

# Avaliação do efeito de ligantes asfálticos modificados na resistência à deformação permanente de misturas asfálticas densas

Felipe Coutinho Onofre<sup>1</sup>, Verônica Teixeira Franco Castelo Branco<sup>2</sup>,  
Jorge Barbosa Soares<sup>3</sup> e Adalberto Leandro Faxina<sup>4</sup>

**Resumo:** A modificação de ligantes asfálticos é uma prática cada vez mais comum em vias de elevado volume de tráfego e tem como objetivo a melhoria das características reológicas desses materiais, principalmente em temperaturas extremas. O objetivo principal deste trabalho é estudar o efeito de diversos ligantes asfálticos modificados na rigidez e na resistência à deformação permanente de misturas asfálticas densas. Foram estudadas 13 misturas com a mesma granulometria e tipos de agregados e com diferentes tipos de ligantes asfálticos modificados por polímeros e ácido polifosfórico (PPA). A caracterização da deformação permanente foi feita por meio do ensaio de *creep* dinâmico e das variáveis de densificação CDI e  $TDI_m$ . Os resultados mostraram que a modificação dos ligantes exerceu um efeito considerável na resistência à deformação permanente das misturas, principalmente naquelas em que foram utilizados ligantes modificados por polímeros. Nessas misturas foi observado que o *Flow Number*, parâmetro de ruptura do ensaio de *creep* dinâmico, não foi atingido, mesmo após os 10.000 ciclos previstos para esse ensaio. Verificou-se que os resultados das variáveis CDI e  $TDI_m$  foram influenciados principalmente pelo teor de projeto das misturas e essas apresentaram um ordenamento diferente do observado nos ensaios de *creep* dinâmico.

DOI:10.4237/transportes.v21i3.685.

*Palavras-chave:* .

**Abstract:** Asphalt binder modification is of common use in heavy traffic roadways. Its goal is to improve binder's rheological properties, especially in extreme temperatures. The main objective of this paper was to evaluate the effect of several modified asphalt binders in dense asphalt mixes with respect to their rutting resistance and stiffness. Thirteen mixes with the same aggregate gradation and type, but with different types of polymer and polyphosphoric acid (PPA) modified asphalt binders, were investigated. Repeated load permanent deformation test and CDI and  $TDI_m$  variables were used to evaluate the mixes' rutting resistance. The results showed that binder modification influenced substantially the mixes rutting resistance, especially on those with polymer modified binder. In these mixes, the Flow Number, which is the failure criteria for repeated load permanent deformation test, was not reached, even after 10,000 cycles. CDI and  $TDI_m$  results were mainly affected by the binder content and these results had a different ranking from the one observed in the repeated load permanent deformation test.

*Keywords:* .

## 1. INTRODUÇÃO

Os tipos de defeitos mais frequentes encontrados em pavimentos asfálticos no Brasil são o trincamento por fadiga e a deformação permanente. No caso da deformação permanente, o defeito pode ser devido à manifestação de dois fenômenos, isoladamente ou combinados: (i) a consolidação das camadas do pavimento ou (ii) algum problema associado ao projeto ou à execução da mistura asfáltica que leve à pós-compactação excessiva ou ao fluxo plástico sem variação volumétrica da mistura asfáltica. 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 (Mahmoud e Bahia, 2004). 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. Diante deste fato, percebe-se a importância de pesquisas que busquem materiais ou combinações dos mesmos que retardem e/ou amenizem este defeito.

Muitos 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: (i) resistência à deformação permanente, (ii) resistência à fadiga, (iii) resistência ao trincamento térmico, (iv) resistência ao dano por umidade (melhoria da aderência na interface agregado-ligante), entre outras (Yildirir, 2005).

De acordo com Bates e Worch (1987), as principais características oferecidas por um ligante asfáltico modificado por polímero são o aumento dos seguintes parâmetros: recuperação elástica, ponto de amolecimento, viscosidade, força de coesão e ductilidade. Os modificadores mais comumente utilizados no Brasil são: (i) Estireno Butadieno Estireno (SBS), (ii) Borracha de Butadieno Estireno (SBR), e (iii) borracha de pneu moído, porém outros modificadores como Etil Vinil Acetato (EVA), polietileno, elvaloy e ácido polifosfórico (PPA) também são objetos de interesse em

<sup>1</sup> Felipe Coutinho Onofre, Departamento de Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil. (e-mail: fonofre@gmail.com)

<sup>2</sup> Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, Departamento de Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil. (e-mail: veronica@det.ufc.br)

<sup>3</sup> Jorge Barbosa Soares, Departamento de Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil. (e-mail: jsoares@det.ufc.br)

<sup>4</sup> Adalberto Leandro Faxina, Departamento de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, EESC-USP, SP, Brasil. (e-mail: adalbertofaxina@yahoo.com.br)

pesquisas na área da pavimentação asfáltica.

O objetivo principal desse trabalho é estudar o efeito de diversos ligantes asfálticos modificados na resistência à deformação permanente de misturas asfálticas densas compostas por esses materiais por meio do ensaio de *creep* dinâmico e das variáveis de densificação *Construction Densification Index* (CDI) e *Traffic Densification Index* modificado ( $TDI_m$ ).

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Fatores influentes na deformação permanente das misturas asfálticas

Diversos trabalhos na literatura mostram que as propriedades de agregados que mais influenciam na resistência à deformação permanente são: (i) angularidade, (ii) forma e (iii) textura. Stiadý *et al.* (2002) e Sanders e Dukatz (1992) concluíram que agregados com maior angularidade (maior número de faces fraturadas) tendem a compor misturas asfálticas com maior resistência à deformação permanente. Mahmoud e Bahia (2004) mostraram que agregados com textura mais rugosa geram misturas asfálticas com maior resistência à deformação permanente.

Em relação aos ligantes asfálticos, aqueles que tiverem maior consistência, ou seja, maior resistência à penetração ou Performance Grade (PG) mais elevado, tenderão a gerar misturas asfálticas mais resistentes com relação à deformação permanente. No entanto, a baixa influência do ligante asfáltico na resistência à deformação permanente é devida ao fato de que, com o aumento da temperatura, a consistência do ligante asfáltico diminui e, em temperaturas muito altas, independentemente da maior ou menor consistência, todo ligante asfáltico apresenta comportamento predominantemente viscoso, o que favorece a deformação permanente da mistura asfáltica. Goodrich (1991) afirmou que em altas temperaturas o comportamento da mistura deve ser predominantemente influenciado pelos agregados.

### 2.2. Creep dinâmico

O ensaio de *creep* dinâmico, também conhecido por uniaxial de carga repetida, é um ensaio simples de ser realizado e que apresenta potencial de correlação com o desempenho de misturas asfálticas em campo. A mistura asfáltica é submetida a um carregamento cíclico de compressão com frequência de 0,1s de carga e 0,9s de descanso. As deformações acumuladas são obtidas em função do número de ciclos. O ensaio é realizado à 60°C. A tensão aplicada em cada ciclo é de 204kPa no período de 0,1s e de 5,2kPa durante os 0,9s de repouso. Os Corpos de Prova (CPs) utilizados

no ensaio devem ter  $15\text{cm} \pm 0,25\text{cm}$  de altura e 10cm de diâmetro. O chamado *Flow Number* (FN), determinado nesse ensaio, é o número do ciclo em que a taxa de deformação plástica é mínima e a partir do qual o CP atinge a ruptura. O ensaio é finalizado quando a taxa mínima de deformação plástica é obtida ou quando o ciclo de número 10.000 é atingido. A taxa de deformação plástica mínima pode ser obtida durante o ensaio pela visualização do seu menor valor no gráfico de ciclo *versus* taxa de deformação. Esse procedimento encontra-se descrito de forma mais detalhada no relatório 465 da *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) (Witczak *et al.*, 2002).

Observa-se na Figura 1(a) que há três regiões de deformação durante o ensaio. A primeira é a região primária, em que a densificação da amostra ensaiada ocorre a uma taxa elevada. Em seguida, encontra-se a região secundária, em que a taxa de deformação é praticamente constante e enfim a região terciária, que é a região em que a amostra já se encontra rompida. A partir do ciclo referente ao FN, que está justamente na fronteira entre a região secundária e a terciária, a deformação ocorre a volume constante e a taxa de deformação volta a subir, visto que a amostra não oferece mais resistência aos carregamentos. A Figura 1(a) mostra o ponto em que o FN é atingido e a Figura 1(b) a aplicação das cargas durante o ensaio.

Apesar dos parâmetros de testes atuais serem bem aceitos na literatura, Rodezno *et al.* (2009) verificaram que não há um protocolo padrão que indique a tensão a ser aplicada durante o ensaio. Foi verificado que quando a mistura asfáltica possui alta rigidez, seja por possuir um ligante asfáltico com alta consistência ou algum tipo de aditivo, o ensaio pode demorar horas ou até mesmo nunca atingir a região terciária, ou seja, a amostra não falha e o FN não é atingido antes do ciclo de número 10.000. Dongre *et al.* (2009), em um estudo financiado pela FHWA que envolveu 15 projetos e 13 laboratórios, verificaram que a inclinação da curva de deformação no ponto de 2% de deformação se correlacionava bem com os valores de FN.

### 2.3. Variáveis de densificação CDI, TDI e $TDI_m$

As variáveis de densificação CDI, TDI e  $TDI_m$  são obtidas a partir dos dados extraídos da curva de compactação Superpave. CDI é definido como o valor da área entre três curvas: (i) a de compactação, (ii) a reta horizontal que cruza a curva de compactação quando do oitavo giro e (iii) a reta vertical que cruza com a curva de compactação quando a densidade é equivalente a 92% da  $G_{mm}$ . TDI é o valor da área entre as seguintes curvas: (i) a de compactação, (ii) a reta horizontal em que se observa 92% da  $G_{mm}$  e (iii) a reta vertical que cruza a curva de compactação quando a densidade aparente

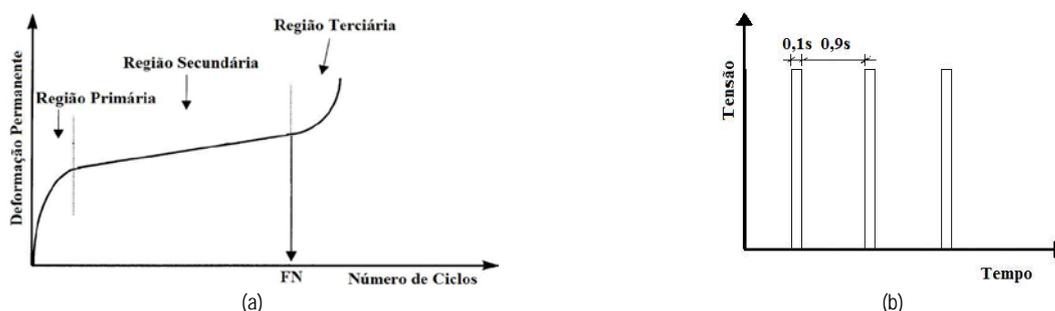


Figura 1. (a) Deformação permanente durante o ensaio uniaxial de carga repetida e obtenção do FN e (b) aplicação de tensão durante o ensaio

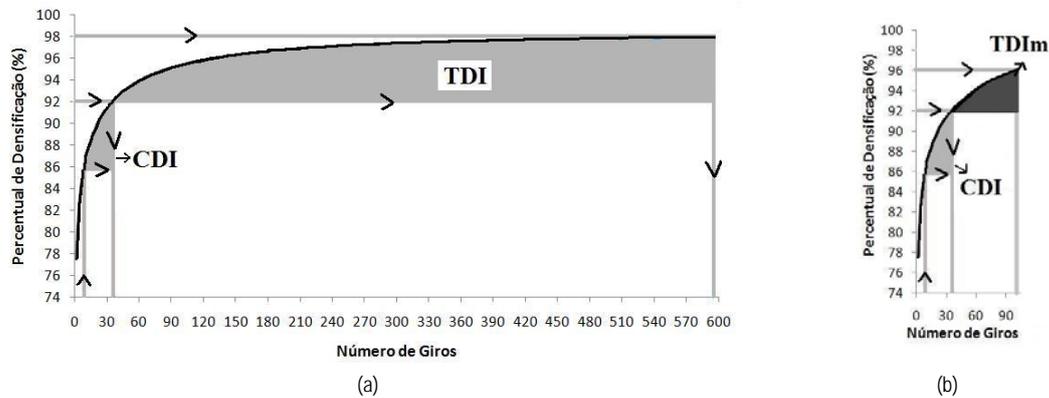


Figura 2. Determinação do (a) CDI, TDI e (b) TDI<sub>m</sub> a partir da curva de compactação Superpave

é 98% da  $G_{mm}$ . TDI<sub>m</sub>, parâmetro desenvolvido por Nascimento (2008), é o valor da área entre as seguintes curvas: (i) a de compactação, (ii) a reta horizontal em que se observa 92% da  $G_{mm}$  e (iii) a reta vertical que cruza a curva de compactação quando a densidade aparente é 96% da  $G_{mm}$ . Esse parâmetro foi inicialmente desenvolvido para que os CPs produzidos não fossem descartados devido ao alto percentual de densificação que ocorre para a obtenção do TDI. Os 98% da  $G_{mm}$  leva um CP a ter apenas 2% de Vv, o que o inutiliza para ensaios mecânicos. Com a densificação dos CPs de 96% da  $G_{mm}$ , necessária para a obtenção do TDI<sub>m</sub>, é possível reutilizá-los para a realização de ensaios mecânicos, já que a maior parte desses ensaios são feitos com CPs contendo 4% de Vv. Há, também, casos em que algumas misturas possuem baixos percentuais de ligante, ou um alto percentual de agregados graúdos, impossibilitando a determinação do TDI, visto que é necessário atingir 98% da  $G_{mm}$  da mistura. Nesse caso, pode ser utilizado o TDI<sub>m</sub>.

Nascimento (2008) comprovou que o TDI<sub>m</sub>, assim como o TDI, apresenta boas correlações (todas com  $R^2$  acima de 0,75) com outros resultados de ensaios de deformação permanente (deformação a 30.000 ciclos no ensaio de simulação de tráfego em laboratório e o FN), podendo ser utilizado como parâmetro para a determinação da resistência à deformação permanente. As Figuras 2(a) e (b) mostram o TDI<sub>m</sub>, além do CDI e do TDI.

Percebe-se que o CDI se relaciona com a energia despendida em campo durante a construção do revestimento e o TDI com o trabalho realizado pela ação do tráfego durante a vida de serviço do pavimento. Misturas com baixos valores de CDI possuem melhor trabalhabilidade e misturas com altos valores de TDI são mais resistentes à deformação permanente.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Agregados e granulometria

O agregado mineral é oriundo da britagem de rocha basáltica e foi fornecido pela Engenharia e Comércio Bandeirantes, de São Carlos, SP. A composição granulométrica foi obtida por separação dos materiais nas frações das peneiras da especificação (centro da faixa III da ET-DE-P00/027 do DER-SP) e posterior mistura dos componentes. O material utilizado apresenta Abrasão Los Angeles de 22%. Foi selecionado apenas esse agregado e essa granulometria para o estudo porque há o interesse específico em comparar o efeitos dos diferentes tipos de ligantes modificados com relação

a resistência à deformação permanente. Esses agregados também foram caracterizados utilizando o *Aggregate Image Measurement System* (AIMS) com relação à angularidade, à forma e à textura de cada fração dos agregados. Os agregados apresentaram resultados aceitáveis para todas as propriedades analisadas.

#### 3.2. Ligantes e misturas

Na preparação dos ligantes asfálticos, foram utilizados os seguintes materiais: (1) CAP 50/70 com classificação por grau de desempenho PG 64-XX, fornecido pela Replan-Petrobras; (2) borracha moída de pneu, fornecida pela empresa Ecija Comércio Exportação e Importação de Produtos Ltda., resultante do processo de trituração de bandas de rodagem de pneus de veículos de passeio; (3) ácido polifosfórico (PPA) de designação comercial Innovalt E-200, fornecido pela Innophos Inc., dos Estados Unidos; (4) SBS tipo TR-1101, adquirido da Kraton e fornecido pela Betunel; (5) borracha de estireno-butadieno (SBR) tipo Solprene 1205, adquirida da Dynasol e fornecida pela Betunel; (5) etileno acetato de vinila (EVA) tipo HM 728, adquirido da Politen e fornecido pelo Cenes-Petrobras; (6) polietileno (PE) tipo UB160-C de baixa densidade, produzido pela Unipar; e (7) terpolímero elvaloy tipo 4170, fornecido pela Dupont. As formulações foram escolhidas com o intuito de se obterem ligantes asfálticos modificados de classificação PG 76-XX, equivalente a dois graus acima do PG do ligante asfáltico de base. O misturador de baixo cisalhamento utilizado foi o da marca Fisatom, modelo 722D, e o de alto cisalhamento é o da marca Silverson, modelo L4R. As formulações dos 13 ligantes asfálticos utilizados e os tempos de mistura para a modificação estão detalhados na Tabela 1.

Percebe-se que, todos os ligantes modificados apenas por polímero apresentam alto teor de modificação para que o PG76-XX seja atingido. Ao se modificar o ligante virgem com algum polímero e um pequeno percentual de PPA percebe-se que não há a necessidade de uma quantidade elevada de polímero para atingir esse valor de PG já que o PPA possui a capacidade de enrijecer o ligante, ainda que usado em um baixo percentual. O elvaloy foi o único polímero que não foi utilizado sem a presença de PPA para a modificação do ligante porque o mesmo não apresentou boa trabalhabilidade ao ser utilizado sozinho. Todos os ligantes foram caracterizados com relação aos ensaios de penetração, ponto de amolecimento, ambos para amostras virgens e envelhecidas pelo RTFOT, perda de massa e viscosidade rotacional. Esses resultados são apresentados e discutidos em Domingos *et al.* (2011) e Faxina (2011).

**Tabela 1.** Formulações dos ligantes asfálticos (%)

<i>Ligante asfáltico</i>	<i>CAP</i>	<i>Modificador</i>	<i>PPA</i>	<i>Rotação (rpm)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Tempo (min)</i>
CAP Replan	100,0	–	–	–	–	–
CAP+PPA	98,8	–	1,2	300	130	30
CAP+Elvaloy+PPA	98,4	1,3	0,3	300	190	120, PPA aos 60
CAP+Borracha	86,0	14,0	–	4.000	190	90
CAP+Borracha+PPA	88,5	11,0	0,5	4.000	190	120, PPA aos 90
CAP+SBS	95,5	4,5	–	4.000	180	120
CAP+SBS+PPA	96,5	3,0	0,5	4.000	180	120, PPA aos 60
CAP+EVA	92,0	8,0	–	300	180	120
CAP+EVA+PPA	96,6	3,0	0,4	300	180	120, PPA aos 90
CAP+PE	94,0	6,0	–	440	150	120
CAP+PE+PPA	96,5	3,0	0,5	400	150	120, PPA aos 60
CAP+SBR	94,5	5,5	–	400	180	120
CAP+SBR+PPA	96,0	3,5	0,5	300	180	120, PPA aos 90

**Tabela 2.** Temperaturas de usinagem e compactação e teores de projeto

<i>Ligante asfáltico</i>	<i>Temperatura de usinagem (°C)</i>	<i>Temperatura de compactação (°C)</i>	<i>Teor de projeto (%)</i>
CAP REPLAN	152	140	4,4
CAP+PPA	167	154	4,7
CAP+Elvaloy+PPA	180	160	4,8
CAP+Borracha	177	177	5,5
CAP+Borracha+PPA	177	177	5,5
CAP+SBS	178	170	5,0
CAP+SBS+PPA	181	170	5,0
CAP+EVA	178	170	4,9
CAP+EVA+PPA	181	170	5,0
CAP+PE	181	170	4,9
CAP+PE+PPA	181	170	4,9
CAP+SBR	178	170	5,0
CAP+SBR+PPA	181	170	4,9

Para efeito de projeto das misturas asfálticas, os números de giro inicial, de projeto e máximo adotados foram 8, 100 e 160, respectivamente. Os Vazios do Agregado Mineral (VAM), o Volume de vazios (Vv) e a Relação Betume-Vazios (RBV) foram avaliados segundo os critérios da especificação Superpave. A Tabela 2 apresenta as temperaturas de usinagem e de compactação utilizadas nas dosagens e os respectivos teores de projeto de ligante asfáltico, obtidos para o Vv de 4,0%. Para cada uma das 13 formulações estudadas, foram compactados 3 CPs de 10cm de diâmetro e 15cm de altura com 7% de Vv destinados aos ensaios de *creep* dinâmico. O número de CPs ensaiados mostrou-se suficiente visto que os Coeficientes de Variação (CV) das deformações de todos os ensaios realizados em todas as 13 misturas apresentaram valor máximo de 37%, com a maioria ficando abaixo de 20%. Esses valores de CV ficaram mais altos principalmente nos casos em que as deformações foram muito baixas. Isso pode ser justificado pelo fato das médias desses valores baixos de deformação ficarem similares aos dos desvios padrões, causando o aumento do CV.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Ensaios de *creep* dinâmico

Os ensaios de *creep* dinâmico foram realizados com os procedimentos descritos no relatório 465 *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP). Apenas duas mistu-

ras atingiram o FN, ou seja, apenas duas misturas apresentaram taxa de deformação mínima antes do término do ensaio, que é o critério de ruptura para o ensaio de *creep* dinâmico. Tratam-se das misturas com CAP Replan e com CAP+PPA, com FN iguais a 1.977 e 4.393 e coeficientes de variação iguais a 5 e 10%, respectivamente. Percebe-se que os resultados dos valores de FN para a mistura contendo o CAP+PPA são aproximadamente duas vezes maiores do que os encontrados para a mistura contendo CAP Replan. Considerando-se o parâmetro FN, esse modificador melhora consideravelmente a resistência à deformação permanente, ainda que seja utilizado em pequena quantidade. As demais misturas não atingiram o FN até o ciclo de número 10.000, porém foi possível plotar o gráfico de número de ciclos *versus* deformação para todas as misturas avaliadas (Figura 3).

Observa-se que todas as misturas contendo as formulações CAP+polímero e CAP+polímero+PPA possuem menor percentual de deformação em um dado ciclo quando comparadas às com CAP Replan. O mesmo pode ser observado ao se comparar as misturas contendo CAP+PPA com as demais misturas contendo as formulações CAP+polímero e CAP+polímero+PPA, exceto para as misturas contendo CAP+borracha e CAP+SBS, que apresentaram maior deformação até, aproximadamente, os ciclos de número 2.000 e 4.000, respectivamente. Porém, nos ciclos posteriores, essas misturas (com CAP+borracha e CAP+SBS) apresentaram maior resistência à deformação permanente, o que indica uma possível resistência à deformação permanente mais

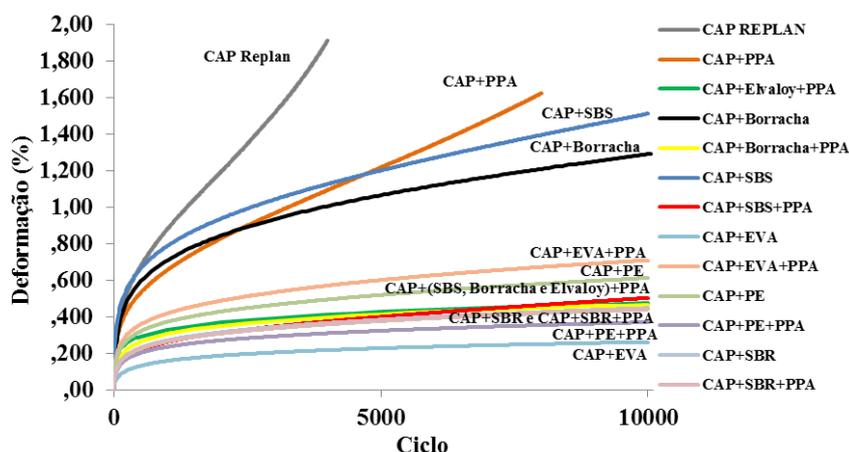


Figura 3. Resultados do ensaio de *creep* dinâmico para todas as misturas avaliadas

elevada a longo prazo. A utilização apenas de PPA ou apenas de polímeros melhora a resistência à deformação permanente das misturas asfálticas, sendo preferível a utilização de polímeros no caso de se poder optar apenas por um dos dois modificadores. A mistura com CAP+EVA foi a única mistura que apresentou maior resistência à deformação permanente comparada à mistura com ligante modificado pelo mesmo polímero + PPA (CAP+EVA+PPA), provavelmente por essa ter 57,5% a menos de modificador comparada com a mistura com CAP+EVA.

As curvas de deformação das misturas com formulações do tipo CAP+polímero+PPA ficaram muito próximas, o que indica que, ao se utilizar PPA, não há tanta diferença entre a utilização de qualquer um dos polímeros, exceto pelo EVA, que quando utilizado como modificador de ligante gerou uma mistura com resistência à deformação permanente menos elevada.

Também foram plotados os gráficos que mostram os resultados dos ensaios de *creep* dinâmico das misturas com os ligantes virgem, modificado apenas por PPA, modificado apenas por polímero e modificado por polímero+PPA. Como foram utilizados seis tipos de polímeros diferentes, foram gerados seis gráficos. Isso foi feito com a finalidade de verificar a influência de cada um dos polímeros juntamente ao PPA e, também, destes de forma separada. Por uma questão de falta de espaço para apresentar todos os resultados foi inserido apenas o gráfico relativo a um dos modificadores, no caso a borracha (Figura 4), porém os demais casos foram discutidos abaixo.

Ao se modificar o CAP 50/70 com 14% de borracha (CAP+Borracha) o comportamento com relação à resistência à deformação permanente da mistura melhora em relação às misturas com CAP 50/70 e CAP+PPA, sendo a deformação no ciclo de número 2.000 em torno de 0,84%, ou seja, apenas 71% da deformação da mistura com o CAP 50/70 nesse mesmo ciclo e o FN não é atingido, sendo a deformação no ciclo de número 10.000 igual a, aproximadamente, 1,3%. Ao se modificar o CAP Replan com borracha + PPA (CAP+Borracha+PPA) o comportamento com relação à resistência à deformação permanente da mistura melhora ainda mais, sendo a deformação no ciclo de número 2.000 em torno de 0,35%, ou seja, apenas 29% da deformação da mistura com o CAP virgem nesse mesmo ciclo e o FN também não é atingido, sendo a deformação no ciclo de número 10.000 igual a, aproximadamente, 0,4%. Isso mostra que a borracha de pneu moído tem um grande potencial para influenciar positivamente na resistência à deformação permanente de misturas asfálticas, principalmente quando essa é utilizada associada ao PPA para a modificação de ligantes asfálticos. Observa-se também que, a mistura com CAP+Borracha possui ligante com 14% de modificação apenas por borracha e que a mistura com CAP+borracha+PPA possui ligante com 11,5% de modificação, sendo 11,0% de borracha e 0,5% de PPA. Conclui-se que, a utilização de um pequeno percentual de PPA não só diminui o consumo de borracha utilizado, mas também melhora consideravelmente o desempenho da mistura asfáltica com relação à resistência à deformação permanente.

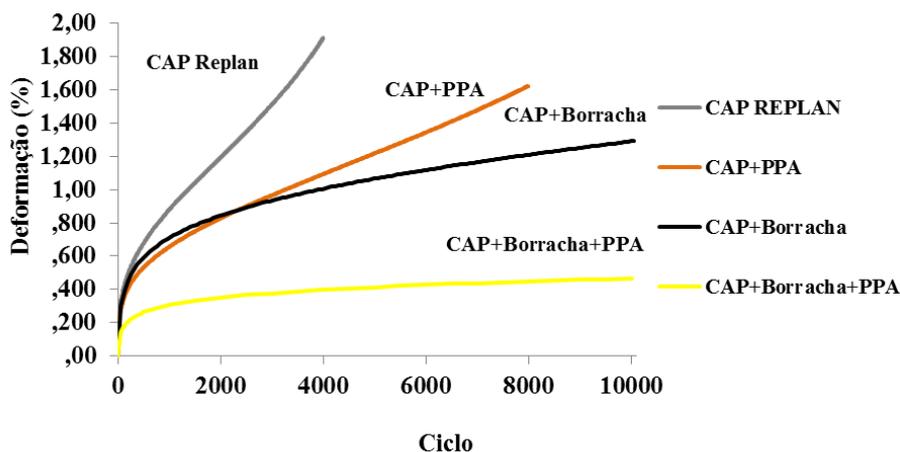


Figura 4. Resultados de FN referentes às misturas com ligantes CAP Replan, CAP+PPA, CAP+Borracha e CAP+Borracha+PPA

**Tabela 3.** Deformação de todas as misturas estudadas

Mistura	Def. (%) a 2.000 ciclos	Def. (%) relativa a 2.000 ciclos*	Def. (%) a 10.000 ciclos
CAP+EVA	0,19	16	0,26
CAP+PE+PPA	0,27	23	0,37
CAP+SBR	0,31	26	0,44
CAP+SBR+PPA	0,32	27	0,45
CAP+Elvaloy+PPA	0,36	30	0,47
CAP+Borracha+PPA	0,35	29	0,47
CAP+SBS+PPA	0,31	26	0,50
CAP+PE	0,43	36	0,61
CAP+EVA+PPA	0,49	41	0,71
CAP+Borracha	0,84	71	1,29
CAP+SBS	0,94	79	1,51
CAP+PPA	0,83	70	–
CAP Replan	1,19	100	–

\* Deformação em relação à mistura com CAP Replan no ciclo de número 2.000

Essa tendência de comportamento com relação à resistência à deformação permanente foi a mesma encontrada para as misturas com utilização de ligante asfáltico modificado com os polímeros SBS e polietileno. No caso do elvaloy só foi possível comparar esse polímero associado ao PPA (CAP+Elvaloy+PPA) com as misturas com CAP Replan e com CAP+PPA. Neste caso, o ligante CAP+Elvaloy+PPA apresentou melhor resistência à deformação permanente (curva com valores menores de deformação). Com relação ao SBR, as duas misturas, com os ligantes CAP+SBR e CAP+SBR+PPA, apresentaram as suas curvas de deformações superpostas, ou seja, a mesma resistência à deformação permanente. Para o EVA o comportamento foi oposto ao observado com a borracha, o SBS e o polietileno. A mistura com CAP+EVA apresentou melhor resistência à deformação permanente quando comparada com a mistura com CAP+EVA+PPA. A Tabela 3 mostra o resumo dos resultados mencionados. Verifica-se que, as misturas estão na ordem de melhor para pior resistência à deformação permanente no ciclo de número 10.000. Também foram inseridas as deformações absolutas e relativas no ciclo de número 2.000 para que fosse possível uma comparação com a mistura com CAP Replan puro.

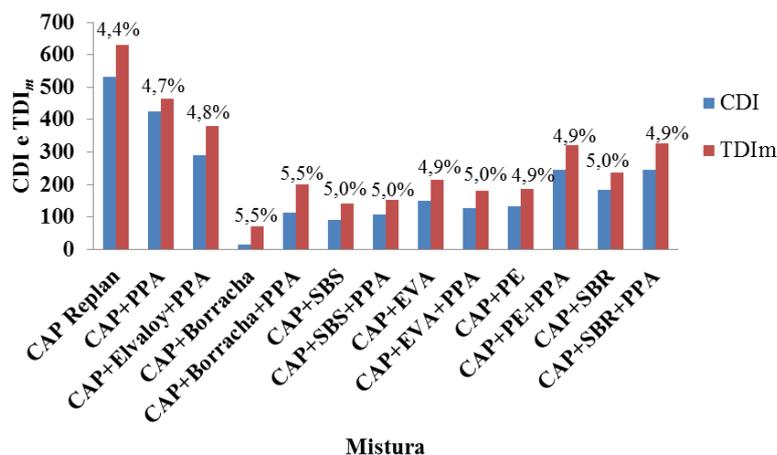
Percebe-se que, na última coluna, as misturas contendo o CAP Replan e o CAP+PPA não apresentam resultados, pois essas foram as únicas misturas que atingiram o FN, ou seja, não chegaram aos 10.000 ciclos de ensaio. Analisando os outros resultados a 10.000 ciclos, as melhores são as mistu-

ras com CAP+EVA e CAP+PE+PPA, seguida por um grupo que poderíamos considerar aproximadamente equivalente em termos de resistência à deformação permanente formado pelas misturas com CAP+SBR, CAP+SBR+PPA, CAP+Elvaloy+PPA, CAP+Borracha+PPA e CAP+SBS+PPA. As duas misturas menos resistentes à deformação permanente são as com CAP Replan e CAP+PPA.

#### 4.2. Variáveis de densificação CDI e $TDI_m$

As variáveis de densificação CDI e  $TDI_m$  foram calculadas para as 13 primeiras misturas. A Figura 5 mostra os resultados dos valores de CDI e  $TDI_m$  obtidos. Também foram inseridos os valores dos teores de projeto para cada mistura para facilitar a análise.

Observa-se que os valores de CDI variaram muito. Dentre todas as misturas analisadas, as que apresentaram CDI mais alto foram aquelas preparadas com CAP Replan e com CAP+PPA, ou seja, são aquelas que devem apresentar pior trabalhabilidade. Logo, estas misturas exigiriam mais energia para que fossem compactadas adequadamente. Estas duas misturas foram as únicas a ultrapassar o limite máximo de CDI (300) para garantir a trabalhabilidade em campo, considerando uma rodovia de alto volume de tráfego de acordo com o critério estabelecido por Bahia e Faheem (2007). Dentre as misturas que foram dosadas com ligantes modificados, as preparadas com CAP+Elvaloy+PPA, CAP+PE+PPA e CAP+SBR+PPA foram consideradas as menos trabalháveis, podendo ser utilizadas apenas em rodo-



**Figura 5.** Resultados de CDI e  $TDI_m$

vias de tráfego pesado ( $CDI < 300$ ), segundo o critério estabelecido por Bahia e Faheem (2007). As misturas preparadas com CAP+Borracha+PPA, CAP+SBS+PPA e CAP+EVA+PPA, apresentaram trabalhabilidade similar e superior às restantes, podendo ser utilizadas em rodovias de tráfego médio ou pesado ( $CDI < 200$ ). Dentre as misturas preparadas com formulações do tipo CAP+Polímero (ou borracha), as que apresentaram melhor trabalhabilidade foram aquelas com CAP+Borracha e CAP+SBS em sua composição, podendo ser utilizadas em rodovia com qualquer volume de tráfego, segundo o critério estabelecido por Bahia e Faheem (2007). As misturas contendo as formulações CAP+EVA, CAP+PE e CAP+SBR apresentaram-se menos trabalháveis se comparadas às misturas com CAP+Borracha e CAP+SBS, porém estas podem ser utilizadas em rodovias de tráfego médio ou pesado, segundo os mesmos critérios citados anteriormente. Vale ressaltar que os critérios estabelecidos por Bahia e Faheem (2007) não foram validados em campo, logo podem não representar bem a realidade para o cenário brasileiro.

Percebe-se também que os valores de CDI obtidos podem ser justificados principalmente pelo teor de projeto. Percebe-se que as duas misturas com os teores mais baixos (CAP Replan com 4,4% e CAP+PPA com 4,7%) são as que apresentam maiores valores de CDI e que a mistura com o maior teor de ligante (CAP+Borracha com 5,5%) é a que apresenta o menor valor de CDI. Isso se deve ao fato de uma mistura com menor teor de ligante ser mais difícil de ser compactada, já que possui uma trabalhabilidade reduzida em função desse baixo teor. Analogamente, uma mistura com um teor maior de ligante possui maior facilidade para ser compactada devido à maior trabalhabilidade conferida à mesma por essa quantidade de ligante. Observa-se, também, que as misturas contendo formulação do tipo CAP+Polímero (ou borracha) apresentam valores de CDI mais baixos do que as misturas preparadas com CAP+Polímero (ou borracha)+PPA, ainda que tenham o mesmo teor de ligante (exceto pelas contendo o modificador EVA). Isso mostra que a modificação também exerceu efeito no CDI. Nesse caso, a adição de PPA piorou a trabalhabilidade devido a sua característica de enrijecer o ligante asfáltico.

Observando-se os valores de  $TDI_m$ , a mistura que deve ter maior resistência à deformação permanente é a mistura com o CAP Replan, sendo esta seguida pelas misturas com os ligantes CAP+PPA, CAP+Elvaloy+PPA, CAP+PE+PPA e CAP+SBR+PPA. A mistura com o CAP+Borracha apresentou o menor valor de  $TDI_m$ , logo, deveria possuir a menor resistência à deformação permanente. Esses resultados também podem ser justificados pelo teor de projeto, que, nesse caso, se sobressaiu em relação ao efeito da modificação dos ligantes (CAP Replan com maior resistência à deformação permanente e CAP+Borracha+PPA com menor resistência à deformação permanente). É possível verificar o efeito da modificação na maioria das misturas em que foram utilizados ligantes modificados apenas por polímero (ou borracha) e por polímero+PPA. Para a borracha, o SBS, o polietileno e o SBR, verifica-se que as formulações com PPA sempre apresentaram valores de CDI e  $TDI_m$  mais elevados se comparadas às formulações com o polímero (ou borracha), mas sem PPA. A mistura com EVA foi exceção, apresentando valores de CDI e  $TDI_m$  maiores para a mistura com ligante modificado apenas pelo polímero se comparadas as misturas com o ligante com polímero+PPA. Foram

estabelecidas correlações entre os parâmetros CDI e  $TDI_m$  com os teores de projeto. As duas variáveis de densificação apresentaram boas correlações (valores de  $R^2$  iguais a 0,65 e 0,66, respectivamente) com o teor de projeto, mostrando, mais uma vez que esses parâmetros estão interligados.

É preferível que se tenha uma mistura com um baixo valor de CDI, para que seja mais trabalhável, e com um maior valor de TDI ou  $TDI_m$ , para que esta seja mais resistente à deformação permanente. No entanto, as características das misturas que as levam a ter um CDI mais elevado também as tornam mais resistentes à deformação permanente, logo com valores de TDI ou  $TDI_m$  também mais elevados. Observa-se que todas as misturas avaliadas possuem a mesma tendência de ter o valor de CDI inferior ao valor de  $TDI_m$ . Além disso, o valor de CDI de cada mistura se aproximou do seu respectivo valor de  $TDI_m$ . Logo, é provável que se uma mistura é muito trabalhável (baixo CDI), esta também terá baixa resistência à deformação permanente (baixo  $TDI_m$ ) e vice-versa. Também observa-se que não há uma mistura ideal, que possua ao mesmo tempo um baixo valor de CDI e um alto valor de  $TDI_m$ . Comparando-se esses resultados com os de *creep* dinâmico, verifica-se que as duas misturas que apresentaram maiores valores de  $TDI_m$ , ou seja, que deveriam ter maior resistência à deformação permanente foram as mesmas que apresentaram os piores resultados do ensaio de *creep* dinâmico. Isso pode indicar que essas variáveis possam não ser confiáveis para a caracterização de misturas com relação à resistência à deformação permanente. Porém, mais estudos seriam necessários para comprovar essa hipótese.

## 5. CONCLUSÕES

Esse estudo envolveu a caracterização mecânica de 13 misturas asfálticas preparadas com ligantes asfálticos modificados pelos seguintes modificadores: elvaloy, EVA, borracha moída de pneus descartados, PE, SBS, SBR e PPA no que diz respeito à resistência à deformação permanente pelos ensaios de *creep* dinâmico e pelas variáveis de densificação CDI e  $TDI_m$ . As seguintes conclusões merecem destaque:

- Todas as modificações feitas nos ligantes asfálticos proporcionaram aumento da resistência à deformação permanente das misturas asfálticas, quando avaliada à luz dos ensaios de *creep* dinâmico, em relação à mistura asfáltica preparada com CAP Replan;
- O FN, critério de falha para o ensaio de *creep* dinâmico, não foi atingido até os 10.000 ciclos do ensaio para as misturas com ligante modificado por qualquer um dos polímeros utilizados nesse estudo devido ao alto grau de modificação;
- Dentre as misturas preparadas com ligantes asfálticos modificados, a mistura com CAP+PPA foi a única a atingir o FN. Isto significa que esta é a menos resistente à deformação permanente dentre as preparadas com ligante asfáltico modificado. Quando se compararam as misturas preparadas com formulações do tipo CAP+polímero (incluindo a borracha moída) com as do tipo CAP+polímero+PPA, observou-se que as formulações com polímero (incluindo a borracha) + PPA forneceram maiores resistências à deformação permanente do que as preparadas com as formulações sem PPA e que a mistura preparada com CAP+EVA é exceção, porque apresentou maior

resistência que o seu par preparado com CAP+EVA+PPA.

- A avaliação realizada permitiu concluir que o uso de PPA associado a um polímero ou borracha moída permite a diminuição do consumo de polímero (com suas consequências econômicas no caso dos polímeros e técnicas no caso da borracha moída - por causa da redução da viscosidade e a consequente melhoria da trabalhabilidade) sem prejudicar a resistência à deformação permanente das misturas asfálticas. Ao observar os valores de viscosidade em Domingos *et al.* (2011) percebe-se que, em todas as temperaturas as versões com PPA dos ligantes asfálticos modificados apresentam viscosidades ligeiramente inferiores às observadas para as versões sem PPA. Isto indica que a redução do teor de polímero e de borracha por conta da adição de PPA, além de levar ao aumento da resistência à deformação permanente, também gera misturas com maior trabalhabilidade na fase de construção.
- Com relação às variáveis de densificação das misturas avaliadas, os valores de  $TDI_m$  ficaram próximos dos valores de CDI, o que indica que as mesmas propriedades dos materiais componentes da mistura asfáltica, que fazem o CDI apresentar valores altos, fazem com que esta mesma mistura apresente valores de  $TDI_m$  também elevados. Esses resultados foram influenciados principalmente pelo teor de ligante da mistura. Além disso, esses resultados apresentaram-se com um ordenamento de resistência à deformação permanente distinto daqueles observados para os ensaios de *creep* dinâmico, o que pode indicar que essas variáveis possam não ser adequadas para a caracterização da deformação permanente de misturas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem: (i) ao Laboratório de Estradas do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, pelo fornecimento e pela caracterização reológica dos ligantes asfálticos e pela dosagem e compactação dos CPs ensaiados, (ii) ao CNPq pelo suporte financeiro na forma de bolsa de mestrado ao primeiro autor, (iii) à Replan/Petrobras, pelo fornecimento do ligante asfáltico e (iv) à pedreira Bandeirantes, de São Carlos, SP, pelo fornecimento dos agregados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bahia, H.U. e A. Faheem (2007) Using the Superpave Gyratory Compactor to Estimate Rutting Resistance of Hot-Mix Asphalt. *Transportation Research Board*. Número E-C124 - Practical Approaches to Hot-Mix Asphalt Design and Production Quality Control Testing. Dezembro.
- Bates, R. e R. Worch (1987) Styrene-Butadiene Rubber Latex Modified Asphalt. *Engineering Brief*. n. 39. Federal Aviation Administration. Washington, DC.
- Domingos, M. D. I., T. F. Pamplona, A. L. Faxina e A. C. Gigante (2011) Viscosidade Rotacional de Ligantes Asfálticos Modificados de Mesmo Grau de Desempenho. *XXV ANPET*, Belo Horizonte, MG.
- Dongre, R., J. D'Angelo. e A. Copeland (2010) Refinement of Flow Number as Determined by the Asphalt Mixture Performance Tester for Use in Routine QC/QA Practice. *Transportation Research Board*, Annual Meeting, Washington, DC. DOI: 10.3141/2127-15.
- Faxina, A. L. (2011) Propriedades Reológicas de Ligantes Asfálticos Modificados Virgens e Envelhecidos a Curto Prazo. *17ª RPU*, Porto Alegre, RS.
- Goodrich, J. L. (1991) Asphalt Binder Rheology, Asphalt Concrete Rheology and Asphalt Concrete Mix Properties. *Asphalt Paving Technology Journal*, v. 60 - 91, p. 80 - 120.

- Mahmoud, A. F. F. e H. Bahia (2004) Using the Gyratory Compactor to Measure Mechanical Stability of Asphalt Mixtures, *Wisconsin Highway Research Program*. Projeto Número 0092-01-02.
- Nascimento, L.A.H. (2008) *Nova Abordagem da Dosagem de Misturas Asfálticas Densas com Uso do Compactador Giratório e Foco na Deformação Permanente*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UF RJ, Rio de Janeiro, RJ.
- Rodezno, M. C., K. E. Kaloush e M. R. Corrigan (2009) Development of a Flow Number Predictive Model. *Transportation Research Board 2010 Annual Meeting*, Washington, DC. 79-87. DOI: 10.3141/2181-09.
- Sanders, C. A. e E. L. Dukats (1992) Evaluation of Percent Fracture of Hot-Mix Asphalt Gravels in Indiana. *Effect of Aggregate and Mineral Filler on Asphalt Mixture Performance*, R. C. Meininger, American Society for Testing and Materials, STP 1147. Philadelphia, PA.
- Stiady, J., A. Hand e T. White (2002) Quantifying Contributions of Aggregate Characteristics Using PURWheel Laboratory Tracking Device. *Aggregate Contribution to Hot-Mix Asphalt Performance* - ASTM STP 1412, 1-15, Orlando, Florida, EUA, Novembro.
- Witczak, M. W., K. Kaloush e T. Pellinen (2002) Simple Performance Test for Superpave Mix Design, *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) Relatório 465, Washington, D.C., EUA.
- Yildirin, Y. (2005) Polymer Modified Asphalt Binders. *Construction and Building Materials*, n. 21, p. 66 - 72. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2005.07.007.