



Universidade do Minho

[CN-12]

Minhoto, M.J.C., **Pais, J.C.**, Pereira, P.A.A.

“A optimização das misturas betuminosas com betume modificado com borracha”

2º Congresso Rodoviário Português - Estrada 2002, Lisboa, 2002, p. 257-

268

2.º Congresso Rodoviário Português

As vias da segurança

VOLUME II

18-20 Novembro 2002

Laboratório Nacional de Engenharia Civil

ÍNDICE

VOLUME II

Tema 5

TECNOLOGIAS DE CONSTRUÇÃO

5.1. TERRAPLENAGENS	3
DANIFICAÇÃO DURANTE A INSTALAÇÃO DE GEOSSINTÉTICOS – COEFICIENTES DE SEGURANÇA A APLICAR NO DIMENSIONAMENTO	5
Margarida Pinho Lopes / Maria de Lurdes Lopes	
MÉTODO DAS PASTILHAS PARA IDENTIFICAÇÃO EXPEDITA DE SOLOS TROPICAIS	17
Rita Moura Fortes / João Virgílio Merighi / Alexandre Zuppolini Neto	
ESTUDO DA APLICABILIDADE DE ESCÓRIAS DE INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NA CONSTRUÇÃO RODOVIÁRIA	29
Tawfik Hadjadji / Rui Godinho / Carlos Dinis de Sousa / Anália Torres	
CORTES DE ESTRADAS MUNICIPAIS EM COIMBRA, NO INVERNO DE 2000/2001, DEVIDO A DESLIZAMENTOS	41
Mário Quinta Ferreira / Teresa Quinta Ferreira	
NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE EM OBRAS GEOTÉCNICAS	53
Licínia Gamito	
AValiação <i>IN SITU</i> DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DE CAMADAS GRANULARES E DE LEITO DE PAVIMENTO COM DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO MANUAL	65
Rui Barros / Tomás Espírito Santo / Eduardo Mira Fernandes	

IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DA QUALIDADE SEGUNDO A NORMA NP EN ISO 9001:2000 NA CONSTRUÇÃO RODOVIÁRIA	77
Alfredo José de Castro Ferrão da Fonseca Marques	
5.2. PAVIMENTOS	89
EMULSÕES TERMO-ADERENTES. EXPERIÊNCIA NA SUA UTILIZAÇÃO	91
Paulo Garrido / Hugo Guimarães	
CONCEPÇÃO DE UMA ESTRUTURA FLEXÍVEL INOVADORA, MEDIANTE A CONJUGAÇÃO DE DOIS PROCESSOS CONSTRUTIVOS NÃO TRADICIO- NAIS	99
Carlos M. Valverde Miranda	
EXPERIENCIA DEL EMPLEO DE LAS BASES DE ALTO MÓDULO EN LA M-501 (MADRID)	109
Juan José Potti	
ACTUACIONES EN LOS FIRMES DENTRO DE LOS CONTRATOS DE CONSER- VACIÓN INTEGRAL. CASO ESPAÑOL	123
Juan José Potti / María Martínez	
A QUALIDADE NAS OBRAS RODOVIÁRIAS – A EXPERIÊNCIA DO DEPARTA- MENTO DE CONSTRUÇÃO DE VIAS, DA DIRECÇÃO MUNICIPAL DE INFRAESTRUTURAS E SANEAMENTO, DA CÂMARA MUNICIPAL DE LISBOA	135
Paula Candelário / Mavildia Yen / José Fonseca	
METODOLOGIA SIMPLIFICADA PARA CÁLCULO DA TEMPERATURA DE SERVIÇO EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	145
Lucília Faria Aquino / Luís Picado-Santos	
REFORÇO DOS PAVIMENTOS DO AERÓDROMO DE ALVERCA – REDIMENSIO- NAMENTO E REQUALIFICAÇÃO PARA AVIÕES “WIDE-BODY”	159
Carlos Alberto de Moraes Neves Brás / Joaquim José Carvalheira Baptista Veloso	
ESTRUTURAS DE PAVIMENTO RODOVIÁRIO FLEXÍVEL	171
António Miguel Baptista / Luís Picado-Santos	

UTILIZAÇÃO DE TECNOLOGIAS NA BENEFICIAÇÃO DE ESTRADAS URBANAS Catarina Ferreira	185
CLASSIFICAÇÃO DA CAPACIDADE DE CARGA EM TERMOS DO PCN (<i>Pave- ment Classification Number</i>) DOS PAVIMENTOS AERONÁUTICOS DA BASE AÉREA N.º 6 NO MONTIJO	193
Joaquim João da Cruz Salvado / António Maria Afonso Marcos	
COMPARAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DE MISTURAS BETUMI- NOSAS DE ALTO MÓDULO OBTIDAS SOBRE PROVETES EXTRAÍDOS DO PAVIMENTO E PRODUZIDOS EM LABORATÓRIO	205
Silvino Dias Capitão / Luís Picado-Santos	
ASPECTOS GERAIS DE RECICLAGEM A FRIO	217
Luís Vieira	
COMPLEXO ANTIFISSURAS GEOTEXTIL IMPREGNADO E AREIA BETUME	223
Luís Vieira	
IMPORTÂNCIA DO COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS GRANULARES NO DIMENSIONAMENTO E NA ECONOMIA DE CONSTRUÇÃO DE PAVI- MENTOS FLEXÍVEIS	233
José Manuel Coelho das Neves / António Gomes Correia	
OBSERVAÇÃO DO FENDILHAMENTO DE PAVIMENTOS SEMI-RÍGIDOS	245
Luís Quaresma / António Pinelo	
A OPTIMIZAÇÃO DAS MISTURAS BETUMINOSAS COM BETUME MODIFI- CADO COM BORRACHA RECICLADA DE PNEUS USADOS	257
Manuel Minhoto / Jorge Pais / Paulo Pereira	
DESENVOLVIMENTO DE ENSAIOS PARA ESTUDO DA ADESIVIDADE NAS MISTURAS BETUMINOSAS	269
Hugi Silva / Jorge Pais / Paulo Pereira	
MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO DE REFORÇOS PARA CONTROLAR A REFLEXÃO DE FENDAS	281
Jorge Sousa / Jorge Pais / Rachid Saïm / George Way	

A INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA RIGIDEZ DAS MISTURAS BETUMINOSAS	295
Jorge Pais / Paulo Pereira	
APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE RECICLAGEM DE PAVIMENTOS <i>IN SITU</i> NA BENEFICIAÇÃO DA EN 383 – CANHESTROS/ALJUSTREL	305
Rui Simões / Isabel Paul	
ESTUDO DO FENDILHAMENTO COM ORIGEM NA SUPERFÍCIE	319
Elisabete Freitas / Paulo Pereira / Luís Picado-Santos	
DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS BETUMINOSAS EM CAMADAS DE DESGASTE – SUA CARACTERIZAÇÃO LABORATORIAL	331
Ana Cristina Freire / Maria de Lurdes Antunes / Luís Picado-Santos	
TERMINAL DE CONTENTORES DE SINES – PAVIMENTO RÍGIDO DE BETÃO DE CIMENTO	347
Pedro Serpa dos Santos / Paulo Aleixo Silva / Carlos Suzana	
CARACTERIZAÇÃO DA MISTURA BETUMINOSA COM BETUME MODIFICADO COM BORRACHA APLICADA NO IC1	363
Maria de Lurdes Antunes / Maria Isabel Eusébio / Margarida Sá da Costa / Pedro Domingos / Helena Lima	
APLICAÇÃO DAS REDES NEURONAIIS NA CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS	379
Simona Fontul / Maria de Lurdes Antunes / João Marcelino	
LIPOR II. UMA PEDREIRA NA REGIÃO DO PORTO?	393
Luís Vaz Nicolau / Ana Maria Bastos / M. Lurdes Lopes / Joaquim Figueiras	
PAVIMENTOS DE BETÃO EM ESPAÇOS URBANOS: FUNCIONALIDADE, DURABILIDADE E A CONTRIBUIÇÃO PARA UMA REQUALIFICAÇÃO AMBIENTAL	409
Ângela Nunes	
APLICAÇÃO DE CIMENTO EM PAVIMENTOS	419
Jorge Nobre Santos	
MEZCLAS BITUMINOSAS REFORZADAS CON FIBRAS ACRILICAS	435
Luis Puncernau García / Ludwig Bullinger / David González Amago	

5.3. DRENAGEM	445
ESTIMATIVA DA PERMEABILIDADE DE MATERIAIS GRANULARES EM FUNÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE VAZIOS	447
Luiz Roberto Cavicchia	
UTILIZAÇÃO DE DESCARREGADORES EM DEGRAUS NA DRENAGEM TRANSVERSAL RODOVIÁRIA	459
Manuel Luís Lorena	
Tema 6	
ESTRUTURAS	
QUALIFICAÇÃO DOS AGENTES E METODOLOGIAS DE INSPECÇÃO E ENSAIO DE PONTES E TÚNEIS	469
Carlos Mesquita / Vítor Cóias e Silva	
REABILITAÇÃO E REFORÇO DA PONTE DE ANGEJA SOBRE O RIO VOUGA ...	481
Tiago Mendonça / Vítor Brito	
IMPERMEABILIZAÇÃO DE TABULEIROS DE PONTES DE BETÃO COM EMUL- SÃO ANIÓNICA DE BETUME MODIFICADO E GEOTÊXTIL	493
Luís Vieira	
REABILITAÇÃO DA PONTE SARMENTO RODRIGUES SOBRE O RIO DOURO EM BARCA D'ALVA	501
Duarte Luís Rio Seco Silva Nobre / Manuel Miguel Jorge	
FERRAMENTA DE APOIO AO DIAGNÓSTICO DE PONTES E VIADUTOS DE BETÃO	515
V. Cóias e Silva / Pedro Lança	
GESTÃO DA QUALIDADE NAS TECNOLOGIAS EMERGENTES PARA A REABI- LITAÇÃO DE OBRAS DE ARTE DE BETÃO	525
V. Cóias e Silva	
APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE DESLIZE DE QUADROS DE BETÃO NA IMPLANTAÇÃO DE PIS EM OBRAS DE REABILITAÇÃO RODOVIÁRIA E FERROVIÁRIA	537
Eduardo Pimentel / Isabel Paul	

<i>Índice</i>	XII
VIADUTO DO PERDIGÃO	549
Victor Barata / Vasco Amaral	
MONITORIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS	559
Joaquim A. Figueiras / Carlos Félix	

Tema 7

SEGURANÇA NO TRABALHO, NA CONSTRUÇÃO

IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE GESTÃO DA SEGURANÇA E SAÚDE NO TRABALHO DA CONSTRUÇÃO NO ICOR	573
Luís Gonelha	
O SISTEMA DE GESTÃO DE SEGURANÇA DOS ACE's NORACE, VIANOR, LUSITÂNEA E GRANDE PORTO	597
José Eduardo Marçal Ruivo da Silva / Luís Fontes Machado	
SINALIZAÇÃO RODOVIÁRIA. SUA IMPORTÂNCIA NA ECONOMIA NACIONAL	607
Jorge Aguiar	

A OPTIMIZAÇÃO DAS MISTURAS BETUMINOSAS COM BETUME MODIFICADO COM BORRACHA RECICLADA DE PNEUS USADOS

MANUEL MINHOTO

Professor Adjunto, Instituto Politecnico de Bragança

JORGE PAIS

Professor Auxiliar, Universidade do Minho

PAULO PEREIRA

Professor Catedrático, Universidade do Minho

RESUMO

O presente trabalho pretende contribuir para a investigação visando a optimização do comportamento de misturas betuminosas com betume modificado com borracha reciclada de pneus usados, constituindo um elemento resumo sobre o estado dos conhecimentos nesta matéria.

Relativamente às várias variáveis envolvidas no processo de produção de misturas betuminosas com betume modificado com borracha são descritas as principais linhas de investigação que têm influência decisiva na melhoria do desempenho destas misturas.

1. INTRODUÇÃO

O uso de produtos betuminosos em pavimentos rodoviários flexíveis é uma prática generalizada em todo o mundo. No entanto, é de consenso geral que existe a necessidade de otimizar o desempenho, funcional e estrutural, das misturas betuminosas perante os principais fenómenos a que estão sujeitas, devido ao aumento do tráfego em volume e agressividade. Estes fenómenos constituem os mecanismos de ruína dos pavimentos manifestando-se através do aparecimento de fendilhamento, sob as suas várias formas, e deformações permanentes, de que se destacam os cavados de rodeira. Constata-se ainda exis-

tirem problemas de durabilidade associados ao funcionamento destes pavimentos que, em muitos casos atingem o fim de vida prematuro por envelhecimento precoce, manifestado-se num conjunto de patologias, das quais se destaca o fendilhamento.

Numa tentativa de melhorar o desempenho dos pavimentos tendo em vista retardar o aparecimento destas degradações e o cumprimento de especificações cada vez mais exigentes, têm sido desenvolvidas as mais diversas soluções, quer visando desenvolvimento de novas tecnologias rodoviárias quer a procura de produtos betuminosos de superior qualidade.

A adição de materiais poliméricos, naturais ou sintéticos, ao betume, tais como o SBS e o EVA, tem sido largamente adoptada, com eficiência, no sentido de alargar o campo de aplicação dos betumes e melhorar as suas propriedades, particularmente em termos de susceptibilidade térmica, de resistência à fadiga, às deformações permanentes e ao envelhecimento.

Neste contexto o uso de betume modificado com borracha, normalmente designado por BMB, tem sido adoptado em vários países. Crê-se que a mistura do granulado de borracha com o betume reduz a susceptibilidade térmica do betume de base, melhora a visco-elasticidade e a ductilidade do ligante e melhora as propriedades elásticas das misturas betuminosas, concretamente, a resistência às tensões de tracção e a capacidade de recuperação de deformações, quer a baixas quer a altas temperaturas. Esta melhoria das propriedades elásticas do BMB reflecte-se positivamente na sua resistência ao fendilhamento, à reflexão de fendas e às deformações permanentes, apresentando grande viscosidade a temperaturas altas e boa flexibilidade a baixas temperaturas.

Constata-se que o BMB apresenta boa adesividade, aderindo em maiores quantidades à superfície do agregado do que os betumes convencionais, contribuindo assim para uma melhoria da espessura do filme de betume envolvente dos agregados. Este facto contribui ainda para o aumento significativo dos teores de ligante nas misturas sem segregação de ligante, ou outro tipo de problemas inerentes ao excesso de ligante nas misturas. Este facto contribui para um aumento do período durante o qual o agregado se mantém revestido com o filme de ligante, aumentando a durabilidade das misturas.

Verifica-se que os reforços de pavimentos que incluem borracha reciclada de pneus, com espessuras mais reduzidas do que as necessárias para as misturas convencionais, apresentaram desempenhos iguais às misturas convencionais. Nos estados da Califórnia e do Arizona, EUA, costumam ser adoptadas redu-

ções de 50% na espessura das camadas betuminosas quando se usam misturas a quente com BMB, com o objectivo de melhorar a resistência à reflexão de fendas [1]. Estas melhorias de desempenho são acompanhadas por um aumento de custos que, em algumas instituições rodoviárias, varia entre 15% e 70%, quando comparados com as misturas convencionais. [2], [3]. No entanto, este aumento de custo sendo avaliado numa perspectiva de custo/benefício pode tornar este tipo de solução muito vantajosa.

Actualmente as misturas betuminosas com BMB empregam-se na conservação e reabilitação funcional e estrutural de pavimentos degradados com o objectivo, do ponto de vista estrutural, de:

- melhorar a resistência ao fendilhamento;
- retardar reflexão de fendas;
- aumentar a vida à fadiga;
- melhorar a resistência às deformações permanentes e formação de rodadeiras.

Do ponto de vista funcional as misturas betuminosas com BMB são empregues com o seguinte objectivo:

- reduzir o ruído de circulação, com reduções de ruído a rondar os 5 db a 6 db;
- reduzir o efeito da projecção de água;
- aumentar a aderência pneu/pavimento (observando-se uma diminuição de distâncias de travagem que pode atingir cerca de 25%);
- melhorar as características ópticas da via, aumentando o contraste com as marcações horizontais;
- reduzir o fendilhamento, por fadiga e por reflexão, e consequentemente a irregularidade e a deformação.

Segundo alguns organismos rodoviários a forma de aplicação de BMB com melhor aproveitamento é em misturas a quente com granulometria descontínua. No entanto podem ocorrer problemas de estabilidade neste tipo de camadas para espessuras superiores a 60 mm.

2. CARACTERIZAÇÃO DO BETUME MODIFICADO COM BORRACHA (BMB)

O BMB resulta da adição de determinada percentagem de granulado de borracha ao betume tradicional aquecido, executada em reatores especiais,

junto das centrais betuminosas, produzindo uma adequada e controlada "reação digestão" da borracha no betume asfáltico, caracterizada por determinadas condições operacionais.

A reciclagem de pneus ocorre em centrais, adequadamente equipadas, que processam o corte e trituração dos pneus usados com vista à sua redução a granulado de dimensões muito pequenas, de acordo com uma de duas possíveis tecnologias básicas de reciclagem: a tecnologia ambiental e a tecnologia criogénica. A tecnologia ambiental consiste na dilaceração de pneus à temperatura ambiente enquanto que a tecnologia criogénica de reciclagem consiste na trituração de pneus usados, previamente congelados criogenicamente por imersão da borracha em nitrogénio líquido, até se atingir a granulometria desejada.

Na tecnologia ambiental resulta um granulado de partículas com superfícies mais rugosas, enquanto que do processo criogénico resultam partículas com superfícies relativamente lisas, ou polidas. Esta propriedade das partículas de borracha tem influência na reacção entre a borracha e o betume, constatando-se que a reacção resulta melhor com partículas mais rugosas e regulares.

A "reação de digestão" consiste numa interacção entre o solvente orgânico betume asfáltico e o granulado de borracha, tratando-se de um processo físico de difusão com a consequente dilatação polimérica, ou seja, de um processo de absorção de fracções aromáticas do betume por parte das cadeias poliméricas do granulado de borracha até que a concentração do destas fracções seja uniforme e que seja conseguido o equilíbrio na dilatação das partículas. Este processo é muito influenciado pelo tempo de reacção, temperatura de reacção e grau de agitação betume-borracha.

Esta reacção causa, por um lado, o amolecimento e a dilatação das partículas de borracha, passando grande parte do ligante a ser constituído por borracha amolecida e dilatada, e por outro o endurecimento do betume puro por perda de óleos aromáticos, provocando uma redução da distância inter-partículas de borracha e traduzindo-se num aumento da viscosidade do ligante BMB. Neste processo dá-se também a dissolução de borracha no betume através da acção dos ácidos carboxílicos presentes no betume que impede que os maltenos desapareçam do betume por acção da temperatura, radiação solar, acção do tráfego e da oxidação, reduzindo a fragilização do betume com o tempo. Assim, aumenta-se significativamente a resistência ao envelhecimento das misturas betuminosas BMB, relativamente às misturas convencionais.

A adição de óleos aromáticos e/ou naftalínicos às misturas betume + borracha é uma prática que tem como objectivo compensar a absorção, por parte da borracha, das fracções mais leves do betume asfáltico, permitindo um amolecimento do ligante BMB e diminuição da sua rigidez a baixas temperaturas.

2.1. Linhas de investigação a seguir

A caracterização objectiva da interacção entre a borracha e o betume é uma prioridade de investigação. Embora já se tenha estudado optimização da interacção em função da aromaticidade do betume, é, no entanto, necessário passar a leis e relações objectivas.

A compatibilidade betume/borracha é uma questão que tem de ser estabelecida de uma forma objectiva, mensurável. Deve caracterizar-se melhor a compatibilidade betume/borracha, estabelecendo relações entre esta e as propriedades dos intervenientes, objectivando em função dos factores intervenientes e estabelecendo diversos graus de compatibilidade, correlacionando estes graus com o desempenho do BMB. No fundo, pretende-se medir e classificar a compatibilidade borracha/betume, em função dos objectivos de aplicação do BMB.

Outra componente de estudo está relacionada com a adição de aditivos. Há bastante tempo que se sabe que os óleos aromáticos (extender oils) contribuem para a melhoria da estabilidade global do BMB em armazenamento, estabilizando o produto apenas em períodos pequenos (12-24 horas). É necessário estudar a possibilidade de esse efeito se manter por mais tempo. Além disso deve-se estabelecer, de uma forma objectiva (mensurada), as condições em que se devem adicionar óleos e como adicionar.

3. PRODUÇÃO DE BETUME MODIFICADO COM BORRACHA

A produção do BMB envolve basicamente as operações de "reação de digestão" da borracha no betume e, à falta de especificações nacionais, deverá obedecer às especificações constantes na norma ASTM D6114. Em regra geral o BMB é composto, em peso, por 20% de borracha reciclada de pneus, 78% a 80% de betume e 0% a 2% de óleos aromáticos (em peso de BMB).

Existem basicamente duas metodologias de produção de misturas betuminosas com BMB: o processo húmido e o processo seco. O processo a húmido é

toda a metodologia que envolva a mistura prévia do betume e da borracha, a altas temperaturas (entre 160° a 210°), durante um determinado período de tempo de reacção (entre 60 min e 240 min), sendo em seguida adicionado ao agregado. O processo seco consiste em misturar previamente a borracha e o agregado aquecido, substituindo parte do agregado grosso por granulado de borracha grosseiro devidamente graduado, sendo em seguida adicionado o betume puro aquecido. Neste processo a borracha pode ser previamente tratada com um catalisador. Em ambos os processos podem ser adicionados aditivos (extender oils) do tipo solventes, óleos aromáticos ou polímeros.

A adopção do processo húmido, que se encontra em crescente preferência pelos principais fabricantes de BMB, apresenta a vantagem de permitir no processo de fabrico um controlo das propriedades do ligante, enquanto que a metodologia a seco é de mais fácil aplicação em obra. Os aspectos negativos do processo húmido estão relacionados com a estabilidade do sistema BMB e a necessidade de aplicação do granulado de borracha com dimensões mais pequenas, assumindo, assim, a metodologia de reciclagem aplicada à borracha, uma grande importância neste processo [4], [5], [6].

3.1. Linhas de investigação a seguir

Neste campo de conhecimento a investigação deverá desenvolver-se no sentido de definir objectivamente as condições de aplicação para as quais se deverá optar por qualquer das metodologias. Esta definição deve ser estabelecida em função do desempenho do BMB nos principais fenómenos de ruína dos pavimentos e nos principais constrangimentos logísticos de produção das misturas com BMB.

4. COMPORTAMENTO DO BMB EM FUNÇÃO DOS FACTORES DE PRODUÇÃO

As propriedades finais dos ligantes modificados com borracha apresentam alguma sensibilidade à variação de alguns "factores-chave" intervenientes, quer na sua composição quer no seu processo de produção. Refira-se como factores-chave as propriedades físicas e químicas da borracha, sua concentração e dimensões, as propriedades físicas e químicas do betume puro e sua concen-

tração, e as condições de reacção borracha/betume, nomeadamente a duração e temperatura de reacção, a energia de agitação, tipo de solventes e aditivos usados, sua concentração, tempo de aplicação, e o processo de reacção adoptado. [7]

As propriedades físicas e químicas da borracha que influenciam as propriedades finais do ligante BMB, são basicamente as seguintes:

- características geométricas da borracha: dimensões, granulometria e superfície específica das partículas;
- quantidade de borracha no betume ou teor de borracha;
- composição química da borracha – percentagens dos componentes poliméricos;
- teor em contaminantes tais como: fibras, minerais e metais
- teor de humidade da borracha;
- tipo de granulado de borracha – processo de reciclagem e proveniência dos pneus usados (ligeiros ou pesados).

4.1. Granulometria

A granulometria da borracha influencia as propriedades finais do BMB, pois considera-se que a diâmetros mais pequenos das partículas de borracha correspondam maiores áreas específicas, propiciando uma melhor interacção com os componentes do betume. Desta forma a presença de uma maior quantidade de partículas finas de borracha no BMB contribui para uma modificação mais rápida do betume, aumentando a recuperação elástica a temperaturas de serviço e apresentando grande influência na variação da viscosidade do BMB em função da temperatura.

A presença de partículas finas de borracha contribui ainda para uma boa compatibilidade betume-borracha, que se traduz numa melhoria das suas propriedades reológicas a temperaturas de serviço, e um aumento da resistência ao envelhecimento do ligante BMB. A presença de granulado de borracha com dimensões mais grosseiras, contribui para a melhoria da resistência à deformação permanente do ligante BMB, embora neste aspecto também tenha bastante influência o tipo de betume empregue. A adição de granulado de borracha mais grosso (do tipo 1/5mm) pode causar aumentos significativos da porosidade das misturas com BMB comparativamente às misturas tradicionais.

4.2. Teor em borracha

O aumento do teor de borracha melhora algumas propriedades do BMB, concretamente, o aumento da viscosidade do BMB, o aumento da resiliência e do ponto de amolecimento, tornando a susceptibilidade térmica mais baixa. O aumento do teor de borracha no BMB provoca a diminuição da penetração e da ductilidade a 25°C e o aumento da ductilidade a baixas temperaturas. O aumento do teor de borracha no betume tende a diminuir a penetração a 25°C até valores de 20 a 25% de borracha. Para valores superiores deste teor a penetração a 25°C tende a aumentar.

4.3. Efeito da composição da borracha

Uma das características de composição da borracha que afecta significativamente as propriedades do BMB é a percentagem total de hidrocarbonetos de borracha e de borracha natural contida. No processo de reacção entre o granulado de borracha e o betume, apenas alguns dos polímeros constituintes de borracha dilatam no betume, tal como a borracha natural, mantendo-se os outros componentes (negro de fumo, resíduos e óleos) volumetricamente constantes. Por esta razão, a quantidade efectiva de hidrocarbonetos de borracha torna-se um factor que deve ser considerado durante o processo de concepção do BMB. A existência de altos teores de hidrocarbonetos tende a tornar o BMB mais dúctil.

Constata-se que os organismos rodoviários tendem a preferir o granulado de borracha proveniente da reciclagem de pneus de veículos pesados, em detrimento dos de veículos ligeiros, pelo facto de aqueles dispostem na sua constituição de maiores percentagens de borracha natural. O efeito da borracha natural reflecte-se numa redução do peso molecular do BMB que conduz ao aumento da adesividade deste aos inertes.

4.4. Processo de reacção

Segundo alguns estudos [8], os processos de reacção que apresentam condições de energia de agitação que produza altos esforços de corte, temperaturas de reacção altas e partículas de borracha de dimensões muito reduzidas, reduzem o efeito da presença dos saturados e dos asfaltenos contidos no BMB, o que conduz a uma boa estabilidade de armazenagem.

O processo de reacção entre as partículas de borracha e o betume asfáltico é dependente quer do tempo quer da temperatura de reacção. Se decorrer a tem-

peraturas muito baixas pode dar-se uma reacção incompleta entre a borracha e o betume, tornando-o heterogéneo. Se o processo decorrer a temperaturas excessivamente altas o BMB tem propensão a envelhecer prematuramente. As reacções a temperaturas altas, mas não excessivas, podem melhorar as capacidades do BMB produzindo-se reacções mais rápidas e resultando uma dilatação acentuada das partículas de borracha.

Observando-se tempos de reacção de curta duração verifica-se uma dissolução deficiente da borracha enquanto que a adopção de tempos de reacção excessivamente longos podem comprometer a resistência ao envelhecimento e a elasticidade do ligante. Existem propriedades do BMB que não são sensíveis aos tempos de reacção, como por exemplo a penetração e o ponto de amolecimento. Constata-se que uma reacção de digestão a altas temperaturas (190°C a 205°C) e com tempos de reacção longos, conduz a uma degradação do índice de envelhecimento dos betumes. Nestas condições, a borracha pode começar a despolimerizar de tal forma que uma grande quantidade das propriedades físicas do BMB serão reduzidas.

4.5. Linhas de investigação a seguir

A adopção de percentagens de borracha superiores aos valores que actualmente se adoptam seria uma situação com interesse técnico e ecológico, uma vez que se poderia absorver uma maior quantidade de resíduo de pneu, reduzindo a necessidade de utilizar grandes quantidades de betume – recurso limitado.

É necessário estudar se o aumento progressivo do teor de borracha no betume produz os mesmos resultados independentemente da sua granulometria e dimensões. Uma vez que a superfície específica do granulado de borracha varia com a granulometria e dimensões e que quanto maior for a superfície específica do granulado de borracha maior será a interacção existente entre o betume e a borracha, parece-nos que estes resultados podem ser diferentes.

5. MISTURAS BETUMINOSAS COM BMB

A mistura do BMB com os agregados é produzida da forma convencional. Neste processo podem ser adicionados solventes no sentido de conferir trabalhabilidade à mistura. Normalmente a percentagem de ligante BMB nas misturas varia de acordo com o tipo de mistura que se pretenda adoptar, variando normal-

mente entre 6.5% e 10% (em peso de mistura) para determinados tipos de misturas da mistura, e 20% para a maioria das aplicações.

O melhor desempenho de misturas com BMB consegue-se com granulado de borracha obtido por processo ambiental e usando o processo húmido de reacção e com adição de óleos aromáticos. De um modo geral, as misturas densas são mais susceptíveis às mudanças de teor de ligante BMB e de dimensões das partículas de borracha do que as misturas abertas [11].

5.1. Desempenho das misturas betuminosas com BMB

Comparativamente às misturas betuminosas convencionais, a presença da borracha no ligante melhora a susceptibilidade térmica da mistura de modo a que, a altas temperaturas se comporte com mais viscosidade e a baixas temperaturas se apresente mais flexível.

As misturas com BMB apresentam capital estrutural superior ao das misturas convencionais, ao fim do mesmo período de vida, crendo-se que esta reserva estrutural se deve sobretudo à capacidade de retardar a reflexão de fendas e à boa resistência ao fendilhamento por fadiga, atribuída às misturas com BMB.

Verifica-se que o módulo resiliente das misturas BMB apresentam valores um pouco mais baixos do que os valores normalmente obtidos nas misturas convencionais, indicando uma grande flexibilidade. Consta-se que as misturas com BMB apresentam menos sensibilidade ao envelhecimento do que as misturas convencionais, verificando-se que o envelhecimento das misturas com BMB se processa a uma taxa mais baixa.

6. VANTAGENS E LIMITAÇÕES DAS MISTURAS COM BMB

O uso de BMB nas misturas betuminosas, como qualquer material usado na construção, acarreta vantagens e limitações. Por um lado o BMB apresenta vantagens competitivas relativamente aos betumes tradicionalmente empregues, sob o ponto de vista do bom desempenho que apresentam relativamente às misturas convencionais em vários aspectos tais como:

- Aumento da vida em serviço dos pavimentos por bom comportamento à fadiga e deformações permanentes;

- Retardamento do fendilhamento por reflexão de fendas;
- Diminuição do ruído de circulação do tráfego;
- Custos de manutenção reduzidos.

Como vantagens ecológicas do uso do BMB nas misturas:

- Contribui para a resolução do problema de impacto ambiental negativo produzido pela existência crescente de pneus usados e sua incineração, permitindo a sua reciclagem integral e limpa;
- Permite executar camadas de pavimentos com espessuras reduzidas reflectindo-se na redução do uso de agregados. A redução do uso de agregados contribui para a redução dos impactos ambientais negativos das pedreiras e evita a necessidade de abertura de novas pedreiras.

Para além das vantagens apontadas a comparação de custos pode ser atraente, sob o ponto de vista custo/benefício. Além disso, os custos directos e indirectos de manutenção são consideravelmente mais baixos do que para as misturas convencionais.

No entanto constata-se que o armazenamento em "condições estáticas" (4 dias a 130°C) afecta negativamente as propriedades do BMB, podendo-se produzir, nestas condições, uma segregação entre o betume puro e o granulado de borracha. Nestas condições verifica-se um mau desempenho do BMB em termos de deformações permanentes.

Outro aspecto negativo associado à aplicação de misturas com BMB são os períodos de tempo de espera para a abertura de passagem de veículos após colocação. Não cumpridos estes tempos, as misturas descontinuas com BMB apresentam a tendência para formação de rastos, necessitando de longos períodos de arrefecimento comparativamente às misturas tradicionais. Este período de espera deve também ser observado quando se procede à colocação de uma nova camada acima de uma mistura com BMB. O uso de uma camada fina de areia pode ser uma boa solução para evitar rasto.

Outro problema existente é o do difícil espalhamento do material BMB, sendo muitas vezes os veículos de espalhamento regados com gasóleo nos seus depósitos em contacto com o BMB, devendo ser controlada a adição em demasia de gasóleo para evitar a rotura prematura da mistura, provocando problemas prematuros de desagregação da superfície do pavimento em serviço. Uma vez a mistura colocada e arrefecida abaixo dos 60° é muito difícil proceder a qualquer tipo de trabalho adicional, como por exemplo o tratamento de juntas de betonagem.

7. CONCLUSÕES

Embora já exista alguma investigação na área dos betumes de borracha, sente-se a necessidade de se trabalhar no domínio da optimização destas misturas, sob o ponto de vista da sua constituição, tendo como cenário os principais fenómenos de degradação dos pavimentos.

A optimização do teor de borracha e a sua articulação com a granulometria do agregado pode ser investigado no sentido de encontrar soluções optimizadas sob o ponto de vista de fadiga, deformações permanentes, comportamento a baixas temperaturas e de condições funcionais, nomeadamente de ruído.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SOUSA, J. B.; PAIS, J. e RACHID SAÏM – “The effect of mode of loading on the comparison between asphalt rubber and traditional hot mixes laboratory performance”, Asphalt Rubber 2000 – Proceedings, Vilamoura, 2000.
- [2] HICKS, R. G.; LUNDY, J. R.; LEAHY, R. B.; HANSON, D. and EPPS, J. – “Crumb rubber modifier in asphalt pavement – Summary of practices in Arizona, California and Florida”, Report N° FHWA-SA-95-056, Federal Highway Administration, 1995.
- [3] HICKS, R. and EPPS, J. – “Life cycle costs for asphalt-rubber paving materials”, Asphalt Rubber 2000 – Proceedings, Vilamoura, 2000.
- [4] HORODECKA, R.; KALABINSKA, M.; PILAT, J.; RADZISZEWSKI, P. and SYBILSKI, D. – “Utilization of scrap rubber for bitumen and asphalt concrete modification in Poland”, Asphalt Rubber 2000 – Proceedings, Vilamoura, 2000.
- [5] LETO, M. and SALINI, R. – “Study of recycled tyre rubber in asphalt concrete mixtures”, Asphalt Rubber 2000 – Proceedings, Vilamoura, 2000.
- [6] SHATNAWI, S. and LONG, B. – “Performance of asphalt rubber as thin overlays”, Asphalt Rubber 2000 – Proceedings, Vilamoura, 2000.
- [7] HICKS, R. G. and EPPS, J. A. – “Quality control for asphalt rubber binders and mixes”, Asphalt Rubber 2000 – Proceedings, Vilamoura, 2000.
- [8] LEITE, L. F. M.; CONSTANTINO, R. S. and VIVONI, A. – “Rheological studies of asphalt with ground tire rubber”, Asphalt Rubber 2000 – Proceedings, Vilamoura, 2000.
- [9] OLIVER, J. W. H. – “Rutting and fatigue properties of crumbed rubber hot mix asphalts”, Asphalt Rubber 2000 – Proceedings, Vilamoura, 2000.
- [10] WAY, G. – “OGFC meets CRM: Where rubber meets the rubber”, Arizona Department of transportation – Materials Group, IEP, Lisboa, 2002.
- [11] SMITH, L.; BIRGISSON, B.; CHOUBANE, B. and MUSSELMAN, J. – “Asphalt-rubber in the State of Florida: the first ten years”, Asphalt Rubber 2000 – Proceedings, Vilamoura, 2000.