

AVALIAÇÃO DE LIGANTES BETUME-BORRACHA RECUPERADOS DE MISTURAS BETUMINOSAS DENSAS

Ricardo Souza¹, Adelino Ferreira² e Kenji Himeno³

¹Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil, Rua Luís Reis Santos, 3030-788 Coimbra, Portugal

E-mail: ricardosouza@dec.uc.pt <http://www.uc.pt/fectuc/>

²Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil, Rua Luís Reis Santos, 3030-788 Coimbra, Portugal

³Chuo University, Department of Civil Engineering, Kasuga 1-13-27, Bunkyo-ku, Tóquio 112-8551, Japão

Sumário

Este artigo apresenta uma comparação realizada entre ligante convencional e ligantes betume-borracha envelhecidos em curto e em longo prazo versus ligante convencional e ligantes betume-borracha recuperados de misturas betuminosas densas, previamente envelhecidas em curto e em longo prazo. As características desses ligantes foram avaliadas mediante ensaios de penetração, ponto de amolecimento e corte dinâmico. Os ensaios de penetração e ponto de amolecimento demonstraram que os ligantes recuperados de misturas betume-borracha apresentaram redução do enrijecimento após o envelhecimento de curto e longo prazo. Considerando-se a resistência total a deformação ($|G^|$) e o ângulo de fase (δ) em temperaturas altas e intermediárias, todos os ligantes betume-borracha recuperados apresentaram desempenho superior comparado aos ligantes convencionais recuperados.*

Palavras-chave: ligante betuminoso; extracção; recuperação; Abson; desempenho.

1 INTRODUÇÃO

O progressivo aumento dos carregamentos por eixo assim como os custos cada vez maiores para a manutenção dos pavimentos em boas condições de rolagem e segurança requer investigação avançada para melhorar as propriedades dos ligantes e misturas betuminosas. Por outro lado, a grande quantidade de materiais descartados, por exemplo, plásticos e pneus usados, apresentam um sério problema ambiental. A adição de materiais descartados em ligantes betuminosos e/ou misturas betuminosas pode contribuir para aperfeiçoar as propriedades de ambos e também reduzir o impacto ambiental desses resíduos. A reciclagem de misturas betuminosas envelhecidas em campo é também motivo de preocupação. A utilização crescente de misturas betuminosas recuperadas e o conhecimento das propriedades dos ligantes betuminosos recuperados é essencial para otimizar a formulação de novas misturas. Este estudo apresenta uma análise realizada em ligante betuminoso convencional e em ligantes betume-borracha, envelhecidos respectivamente, em curto e em longo prazo, cujos resultados foram comparados aos obtidos para ligantes recuperados de misturas betuminosas densas betume-borracha e de misturas betuminosas densas convencionais utilizadas para controlo. Todas as misturas modificadas foram preparadas mediante via húmida, sendo para tal executado inicialmente a mistura betume-borracha e posteriormente a adição desse ligante modificado aos agregados. Para a obtenção dos ligantes modificados, adicionou-se ao ligante japonês 60/80 (grau de penetração), respectivamente partículas de borracha 0,2 mm, 0,4 mm e 0,6 mm à taxa de 15% em massa do ligante. As misturas betuminosas obtidas foram envelhecidas em curto e em longo prazo e posteriormente os respectivos ligantes modificados foram extraídos dos agregados utilizando-se um processo de extracção de solvente à quente. Posteriormente, mediante o método de Abson, foram recuperados os ligantes betuminosos. Tendo em conta todos os ligantes recuperados, foram então realizados ensaios de corte dinâmico e ensaios convencionais (penetração e ponto de amolecimento) para avaliar-se as propriedades desses materiais em temperaturas altas e intermediárias. O ensaio de corte dinâmico, realizado com o Reómetro de Corte Dinâmico (DSR) permitiu analisar o Módulo de Corte Complexo ($|G^*|$) e o

ângulo de fase (δ) a fim de determinar-se a resistência à deformação permanente em altas temperaturas e a resistência ao fendilhamento por fadiga em temperaturas intermediárias. Os ensaios de penetração a 25°C e ponto de amolecimento permitiram avaliar a resistência à deformação permanente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligantes betume-borracha

O processo de adição de borracha triturada ao ligante betuminoso pode ser realizado mediante via húmida ou via seca. A via húmida consiste na adição da borracha ao ligante prévio a mistura com os agregados sendo executada em altas temperaturas, por exemplo, entre 150°C e 220°C, enquanto o tempo de mistura desses elementos varia entre 10 e 120 minutos [1,2]. Durante esse período, as partículas de borracha tendem a aumentar de volume, tendo-se como resultado a redução da distância interpartículas e o aumento da viscosidade do ligante betume-borracha [1]. O aumento de volume das partículas de borracha não é uma reacção química pois não há uma mistura dessas partículas com o ligante betuminoso. A reacção é semelhante à experimentada por uma esponja seca, rígida e comprimida, que foi imersa em um banho de água. À medida que a esponja absorve a água, observa-se um aumento de volume e amolecimento desse material. Nas partículas de borracha, os óleos aromáticos do ligante betuminoso são absorvidos pelas cadeias da borracha, que são os componentes principais da borracha sintética e natural. As partículas de borracha tornam-se então pegajosas e desenvolvem propriedades adesivas. Além disso, a viscosidade do ligante betume-borracha aumenta com a redução de óleos aromáticos para lubrificar o ligante [3].

Estudos laboratoriais também comprovaram que ligantes betume-borracha apresentaram redução na dependência da temperatura e na frequência de carregamento. Em altas temperaturas, a resistência à deformação permanente, medida com o Reómetro de Corte Dinâmico (DSR), aumentou proporcionalmente à taxa de adição de borracha. Comportamento semelhante foi observado para as temperaturas dos pontos de amolecimento do ligante betume-borracha. Em baixas temperaturas, a rigidez medida com o Reómetro de Flexão de Vigas (BBR) diminuiu, apesar da taxa de redução não ser tão importante quanto a verificada para altas temperaturas. No entanto, essa redução observada ainda era significativa. Além disso, a adição de borracha também reduziu a susceptibilidade térmica aquando da adição de partículas de borracha ao ligante betuminoso [4-8]. A taxa de adição de borracha ao ligante betuminoso mostrou contribuição significativa nos ligantes modificados, seguido pela temperatura de mistura entre ambos [9,10]. O tempo de mistura também apresentou contribuição na reacção entre ligante versus borracha [10]. Por outro lado, o diâmetro das partículas de borracha apresentou a menor contribuição em modelos estatísticos avaliados [9]. Adicionalmente, a elasticidade de ligantes betume-borracha em altas e baixas temperaturas mostrou-se proporcional à taxa de adição de borracha ao ligante betuminoso [10].

2.2 Extracção e recuperação de ligantes betuminosos

A norma ASTM 2172 [11] apresenta 5 métodos disponíveis para execução da extracção de ligantes oriundos de misturas betuminosas. Entre eles tem-se a extracção mediante Centrifugação (Método A), Refluxo (Métodos B, C e D) e Vácuo (Método E). Os Métodos A e B são os mais populares. O Método B (Refluxo) é de fácil execução, porém foi constatado que os ligantes extraídos pelo mesmo apresentavam envelhecimento [12]. Esse facto poderia ser atribuído provavelmente às altas temperaturas e ao longo período de exposição do material ao solvente utilizado na extracção. Nesse método também observou-se a tendência de recolha parcial de ligante, pois os agregados apresentaram resíduos de ligante após a extracção, o que poderia influenciar as propriedades do ligante durante as análises posteriores [12]. Além dos métodos expostos anteriormente, também existe um método que permite a extracção do ligante betuminoso mediante utilização de solvente aquecido [13]. Nesse caso, uma quantidade de solvente é adicionada à mistura betuminosa fragmentada sendo ambos aquecidos até o momento em que seja constatada a inexistência de ligante betuminoso no líquido extraído. Do ponto de vista dos solventes, a extracção pode ser realizada mediante bissulfato de carbono (CS_2), benzeno, tricloroetileno (TCE), 1,1,1-tricloroetano, tolueno e cloreto de metileno.

Para a recuperação do ligante betuminoso, existem basicamente 2 métodos. O primeiro é conhecido como Método de Recuperação Abson-ASTM D 1856 [14] e o segundo é denominado Evaporador Rotativo (ou Rotavapor-ASTM D 5404 [15]). O Método de Recuperação Abson envolve a recuperação de ligante mediante bolhas de dióxido de carbono (CO_2), enquanto o Rotavapor utiliza um evaporador rotatório para acondicionar o

ligante extraído e vácuo aliado à arrefecimento para vaporizar e eliminar o solvente presente nesse ligante. Tendo em conta a bibliografia existente sobre recuperação de ligantes, constata-se que os ligantes recuperados podem apresentar remoção incompleta de solvente, enrijecimento do solvente no ligante extraído e perda de voláteis nesse ligante. Ensaios laboratoriais tem demonstrado que a maioria dos solventes envelhecem durante o processo de extracção [16]. Por exemplo, o Método de Recuperação Abson padrão deixou solvente residual em ligante recuperado, o que poderia reduzir significativamente o amolecimento, especialmente para grandes quantidades de ligante recuperado de misturas betuminosas envelhecidas em campo. Por outro lado, o Método do Rotavapor mostrou menor consistência e menor reprodutibilidade comparado ao Método de Recuperação Abson [17].

Segundo Turgeon [18], em Minnesota (EUA) foram construídas secções de ensaio a fim de comparar o desempenho em campo de misturas convencionais e misturas betume-borracha. As camadas de desgaste e de ligação foram executadas respectivamente, com mistura betuminosa densa contendo betume-borracha e mistura betuminosa densa convencional. As misturas betume-borracha foram realizadas mediante via húmida. As partículas de borracha apresentaram diâmetro máximo de 1,18 mm, sendo adicionadas à taxa de 20,2% em relação a massa do ligante 120/150 (grau de penetração). Passados 5 anos sob tráfego e condições climatéricas adversas, foram então recolhidos carotes nessas secções de ensaio. Desses carotes, foram extraídos e recuperados ligantes convencionais e ligantes betume-borracha. Para a recuperação dos ligantes utilizou-se o Método de Recuperação Abson (o método de extracção do ligante e respectivo solvente não foram identificados no relatório). Os ensaios laboratoriais realizados apresentaram os resultados ilustrados no Quadro 1.

Quadro 1. Ensaio de penetração a 25°C

	À época da construção ($\times 10^{-1}$ mm)	Passados 5 anos após a construção ($\times 10^{-1}$ mm)	
		Mistura da camada de desgaste	Mistura da camada de ligação
Ligante betume-borracha	77	43	82
Ligante convencional	144	25	72

Referência: [18]

Conforme ilustra o Quadro 1, passados 5 anos, o ligante betume-borracha recuperado da camada de desgaste apresentou menor enrijecimento e menor consistência comparado ao ligante recuperado convencional. Por outro lado, o ligante betume-borracha recuperado da camada de ligação, não exposta ao tráfego e às intempéries, não sofreu envelhecimento, contrariamente ao constatado para o ligante convencional recuperado que apresentou importante enrijecimento, apesar de não tão significativo como o observado para a camada de desgaste. Apesar dos resultados favoráveis aos ligantes betume-borracha, Turgeon [18] suspeitou que as partículas de borracha poderiam ter sido parcialmente dissolvidas pelos solventes usados para a extracção dos ligantes assim como pelo Método de Recuperação Abson.

Em Iowa (EUA) foram realizados ensaios laboratoriais para extracção e recuperação de ligantes de misturas betuminosas densas convencionais e misturas betuminosas densas betume-borracha [19]. As misturas betume-borracha foram preparadas mediante via húmida, sendo adicionadas partículas de borracha entre 2 e 0,6 mm ao ligante betuminoso à taxa de 10% em massa do ligante além de 3% de óleo estendedor. A extracção dos ligantes foi executada por meio do Método de Refluxo, sendo utilizado tricloroetano como solvente, enquanto o Método de Recuperação Abson foi utilizado para a recuperação do ligante extraído. Segundo ilustra o Quadro 2, os ensaios realizados para ligantes antes e depois da recuperação demonstraram que o ligante betume-borracha não sofreu envelhecimento.

Quadro 2. Ensaio de penetração a 25°C e temperatura de ponto de amolecimento

	Ligantes considerados		Após Método de Recuperação Abson
	Ligante convencional	Ligante betume-borracha	Ligante betume-borracha
Penetração a 25°C ($\times 10^{-1}$ mm)	164	109	115
Temperatura de amolecimento (°C)	39	49	-----

Referência: [19]

3 MATERIAIS – LIGANTES E MISTURAS BETUMINOSAS

Neste estudo utilizou-se o ligante betuminoso japonês 60/80 (grau de penetração) para as misturas convencionais e o mesmo ligante acrescido de borracha triturada para os ligantes betumes-borracha. Tendo em conta estudos desenvolvidos anteriormente pelos autores deste artigo, adicionou-se a borracha triturada ao ligante betuminoso à taxa de 15% em relação a massa do ligante [7,8]. Ainda do ponto de vista da borracha triturada, a maioria dos grãos de borracha apresentaram respectivamente, diâmetros 0,2 mm; 0,4 mm e 0,6 mm. O ligante convencional e os ligantes betume-borracha (não envelhecidos) apresentaram as características descritas no Quadro 3.

Quadro 3. Características dos ligantes não envelhecidos avaliados neste trabalho

	Ligante convencional 60/80	Ligante betume-borracha (borracha 0,2 mm)	Ligante betume-borracha (borracha 0,4 mm)	Ligante betume-borracha (borracha 0,6 mm)
Penetração a 25°C ($\times 10^{-1}$ mm)	72	55	46	44
Temperatura de amolecimento (°C)	47,6	59,2	64	63,1
Ponto de inflamação (°C)	339	264	308	272

Após a análise inicial desses ligantes não envelhecidos, procedeu-se ao seu envelhecimento em curto e em longo prazo. O envelhecimento dos ligantes em curto prazo foi realizado com os aparelhos RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) e TFOT (Thin Film Oven Test). O equipamento RTFOT utiliza 8 garrafas de vidro às quais adicionam-se respectivamente, 35 gramas de ligante betuminoso. Essas garrafas são acondicionadas em um disco vertical giratório localizado no interior do aparelho e submetidas a rotação em relação ao eixo horizontal desse disco. A cada rotação, os orifícios das garrafas que contem as amostras passam frente a um jacto de ar aquecido, o qual expurga os vapores acumulados no interior das garrafas. O ensaio é realizado durante 80 ± 5 minutos à temperatura de 163°C. O aparelho TFOT permite utilizar 2 ou 4 tabuleiros cilíndricos de fundo raso aos quais adiciona-se respectivamente, 50 gramas de ligante betuminoso. Esses tabuleiros são então acondicionados em um disco horizontal giratório, que desenvolverá entre 5,5 e 6 RPM durante 5 horas à temperatura de 163°C [4].

O envelhecimento dos ligantes em longo prazo foi realizado com o aparelho PAV (Pressure Aging Vessel). Esse aparelho utiliza 10 tabuleiros cilíndricos de fundo raso, aos quais são adicionados respectivamente, 50 gramas de ligante previamente envelhecido em curto prazo. O ensaio é realizado durante 20 horas sob pressão constante de 2.070 kPa e à temperatura de 90°C, 100°C ou 110°C, dependendo das condições climáticas do local onde se

prevê a construção do pavimento betuminoso [4]. Para este estudo, considerou-se uma temperatura de 100°C a fim de avaliar-se os pavimentos betuminosos localizados nas regiões que apresentam maiores temperaturas no Japão.

Por outro lado, este trabalho avaliou misturas envelhecidas em curto e em longo prazo, sendo o envelhecimento destas realizado segundo o Método Standard Superpave [20]. O envelhecimento de curto prazo simula a oxidação sofrida pela mistura betuminosa durante o processo de mistura em central e durante as operações de transporte e construção da camada betuminosa. Esse envelhecimento é executado após o procedimento de mistura mecânica do ligante (modificado ou convencional) e agregados e prévio à compactação dos provetes. A mistura betuminosa resultante é então acondicionada em uma estufa com ventilação forçada à temperatura de 135°C ± 1°C durante 4 h ± 5 min. A cada 60 minutos a mistura é remexida a fim de manter-se um envelhecimento uniforme. Findo o período de 4 horas, compactam-se os provetes com o material envelhecido. Se os provetes compactados forem posteriormente submetidos ao envelhecimento de longo prazo, deve-se então arrefecê-los em outra estufa (programada para 60°C) até que esses provetes apresentem temperatura de 60°C ± 1°C.

O envelhecimento de longo prazo simula a oxidação total experimentada pela mistura compactada em um período de 7 a 10 anos em serviço. As misturas betuminosas compactadas e previamente envelhecidas em curto prazo são acondicionadas em uma estufa com ventilação forçada à temperatura de 85°C ± 1°C durante 120 h ± 0,5 h. Após esse período, a estufa é desligada, as portas são abertas e deixa-se os provetes arrefecerem até temperatura ambiente.

4 ENSAIOS LABORATORIAIS

Inicialmente foram realizados ensaios convencionais e de corte dinâmico para caracterizar o ligante convencional e os ligantes betume-borracha, envelhecidos em curto e em longo prazo. Paralelamente ao estudo de caracterização dos ligantes do ponto de vista do envelhecimento, foram confeccionadas respectivamente, misturas betuminosas com ligante convencional (não envelhecido) e com ligantes betume-borracha (não envelhecidos). Essas misturas betuminosas foram então envelhecidas em curto e longo prazo e a partir dos provetes obtidos realizou-se a extração dos ligantes em relação aos agregados. Posteriormente foram recuperados os ligantes e na sequência, procedeu-se a ensaios convencionais e de corte dinâmico nesses ligantes recuperados.

4.1 Extração do ligante betuminoso

Nesta investigação utilizou-se o método do solvente aquecido para extrair o ligante dos agregados. O aparelho utilizado nesse caso consiste de uma torre metálica que contém em seu interior um cesto. A superfície desse cesto é constituída por uma malha finamente perfurada que recebe uma amostra fragmentada de mistura betuminosa. Adiciona-se então no topo da torre 350~500 ml de solvente e submete-se o conjunto ao aquecimento, realizando-se periodicamente aferições do líquido extraído. O processo de extração é concluído quando todo o solvente contaminado pelo ligante tenha sido completamente destilado.

4.2 Recuperação do ligante betuminoso

O Método de Recuperação Abson consiste em remover o solvente do ligante extraído mediante destilação com o auxílio de CO₂. Inicialmente adiciona-se aproximadamente 120 ml de solução ligante-solvente em um frasco de fundo raso e boca larga com capacidade para 500 ml. Esse frasco é aquecido electricamente, a solução em seu interior ferve, o solvente é condensado e recolhido em um frasco receptor [21].

4.3 Ensaios convencionais

Os ensaios convencionais permitem avaliar a consistência dos ligantes betuminosos. Essa consistência pode ser analisada mediante ensaios de penetração, temperatura do ponto de amolecimento e ensaios de viscosidade.

4.3.1 Ensaio de penetração

Este ensaio, realizado à temperatura de 25°C, representa uma medição indirecta da consistência do ligante betuminoso. Uma agulha padrão posicionada verticalmente, sobre a qual repousa uma massa de

100 g, penetra a amostra de ligante betuminoso à temperatura ambiente durante 5 segundos. A rigidez do ligante é determinada em décimos de milímetro ($\times 10^{-1}$ mm) tendo em conta a profundidade de penetração da agulha padrão [22].

4.3.2 Ensaio da temperatura do ponto de amolecimento (Método de anel e bola)

Neste ensaio, determina-se a temperatura na qual ocorre a mudança de fase, plástica para líquida, do ligante betuminoso [23].

4.3.3 Ensaio Superpave – Corte Dinâmico

O ensaio de corte dinâmico é realizado mediante o Reómetro de Corte Dinâmico (DSR). Esse aparelho permite avaliar o desempenho de ligantes betuminosos não envelhecidos e envelhecidos em curto e em longo prazo, tendo em conta temperaturas altas e intermediárias. As componentes, elástica e viscosa, de ligantes betuminosos podem ser determinadas a partir da avaliação da extensão ou deformação resultante à aplicação de uma tensão. Se o material for elástico, então a extensão estará em fase com a tensão aplicada. Se o material for viscoso, então ter-se-á uma extensão desfasada de 90° em relação à tensão. O ângulo de fase (δ), determinado em graus, representa o quanto a extensão está desfasada em relação à tensão aplicada. Por outro lado, o Módulo de Corte Complexo ($|G^*|$) representa o vector soma entre o Módulo de Corte de Armazenamento (G') e o Módulo de Corte de Perda (G''). O Módulo de Corte de Perda (G'') mede a energia dissipada durante cada ciclo de carregamento. Se o ângulo de fase (δ) for zero, o G'' iguala-se a G' e a resposta é totalmente elástica ($|G^*|$ = componente de armazenamento). Se o ângulo de fase (δ) for 90° , então a resposta é totalmente viscosa ($|G^*|$ = componente viscosa) [2]. O Módulo de Corte Complexo ($|G^*|$) de ligantes betuminosos é um indicador da rigidez ou resistência total à deformação do ligante submetido a um carregamento. Para ligantes betuminosos não envelhecidos, a extensão por corte varia entre 9% e 15% e o valor alvo é normalmente considerado igual a 12%. Tendo em conta a tensão de corte, a mesma varia entre 0,09 kPa à 0,15 kPa sendo o valor alvo igual a 0,12 kPa [2]. Por outro lado, para ligantes envelhecidos em curto prazo, a extensão de corte varia entre 8% e 12%, sendo o valor alvo igual a 10%, enquanto a tensão de corte varia entre 0,18 kPa e 0,26 kPa, sendo o valor alvo igual a 0,22 kPa [2].

5 ANÁLISE DE DADOS

Neste trabalho, os ensaios convencionais e de corte dinâmico foram realizados para 3 amostras de cada ligante considerado. Nesta secção, os valores apresentados para cada parâmetro correspondem respectivamente ao valor médio obtido entre as 3 amostras.

5.1 Ensaio convencionais

A profundidade de penetração a 25°C em ligantes recuperados de misturas densas betume-borracha (MDBB daqui em diante) e envelhecidos em curto prazo, aumentaram ligeiramente comparado aos ligantes betume-borracha envelhecidos em curto prazo e esse crescimento esteve relacionado ao diâmetro das partículas de borracha (Fig. 1a). Portanto, a consistência desses ligantes diminuiu. Por outro lado, os ligantes convencionais recuperados apresentaram redução na penetração, o que demonstra um enrijecimento do material.

Tendo em conta os ligantes recuperados de misturas envelhecidas em longo prazo (Fig. 1b), constatou-se que os valores de penetração aumentaram significativamente após a recuperação, especialmente para as misturas que continham partículas de borracha. Desta forma, esses ligantes amoleceram e tiveram portanto redução de consistência. Além disso, o aumento na penetração em ligantes recuperados MDBB mostrou-se ligeiramente inversa ao diâmetro das partículas de borracha.

Considerando-se as temperaturas de ponto de amolecimento, pode constatar-se que os ligantes recuperados de misturas betume-borracha e misturas convencionais apresentaram temperaturas com mesma ordem de magnitude. Apesar disso, os ligantes recuperados de misturas convencionais apresentaram ligeiro aumento da consistência (Fig. 2a), enquanto os ligantes recuperados de misturas MDBB exibiram redução da temperatura de amolecimento, e portanto, menor enrijecimento. Por outro lado, tendo em conta os ligantes recuperados de misturas envelhecidas em longo prazo, observou-se em todos os casos, temperaturas com a mesma ordem de magnitude, além de decréscimo dessas temperaturas de amolecimento (Fig. 2b) quando comparadas às

temperaturas de amolecimento dos ligantes envelhecidos em longo prazo. Também constatou-se que os ligantes recuperados oriundos de misturas betume-borracha exibiram maior redução na temperatura de amolecimento. Em resumo, em todos os casos reduziu-se a consistência e a resistência à deformação permanente.

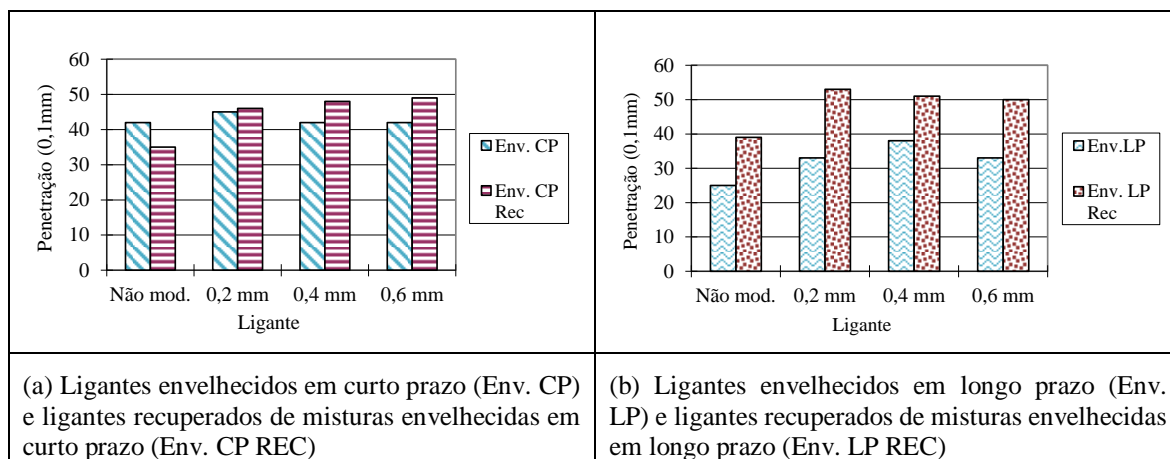


Fig. 1. Penetração a 25°C

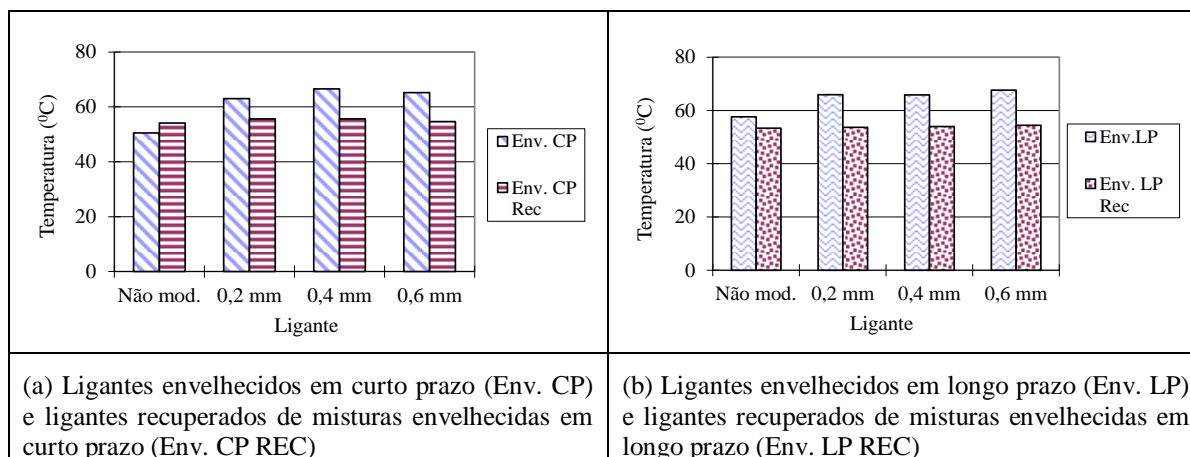


Fig. 2. Temperaturas de ponto de amolecimento

Os ensaios de penetração e temperatura de ponto de amolecimento executados em ligantes recuperados de misturas MDBB mostraram redução do enrijecimento. Isto pode ter ocorrido devido a presença de componentes antioxidantes da borracha ainda presentes nos ligantes recuperados, ou talvez devido à presença de solvente (tricloroetileno) residual que reagiu e/ou dissolveu parcialmente partículas de borracha durante o processo de extração e/ou recuperação dos ligantes. Durante os ensaios de penetração constatou-se a presença de partículas de borracha nos ligantes betume-borracha recuperados.

5.2 Corte dinâmico

5.2.1 Em altas temperaturas

O Reômetro de Corte Dinâmico (DSR) utilizado apresentava uma configuração de pratos paralelos, de 25 mm de diâmetro, e todos os ensaios foram realizados à frequência de 1,59 Hz e considerando uma extensão constante de 12%. Além disso, em todas as análises adoptou-se 1 mm para a distância entre o prato superior e o prato inferior. Em altas temperaturas o comportamento dos ligantes recuperados foi avaliado entre 45°C e 65°C, considerando-se incrementos de 5°C entre esses valores.

Comparando-se os ligantes envelhecidos em curto prazo e os ligantes recuperados de misturas envelhecidas em curto prazo (Fig. 3), observou-se um decréscimo significativo do $|G^*|$ à medida que a temperatura aumentava, no entanto, todos os ligantes recuperados de misturas MDBB apresentaram desempenho superior ao constatado para o ligante convencional recuperado. Esses resultados corroboram aqueles observados nos ensaios de penetração e ponto de amolecimento. Além disso, o diâmetro das partículas de borracha mostrou pouca influência nos valores de $|G^*|$ medidos a cada temperatura. Também foi observado que o ligante convencional recuperado apresentou maior susceptibilidade à temperatura. Por outro lado, os ligantes recuperados de misturas betume-borracha envelhecidas em longo prazo apresentaram comportamento semelhante ao observado para as misturas envelhecidas em curto prazo.

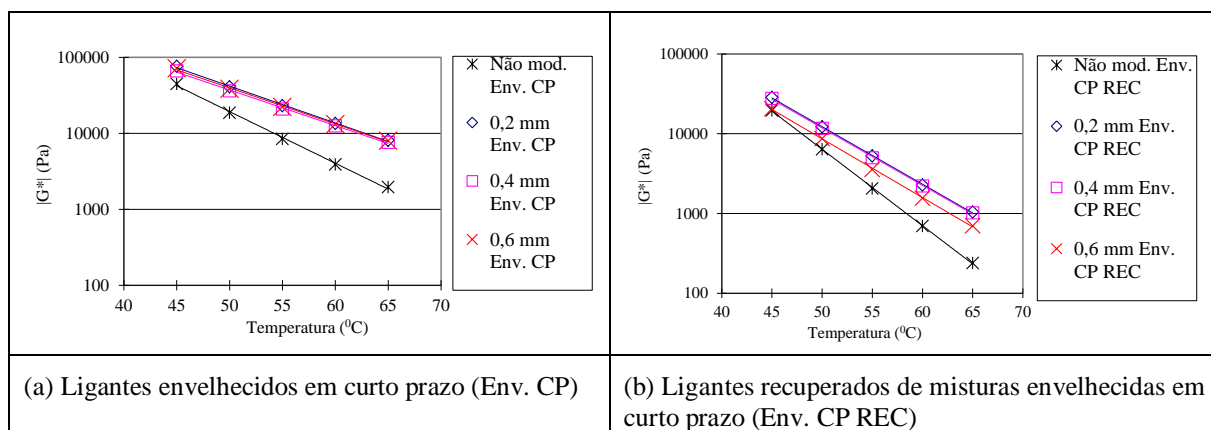


Fig. 3. Módulo de Corte Complexo ($|G^*|$) em altas temperaturas

Considerando-se os ângulos de fase (δ), observou-se (Fig. 4) que o ligante convencional apresentou em todas as temperaturas avaliadas, maiores valores para esse parâmetro quando comparado aos ligantes recuperados de misturas MDBB. Portanto, os ligantes recuperados betume-borracha tiveram um desempenho superior ao ligante recuperado convencional. Também é importante mencionar que independente do diâmetro das partículas de borracha, os ângulos de fase apresentaram a mesma ordem de magnitude nos ligantes recuperados modificados com borracha. Por outro lado, os ligantes recuperados de misturas betume-borracha envelhecidas em longo prazo apresentaram comportamento semelhante ao observado para as misturas envelhecidas em curto prazo.

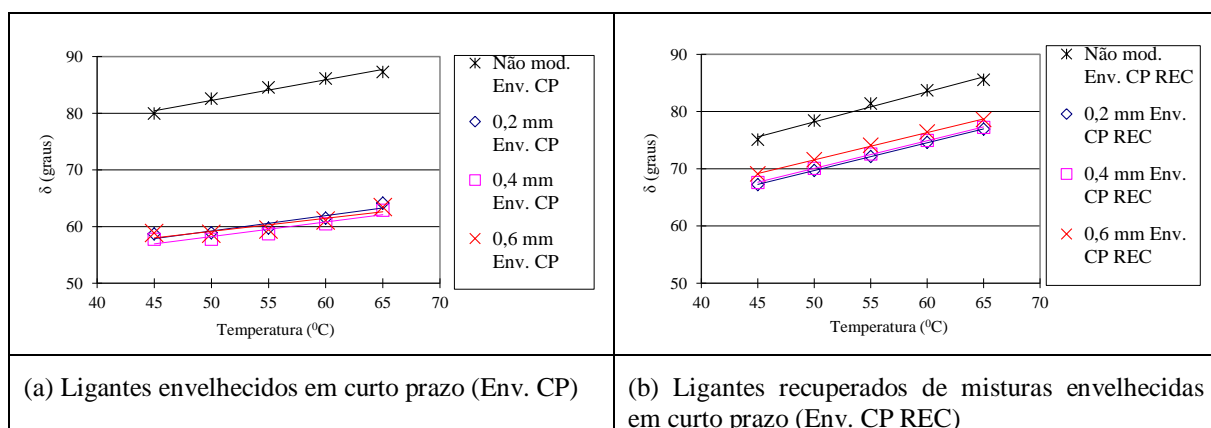


Fig. 4. Ângulos de fase (δ) em altas temperaturas

5.2.2 Em temperaturas intermediárias

Em temperaturas intermediárias, o aparelho DSR empregou uma configuração de pratos paralelos, de 8 mm de diâmetro, sendo todos os ensaios realizados à frequência de 1,59 Hz e considerando-se uma extensão constante de 1%. Além disso, em todas as análises adotou-se 2 mm para a distância entre o prato superior e o prato inferior. O comportamento dos ligantes recuperados foi avaliado entre 40°C e 10°C, considerando-se decréscimos de 5°C entre esses valores. Para ligantes envelhecidos em curto prazo, observou-se (Fig. 5) que o módulo $|G^*|$ aumentou com o decréscimo da temperatura para todos os ligantes recuperados. Além disso, tendo em conta os ligantes modificados com borracha, os valores de $|G^*|$ apresentaram a mesma ordem de magnitude independente do diâmetro da borracha. Também constatou-se que para as menores temperaturas avaliadas, os valores de $|G^*|$ foram ligeiramente inferiores aos observados para os ligantes recuperados convencionais, portanto, houve um menor enrijecimento desses ligantes, e desta forma, ligeira redução na resistência à deformação. Tem-se como resultado, melhoria na resistência ao fendilhamento por fadiga. Desempenho semelhante foi constatado para os ligantes envelhecidos em longo prazo e ligantes recuperados envelhecidos em longo prazo.

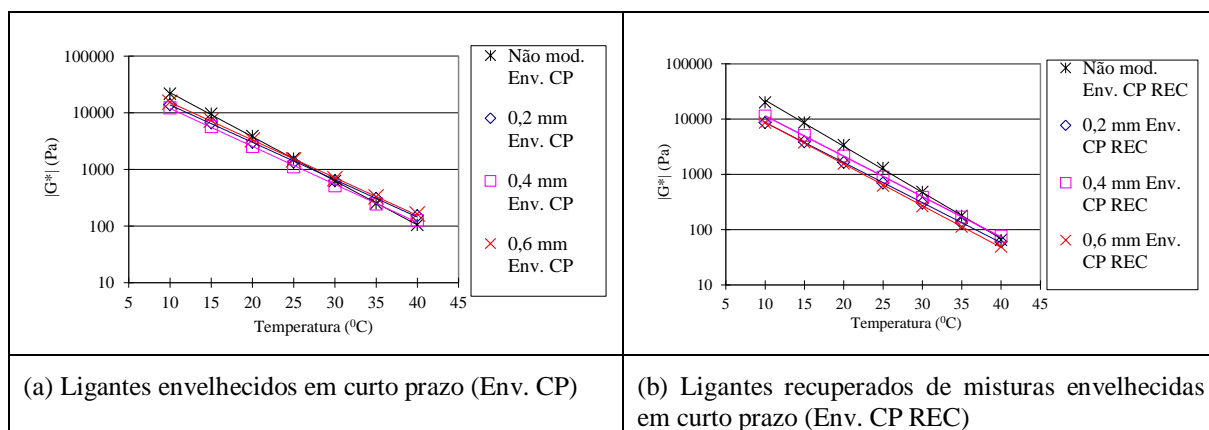


Fig. 5. Módulo de Corte Complexo ($|G^*$) em temperaturas intermediárias

Considerando-se os ângulos de fase (Fig. 6) para ligantes recuperados de misturas envelhecidas em curto e longo prazo, constatou-se valores com a mesma ordem de magnitude à menor temperatura de ensaio analisada. Além disso, os ângulos de fase decresceram à medida que a temperatura diminuiu, melhorando desta forma as propriedades elásticas dos ligantes.

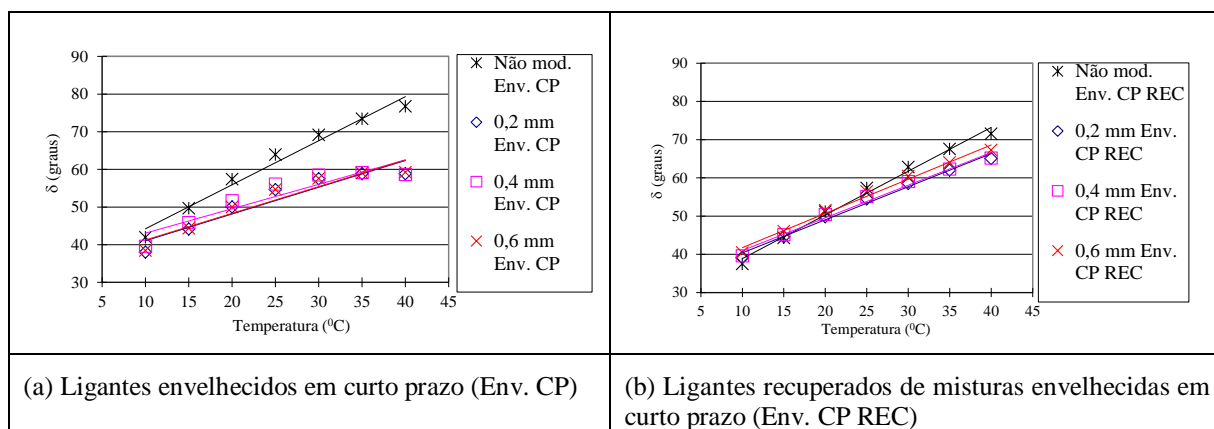


Fig. 6. Ângulos de fase (δ) em temperaturas intermediárias

6 CONCLUSÕES

Este estudo avaliou ligantes betuminosos convencionais e ligantes betume-borracha, envelhecidos em curto e em longo prazo. Paralelamente foram desenvolvidos ensaios com ligantes recuperados de misturas convencionais e de misturas betume-borracha, envelhecidas em curto e em longo prazo. Foram constatados:

- Em ensaios convencionais (penetração e temperatura de ponto de amolecimento), os ligantes recuperados de misturas betume-borracha, envelhecidos em curto e longo prazo, apresentaram menor enrijecimento comparado aos ligantes de misturas recuperadas convencionais.
- Os ensaios de corte dinâmico em altas temperaturas mostraram que os ligantes recuperados de misturas betume-borracha apresentaram maior resistência à deformação e maior elasticidade nas temperaturas mais elevadas, comparado aos ligantes recuperados de misturas convencionais.
- Em temperaturas intermediárias, os ensaios de corte dinâmico permitiram constatar que os ligantes recuperados de misturas betume-borracha mostraram menor resistência à deformação e aproximadamente a mesma elasticidade observada para ligantes recuperados de misturas convencionais.

9 AGRADECIMENTOS

Este estudo teve o apoio do Japan Asphalt Rubber Research Group. O autor principal também agradece o apoio financeiro fornecido pela Japan International Cooperation Agency (JICA).

10 REFERÊNCIAS

1. Hicks, R.G.; Lundy, J.R.; Leahy, R.B.; Lunson, D. e Epps, J. Crumb rubber modifiers (CRM) in asphalt pavements: Summary of practices in Arizona, California, and Florida. Report No. FHWA-SA-95-056. Federal Highway Administration, United States Department of Transportation, 1995.
2. Roberts, F.L.; Kandhal, P.S.; Brown, E.R.; Lee, D. e Kennedy, T.W. *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction*. Second edition. Lanham, Maryland: National Asphalt Pavement Association Research and Education Foundation, 1996.
3. Federal Highway Administration - FHWA. State of practice. Design and construction of asphalt paving materials with crumb rubber modifier. Federal Highway Administration. United States Department of Transportation, 1992.
4. Bahia, H.U. e Davies, R. Effect of crumb-rubber modifiers (CRM) on performance-related properties of asphalt binders. *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 63, pp.414-449, 1994*.
5. Bahia, H.A. Critical Evaluation of asphalt modification using strategic highway research program concepts. *Transportation Research Record 1488. Transportation Research Board. Washington, DC, USA. pp. 82-88, 1995*.
6. Hanson, D.I. e Duncan, G.M. Characterization of crumb rubber-modified binder using Strategic Highway Research Program Technology. *Transportation Research Record 1488. Transportation Research Board. Washington, DC, USA. pp. 21-31, 1995*.
7. Souza, R.O.; Himeno, K.; Kobayashi, A. e Kougo, K. Evaluation of asphalt-rubber binders for different tire rubber particles size. *Proceedings of the 6th International Summer Symposium. International Activities Committee. Japan Society of Civil Engineers, JSCE. Saitama, Japan. pp. 369-372, 2004*.
8. Souza, R.; Himeno, K.; Kobayashi, A. e Kougo, K. Influence of ground rubber type on Japanese asphalt-rubber binders. *CD Proceedings. XIII Pan-American Conference on Traffic and Transportation Engineering. Albany, New York, USA. 12p, 2004*.
9. Oda, S. *Análise da viabilidade técnica da utilização do ligante asfalto-borracha em obras de pavimentação*. Universidade de São Paulo. Tese de Doutorado. São Carlos, Brasil, 251p, 2000.
10. Specht, L. P. *Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Tese de Doutorado. Porto Alegre, Brasil. 279p, 2004.

11. American Society for Testing and Materials. Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Bitumen from Bituminous Paving Mixtures, ASTM D 2172-93 Method B, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.03, 1995.
12. Collins-Garcia, H; Tia, M.; Roque, R. e Choubane, B. An evaluation of an alternative solvent for extraction of asphalt to reduce health and environmental hazards. *Transportation Research Board Annual Meeting. Washington, DC, USA, 2000.*
13. California Department of Transportation. California Test 310. Method of test for determination of asphalt and moisture contents of bituminous mixtures by hot solvent extraction. Engineering Service Center. Transportation Laboratory. Sacramento, California, USA, 2000.
14. American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Recovery of Asphalt from Solution by Abson Method, ASTM D1856 – 09, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.03.
15. American Society for Testing and Materials. Standard Test Method For Recovery of Asphalt From A Solution Using the Rotavapor, ASTM D 5404-93, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.03, 1995.
16. Burr, B.L.; Davison, R.R.; Jemison, H.B.; Glover, C.J. e Bullin, J.A. Asphalt hardening in extraction solvents. *Transportation Research Record No. 1323. Transportation Research Board. Washington, DC, pp. 70-76, 1991.*
17. Burr, B.L.; Davison, R.R.; Glover, C.J. e Bullin, J.A. Solvent removal from asphalt. *Transportation Research Record No. 1269. Transportation Research Board. Washington, DC, USA. pp. 1-8, 1990.*
18. Turgeon, C.M. An evaluation of dense-graded asphalt-rubber concrete in Minnesota. Physical Research Section. Office of Materials and Research. Minnesota Department of Transportation. Report MN/RD - 92/01, 1991.
19. Adam, J.F. Laboratory Evaluation of Asphalt-Rubber in Asphalt Paving Mixtures. Final Report for Project MLR-89-15. Physical Tests Engineer. Iowa Department of Transportation. Highway Division. Office of Materials. Ames, Iowa, 1990.
20. Strategic Highway Research Program. SHRP M-007. Standard method of test for short- and long-term aging of bituminous mixes. Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC, USA, 1994.
21. JPI – 5S – 31. Method of test for recovery of asphalt from solution. (em japonês), 1963.
22. JIS K 2207a. Method of test for penetration of asphalt. (em japonês), 1963.
23. JIS K 2207b. Method of test for softening point of asphalt (Ring and Ball Method). (em japonês), 1963.