaxial de Carga Repetida. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ASPHALT INSTITUTE. (2011) The Bailey Method Achieving Volumetrics and HMA Compactibility. Asphalt Institute, Lexington KY USA.
- BABADOPULOS, L. F. A. L. (2014) A contribution to couple aging to hot mix asphalt (HMA) mechanical characterization under load-induced damage. M.Sc. Thesis, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- BALBO, T. J. Pavimentação Asfáltica. Materiais, projeto e restauração. 1º Ed, 3ª reimpressão. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2007.
- BASTOS, J. B. S.; SOARES, J. B. e NASCIMENTO, L. A. H. (2017) Critérios para os resultados do ensaio uniaxial de carga repetida de misturas asfálticas em laboratório a partir do desempenho em campo. Revista Transportes, v. 25, n. 2.
- BOEIRA, F. D. (2018) Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas com ligantes modificados. Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- DANIEL, J. S., KIM, Y. R. (2004) Development of a simplified fatigue test and analysis procedure using a viscoelastic, continuum damage model (with discussion). Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists Volume: 71 Technologists (AAPT) ISSN: 0270-2932.
- FACCIN, C. (2018) Concretos asfálticos em utilização no rio grande do sul: comportamento mecânico e desempenho em campo quanto à deformação permanente Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria.
- MAHMOUD, A. F. F.; BAHIA, H. Using the gyratory compactor to measure mechanical stability of asphalt mixtures. Wisconsin highway research program 0092-01-02, Madison, Wisconsin, EUA, 2004.
- NASCIMENTO, L. A. H. (2008) Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso compactador giratório e foco na deformação permanente. 2008. 204 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- NASCIMENTO, L. A. H.; ROCHA, S. M. N., NASCIMENTO, C. E. H.; KIM, Y. R., CHACUR, M., MARTINS, A. T. (2014) Uso da mecânica do dano contínuo na caracterização de misturas asfálticas brasileiras. 21º Encontro de Asfalto do IBP.
- NASCIMENTO, L. A. H. (2015) Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil. Dissertation (Doctor of Philosophy). Graduate Faculty of North Carolina State University.
- NASCIMENTO, L. A. (2016) Caracterização Avançada de Materiais Asfálticos: Dano por Fadiga. Curso. Universidade Federal de Santa Maria.
- OLIVEIRA, A. A. (2019) Estudo da rigidez e da resistência ao dano de misturas asfálticas com ligantes modificados por borracha e polímero. Trabalho de conclusão de curso. UFSM – Santa Maria.
- POSSEBON, P. É. (2018) Estudo laboratorial das propriedades mecânicas de misturas com diferentes cimentos asfálticos de petróleo produzidos no Brasil. Dissertação de Mestrado. UFSM – Santa Maria.
- RIBAS, J. (2014) Parâmetros elásticos típicos de materiais de pavimentos flexíveis do Rio Grande do Sul e sua

- aplicação em uma análise de custo/benefício. Dissertação. Universidade Federal de Santa Maria.
- SABOURI, M.; KIM, Y. R. (2014) Development of a Failure Criterion for Asphalt Mixtures Under Different Modes of Fatigue Loading. Transportation Research Record N° 2447–Journal of the Transportation Research Board. Washington, DC. p. 117-125.
- SANTOS, T. A. (2016) Avaliação da resistência e da deformabilidade de quatro solos empregados em subleitos rodoviários no Estado do Rio Grande do Sul. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- SHRP-A-410. (1994) Strategic Highway Research Program. Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The product of the SHRP asphalt research Program. Washington, DC.
- YILDIRIN, Y. (2005) Polymer Modified Asphalt Binders. Construction and Building Materials, n. 21, p. 66 – 72. DOI:10.1016/j.conbuild mat.2005.07.007

Andressa Ambrós de Oliveira (andressa.ambros@hotmail.com)
Victória Nunes Ramos (victorianunesramos@hotmail.com)
Chaveli Brondani (chavelib@gmail.com)
Évelyn Paniz Possebon (evelyn.paniz@gmail.com)
Luciano Pivoto Specht (luspecht@ufsm.br)
Deividi da Silva Pereira (dsp@ufsm.br)
Grupo de Estudo e Pesquisa em Pavimentação e Segurança Viária, Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria
Av. Roraima, 1000 - 7 – Camobi - Santa Maria, RS, Brasil