

A reabilitação da rede rodoviária no século XXI

A Contribuição da Inovação para uma Visão Global da Reabilitação Rodoviária

Paulo A.A. Pereira^{1†},
Jorge C. Pais, Elisabete F. Freitas, Hugo M.D. Silva, Joel R.M. Oliveira²

*Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil
Azurém, P – 4800-058 Guimarães, Portugal*

RESUMO

Este artigo aborda a temática da reabilitação da rede rodoviária no contexto dos seus desafios para o futuro próximo. Inicialmente é feita uma abordagem da prática corrente dos processos seguidos na reabilitação e do seu impacto nos custos do ciclo de vida dos pavimentos. A seguir apresenta-se uma visão global da contribuição da reabilitação para a qualidade de vida. Por fim aborda-se o papel da inovação na engenharia rodoviária ao serviço da sociedade, compreendendo a inovação ao nível da qualidade de circulação e a construção e conservação sustentável dos pavimentos rodoviários.

1. INTRODUÇÃO

Uma vez construída uma rede rodoviária, é necessário preservar as respectivas infraestruturas existentes (pavimentos, obras de arte, sinalização e equipamento de segurança), através de uma estratégia racional de conservação e de reabilitação, a qual consiste basicamente na aplicação da “estratégia dos 3 C’s”: “*o tratamento Certo, na estrada Certa, no tempo Certo*” (FP2, 2001). O desenvolvimento desta estratégia é suportado por informação rodoviária fiável e actualizada, referente à observação do comportamento, permitindo a análise dos dados de caracterização do estado da rede e o desenvolvimento de estratégias de conservação/reabilitação, considerando determinados padrões de qualidade da rede ou, em alternativa, os recursos financeiros disponíveis.

Numa rede rodoviária o pavimento constitui a infraestrutura mais importante, sendo aquela que está sujeita a acções mais severas, quer do tráfego quer do clima. Por esta razão é para esta componente da rede rodoviária que se dirigem os maiores investimentos de construção, conservação e reabilitação e, por consequência, são realizados os maiores investimentos em investigação fundamental e aplicada. Os pavimentos rodoviários são dimensionados para responderem às solicitações do tráfego e do clima durante um determinado período de vida (20 a 40 anos), de modo a oferecerem condições de circulação confortáveis e seguras.

Uma vez construído um pavimento para um determinado período de vida, numa perspectiva de sustentabilidade técnico-económica-ambiental, uma vez definidos determinados padrões de qualidade, estrutural e funcional, devem ser minimizadas todas as

¹ Professor Catedrático

[†] Autor para quem deverá ser enviada a correspondência (ppereira@civil.uminho.pt)

² Professor Auxiliar

intervenções na sua infraestrutura, de modo a reduzir ao mínimo todos os custos com a manutenção da sua qualidade por parte: i) da administração; ii) dos utentes; iii) ambientais.

Assim, neste contexto, a estrada deve ser considerada uma infraestrutura através da qual é possível, com fiabilidade, circular com conforto e segurança e com impactos ambientais cada vez menores, contribuindo activamente para o aumento da qualidade de vida.

No entanto, ainda é frequente os pavimentos necessitarem de intervenções de conservação ou reabilitação, não previstas, mesmo antes de atingirem o final do período de vida para o qual foram projectados e construídos, com custos significativos quer para a respectiva administração rodoviária, quer em particular para os utentes.

2. A REABILITAÇÃO DA REDE RODOVIÁRIA E O SEU IMPACTO NOS CUSTOS DO CICLO DE VIDA DOS PAVIMENTOS

A gestão de uma estrada deve ser considerada no conjunto do seu ciclo de vida, em geral de 20 anos. A seguir analisam-se diferentes estratégias de reabilitação, com indicação das intervenções de reabilitação e respectivas consequências para a qualidade e custos globais.

Em geral, poder-se-ão considerar duas estratégias alternativas: i) maximizar a qualidade global (área da Figura 1), face a determinados recursos financeiros disponíveis; ii) minimizar os custos para a administração, para o utente e para a sociedade em geral (custos energéticos), tendo em conta determinados padrões de qualidade, sendo esta uma estratégia mais proactiva.

A Figura 1 representa uma estratégia com a aplicação de uma intervenção periódica, além das acções de conservação corrente (estratégia A). A área indicada representa a qualidade global conseguida para todo o ciclo de vida do pavimento. Com esta estratégia, o pavimento no final do seu ciclo de vida ainda apresenta uma vida residual de valor VRA.

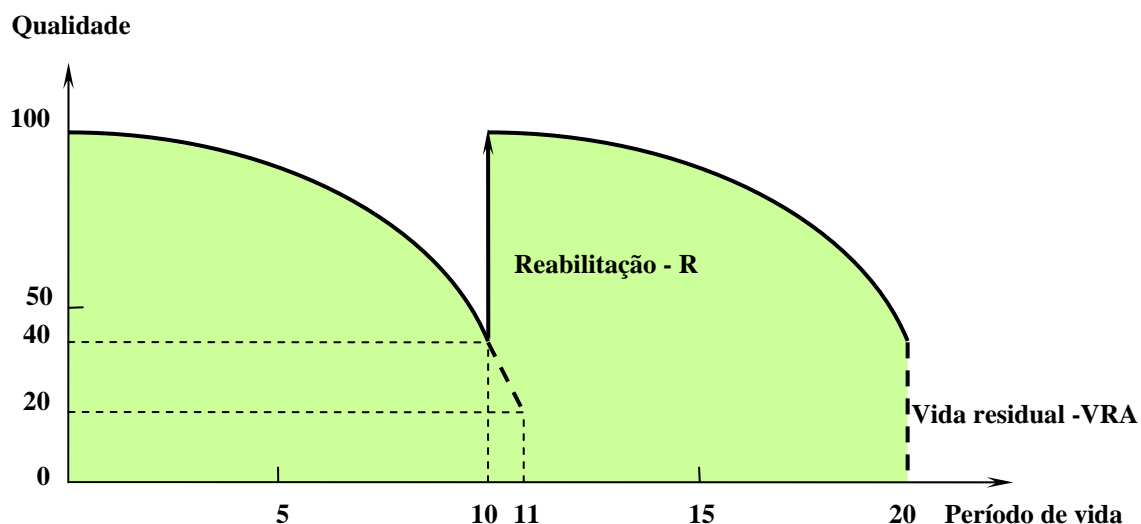


Figura 1 – O ciclo de vida dos pavimentos

Entretanto, na prática corrente, a intervenção de reabilitação é do tipo reactiva, essencialmente estrutural, sem considerar a componente funcional, quando o pavimento já perdeu a maioria do seu “capital estrutural”. Este tipo de estratégia tem um elevado impacto negativo para os custos do ciclo de vida dos pavimentos, em geral, e dos utentes e sociedade em particular.

Considere-se o pavimento representado na Foto 1, com fendilhamento do tipo pele de crocodilo, correspondendo a um estado de ruína inicial, sem aparentemente apresentar uma significativa redução da sua qualidade estrutural. Neste caso, dever-se-ia realizar um estudo de diagnóstico do seu estado para apoiar uma intervenção próxima, de modo a evitar a perda quase total do seu capital estrutural.



Foto 1 – Pavimento fendilhado (pele de crocodilo): estado de pré-ruína

Entretanto, se nada for feito, este pavimento evoluirá para o estado de fendilhamento do tipo pele de crocodilo aberta, já com degradação dos bordos (Foto 2) e com deformação resultante do comportamento das camadas inferiores (granulares) e solo de fundação, correspondendo a um avançado estado de ruína, já com manifesta redução da sua qualidade estrutural, requerendo, neste caso, uma intervenção de reconstrução.



Foto 2 – Pavimento em estado de ruína

Para efeitos de estudo do impacto negativo da ausência de uma estratégia proactiva de reabilitação, considere-se a via urbana de elevada capacidade de tráfego (40000 a 60000 veículos diários) representada na Foto 3. A Foto 4 representa o estado avançado de degradação do pavimento, onde já foram realizadas algumas intervenções de carácter curativo. Este caso de estudo deverá ser objecto de uma estratégia de construção-reabilitação,

privilegiando a construção de uma infraestrutura de elevada capacidade estrutural para um período de vida longo, de modo a minimizar as intervenções de conservação.



Foto 3 – Via urbana de elevada capacidade de tráfego

Perante uma evolução prematura da qualidade do pavimento deve-se procurar estudar uma intervenção de fundo, que diagnostique e elimine os problemas encontrados. Nestas situações, as intervenções ao nível da camada de desgaste apenas melhoram temporariamente a qualidade funcional. Ao nível dos custos, além dos custos directos para a respectiva administração da rede, estas intervenções terão custos significativos para os utentes, requerendo novas intervenções a curto prazo com novo acréscimo de custos.

A adopção de uma estratégia como a implícita nas Fotos 3 e 4, do tipo reactivo (Estratégia B; Figura 2), tem um elevado impacto nos custos do ciclo de vida dos pavimentos. A seguir avaliam-se esses custos e comparam-se com os que resultariam da estratégia definida na Figura 1 (Estratégia A).



Foto 4 – Pavimento degradado em via urbana de elevada capacidade de tráfego

A estratégia de reabilitação B (Figura 2) pode ser considerada como o conjunto de três tipos de intervenções: duas intervenções menores, R1 e R3, e uma intervenção de fundo, a reabilitação R2, conduzindo a um valor residual VRB. Nesta estratégia B verificou-se uma evolução da degradação mais rápida do que a resultante da estratégia A.

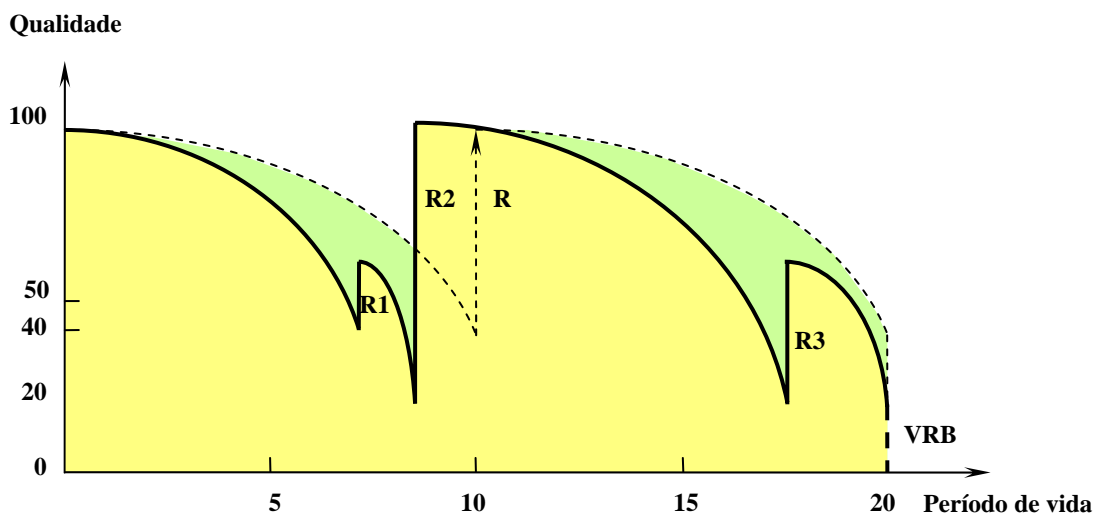


Figura 2 – A consequência das “estratégias” de reabilitação no ciclo de vida dos pavimentos

Face a estas duas estratégias de reabilitação determinam-se e analisam-se as suas consequências em relação aos seguintes parâmetros:

- i) qualidade global do pavimento, relacionada com todos os custos e em particular com os custos de operação dos veículos (COV);
- ii) custos dos utentes, aqui apenas representados pelos custos da alteração do tempo de percurso, e pelos custos de consumo de combustível, por serem os de maior peso;
- iii) custos ambientais, em grande parte relacionados com a produção de poluição e pelo maior consumo de energia.

Considera-se que a via em análise tem uma extensão total de 2000 metros, com um perfil de 2x3 vias, com a largura total de 21 metros, logo com uma área total a reabilitar de 42000 metros quadrados.

Para o tráfego médio diário anual assume-se um valor de 40000. Quanto ao número de utentes considera-se que cada veículo transporta, em média, 2 pessoas, num total de 80000 pessoas por dia, com um custo total horário de 25€. Para o cálculo do custo de combustível considera-se um consumo de 10 litros de combustível por cada hora, por veículo.

Em relação ao custo das intervenções de reabilitação, a intervenção de referência, R, referida na Figura 1 terá um custo de 3,0€ por metro quadrado, enquanto que as intervenções da estratégia definida na Figura 2, R1, R2 e R3, terão um custo por metro quadrado de 1,5€, 4,0€ e 1,5€, respectivamente.

Relativamente à duração de cada intervenção de reabilitação e respectiva alteração do tempo de percurso assumem-se os seguintes valores: i) R1 e R3 com uma duração da intervenção de 3 dias com um aumento do tempo de percurso de 0,2 horas em cada dia de intervenção da reabilitação; ii) R2, assim como R, terão uma duração de 5 dias resultando num aumento do tempo de percurso de 0,3 horas por dia.

No Quadro 1 apresentam-se os resultados das consequências das estratégias A e B.

Quadro 1 – Consequências de duas estratégias alternativas de reabilitação

Estratégia	Custos da reabilitação	Aumento do tempo de percurso	Custos do tempo de percurso	Custos de combustível
A	126000€	120000 h	3000000€	780000€
B	294000€ (+133%)	216000 h (+80%)	5400000€ (+80%)	1404000€ (+80%)

Considerando as mais valias da estratégia A em relação à B pode também ser determinado o seu impacto em termos de extensão de rede rodoviária que seria possível reabilitar, ao nível da conservação preventiva (do tipo da reabilitação R1 e R3, com um custo de 1,5€ por metro quadrado).

O valor total dos ganhos da estratégia A é de 168000€ nos custos directos de reabilitação e de 3024000€ nos custos directos dos utentes (tempo de percurso e consumo de combustível). Considerando uma reabilitação preventiva numa estrada com duas vias de tráfego, de 7 metros de largura da faixa de rodagem, estes ganhos permitiriam reabilitar 16 km e 288 km.

Além do aumento muito significativo de custos resultante da estratégia B, são ainda de salientar os custos de poluição resultante de mais 96000 horas de consumo de combustível de um veículo. Acresce ainda o impacto na economia resultante do acréscimo de 80% de consumo de energia importada, os custos de operação dos veículos, os custos de segurança (acidentes) e os custos de conforto.

3. UMA VISÃO GLOBAL DA CONTRIBUIÇÃO DA REABILITAÇÃO PARA A QUALIDADE DE VIDA

Para contribuir para uma noção abrangente da qualidade de vida, a estrada tem de ser considerada no contexto do seu ciclo global de vida, incluindo todos os custos directos e indirectos: custos de construção e de conservação; os custos dos utentes, incluindo os resultantes da perturbação do tráfego devido às actividades de conservação; os custos ambientais; os custos para a sociedade em geral.

Para atender a este desígnio abrangente da rede rodoviária, uma nova visão da estrada deve comportar as seguintes vertentes (FEHRL, 2004): i) a estrada deve constituir uma infraestrutura promotora do desenvolvimento e da qualidade de vida; ii) a construção e a reabilitação das infraestruturas rodoviárias devem ser sustentáveis integrando a dimensão técnica, económica, social e ambiental; para apoiar esse objectivo é fundamental “estabelecer a ponte” “projecto-construção-conservação”; iii) a rede rodoviária deverá ser constituída por um conjunto de “*infraestruturas inteligentes*”, onde “*veículos de 5 estrelas circulem também sobre estradas de 5 estrelas*”.

Em particular no contexto urbano, qualquer intervenção deve integrar a legislação vigente, nomeadamente quanto ao ruído, procurando soluções de continuidade da prestação do serviço da estrada que compreendam uma análise global, abrangendo as componentes estrutural e funcional da estrada (o conforto e a segurança), dentro de uma análise técnico-económica-ambiental, procurando maximizar a qualidade oferecida a utentes e não utentes e minimizando o impacte ambiental.

Assim, exige-se uma nova atitude: uma visão proactiva da gestão da rede rodoviária dentro do conceito dos modernos Sistemas de Gestão da Rede Rodoviária (PMS), onde esta actividade se inicia no acompanhamento do projecto e se prolonga ao longo da construção e observação do desempenho da estrada até ao planeamento e execução de uma nova reabilitação dos padrões de qualidade predefinidos.

Esta abordagem inovadora tem de ser global, integradora, quer quanto aos factores avaliados, quer quanto aos intervenientes, directos e indirectos da estrada, procurando colocar a inovação ao serviço do desígnio de “*fazer melhor com menos*”.

Assim, qualquer intervenção deve reabilitar a componente estrutural para o médio a longo prazo, para se concentrar na inovação ao nível da camada de desgaste, procurando obter mais valias para os utentes e não utentes, em particular no domínio da segurança, através de uma abordagem integradora e inovadora da interacção “*condutor-veículo-estrada*”, ao mesmo

tempo que se deverá procurar integrar o conceito da “*ecoeficácia dos pavimentos*” em qualquer intervenção da sua reabilitação.

Neste contexto, qualquer análise da gestão de uma rede rodoviária, em particular quanto à manutenção de determinados padrões de qualidade ao longo do seu ciclo de vida, deve compreender as seguintes componentes: i) os factores a estudar; ii) os intervenientes, directos e indirectos; iii) as mais valias de cada política de gestão.

Ao nível dos factores a analisar, qualquer estudo de reabilitação da rede rodoviária deve compreender os seguintes: i) as características da estrada em análise: tipo de estrada; volume e tipo de tráfego; ii) o tipo de ocupação marginal; iii) o potencial impacto das intervenções de reabilitação.

Ao nível dos intervenientes, devem ser considerados os seguintes: i) a administração rodoviária; ii) a administração das povoações (cidades) interessadas; iii) os utentes (através dos seus representantes); iv) os não utentes (através dos seus representantes). Apesar de ainda não estar integrada a prática de incluir os diferentes utentes nesta abordagem, esta é essencial neste processo uma vez que, directa e indirectamente, são estes que suportam os custos de todas as intervenções na rede rodoviária.

As mais valias desta abordagem são evidentes para todos os intervenientes, sendo de salientar as seguintes: i) a melhoria do serviço oferecido pela estrada a todos os utentes, em particular aos utentes directos, quanto à fiabilidade do tempo de percurso – o factor mais determinante da qualidade da rede; ii) a redução dos custos para a administração rodoviária – menor número de intervenções e maior eficácia das mesmas; iii) a redução dos custos para os utentes; iv) a redução dos custos para os não utentes – a população que recebe o impacto da estrada e das suas intervenções (poluição do ar e poluição sonora); v) a redução dos custos ambientais (poluição do ar, poluição sonora e poluição hidráulica); vi) a redução dos custos energéticos.

4. A INOVAÇÃO NA ENGENHARIA RODOVIÁRIA AO SERVIÇO DA SOCIEDADE

O ponto de partida para uma análise prospectiva da inovação em Engenharia Rodoviária será a constatação de que “*tecnicamente tudo é possível*” (FEHRL, 2004). Por exemplo, o desenvolvimento de “*automóveis inteligentes*” prosseguirá, conduzindo à necessidade de fazer evoluir a categoria da estrada para o nível de “*estrada inteligente*”, onde “*no futuro será a estrada que comandará o automóvel*”.

Para esta abordagem a investigação a realizar deve integrar competências multidisciplinares, onde às competências tradicionais da Engenharia Rodoviária – materiais, comportamento, dimensionamento, observação do comportamento, gestão rodoviária – se juntarão obrigatoriamente as competências das Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC), com o suporte imprescindível das competências da Electrónica. Deste modo a estrada apelará a materiais inovadores e a métodos de observação inteligentes, permitindo a observação em tempo real, onde se estabelecerá a relação funcional “*estrada > gestor > utente*”.

4.1. A Inovação ao Nível da Qualidade de Circulação

A estrada tem como objectivo fundamental a prestação de um serviço aos seus utentes directos e à sociedade em geral. Assim, para qualquer intervenção ao nível das suas infraestruturas (pavimentos, equipamento de sinalização e segurança) é fundamental conhecer, de forma sustentada, o modo como esta interage com as outras componentes através do estudo detalhado da interacção “condutor-veículo-estrada” (Figura 3).

Ao nível da segurança de circulação, a prevenção dos acidentes e consequentes intervenções deverá constituir um esforço multidisciplinar partilhado por todos os intervenientes integrando um amplo leque de actividades, tais como o desenvolvimento e gestão da infra-estrutura, preparação de veículos mais seguros, cumprimento das leis, preparação dos serviços de saúde e hospitalares, serviços de protecção da infância, e planeamento do sistema de transportes, da mobilidade, dos modelos territoriais e ambiente.

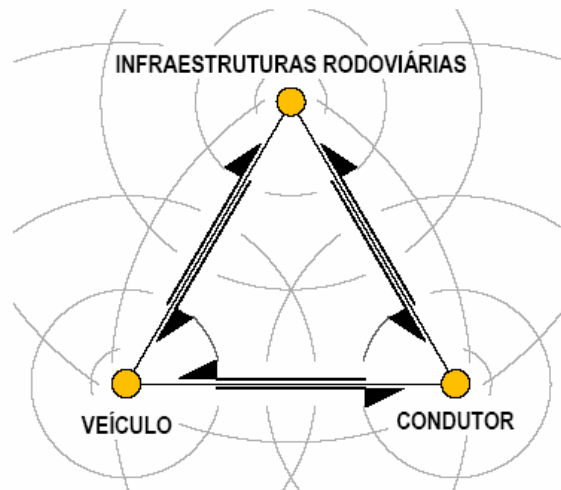


Figura 3 – A interacção “conductor-veículo-estrada” (Martins & Nabais, 2006)

A investigação efectuada a nível internacional revela que os condutores são os principais responsáveis pelos acidentes, seguindo-se o ambiente rodoviário e, em último lugar, o estado dos veículos (Austroads, 2003; Rothengatter & Huguenin, 2004).

A nível da União Europeia, o Projecto SUNflower+6 (*Comparative Study on the Development of Road Safety in Nine European Countries*), cofinanciado pela Comissão Europeia e liderado pelo instituto SWOV da Holanda, realizou um estudo comparativo sobre segurança rodoviária (Figura 4), incidindo nos seguintes nove países: Suécia, Reino Unido, Holanda, Hungria, República Checa, Eslovénia, Portugal, Espanha e Grécia; e ainda na região autónoma da Catalunha (Macedo et al., 2006).

Para os países deste grupo, incluindo Portugal, no domínio da segurança rodoviária, continuam a ser problemas específicos graves: i) a condução sob o efeito do álcool; ii) a insuficiente protecção das crianças nos veículos; iii) os acidentes envolvendo jovens condutores (sobretudo nos fins-de-semana e de noite); iv) o excesso de velocidade praticada nos vários tipos de estradas; v) as elevadas taxas de peões vítimas de acidentes, com relevo para crianças e idosos; vi) a gravidade de acidentes envolvendo veículos de duas rodas com motor.

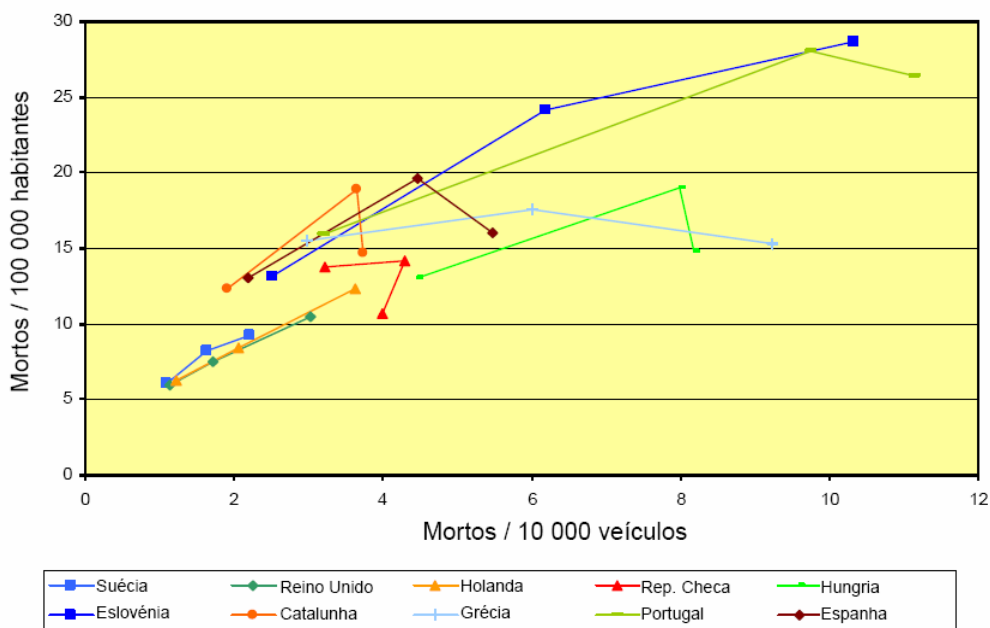


Figura 4 – Sinistralidade rodoviária na União Europeia (Macedo et al., 2006)

As recomendações produzidas no âmbito do projecto, destinadas à Comissão Europeia, aos grupos de países e a cada país são as seguintes: i) o reforço e o aumento da eficiência da fiscalização, direccionada para alvos específicos; ii) a melhoria de meios e procedimentos de aquisição e tratamento de dados desagregados, relacionados com a sinistralidade e com o comportamento dos condutores; iii) a aplicação de medidas e intervenções nesta área e o acompanhamento dos seus resultados; iv) a educação, treino e reciclagem dos diferentes utentes da estrada e dos intervenientes nas várias áreas que importam à sua segurança.

Entretanto, além da relevância da intervenção do condutor em todos os domínios da segurança, a quantificação dos efeitos de intervenções correctivas do ambiente rodoviário reveste-se de extrema importância, uma vez que permite a disponibilização de critérios racionais de apoio à decisão sobre as medidas mais eficazes a adoptar.

O meio ambiente rodoviário compreende um conjunto de factores passivos da sinistralidade, constituído por: i) solicitações a que os condutores estão sujeitos no habitáculo do veículo; ii) estado de conservação do veículo; iii) condições meteorológicas; iv) traçado da estrada; v) estado do pavimento; vi) sinalização. A percepção que o condutor tem de cada um destes factores contribui activamente para a sinistralidade rodoviária. A percepção do meio ambiente pelo condutor, para além da educação deste, depende do estado físico e psicológico em que este se encontra. A interacção entre meio ambiente e condutor determinará o seu comportamento e, conseqüentemente, a segurança rodoviária.

Assim, ao nível dos factores identificados como causadores, directos ou indirectos, da sinistralidade rodoviária poderão identificar-se os seguintes: i) a solicitação dos condutores no habitáculo do veículo, onde podem ser incluídos, por exemplo, os efeitos do uso do telemóvel e dos equipamentos áudio e vídeo e o ruído de circulação; ii) as solicitações dos condutores fora do habitáculo do veículo, como por exemplo, painéis de publicidade; iii) as condições meteorológicas (o tempo chuvoso está associado a um aumento do número de acidentes; as condições de luminosidade insuficientes, quer diurnas quer nocturnas, mesmo na ausência de chuva afectam o estado físico e, conseqüentemente, psíquico dos condutores); iv) o traçado da estrada; os parâmetros geométricos da estrada, como a largura, a inclinação dos trainéis, a existência de bermas, entre outros, condicionam o comportamento do condutor através do

aumento ou da redução da velocidade; v) o estado do pavimento; a regularidade e o atrito da superfície dos pavimentos são dois factores determinantes no conforto e na segurança da circulação.

A forma como os condutores captam estes factores será essencial para desenvolver soluções que permitam avisar o condutor do estado da superfície do pavimento.

Entretanto, a qualidade de circulação também está directamente relacionada com o conforto de circulação e este com o nível de ruído produzido pela estrada. Este, além de ter um impacto directo sobre os utentes da estrada também tem um impacto directo sobre os não utentes, ou seja as populações do espaço habitado na “área de influência da estrada”. Neste contexto têm sido desenvolvidos projectos de inovação ao nível das camadas de desgaste, a componente do pavimento responsável pela qualidade funcional do pavimento, com impacto directo nos utentes, público em geral e ambiente.

Na Europa, os métodos correntes para a limitação do ruído rodoviário incluem a construção de barreiras acústicas, o controlo do tráfego (com a limitação da velocidade), a alteração do traçado vertical e horizontal e a definição de zonas protegidas.

Um método inovador de limitação do ruído é a construção de “pavimentos silenciosos” (Camomilla & Luminari, 2004), uma vez que o estado actual da técnica não permite uma redução significativa do ruído produzido pelo motor e sistema de exaustão dos veículos.

As camadas de desgaste porosas e, mais recentemente, a camada de desgaste “*twinlayer*”, têm sido usadas em alguns países, nomeadamente na Holanda, como medida de redução do ruído (Hofman & Kooij, 2003).

Uma redução do ruído pode também ser obtida através da utilização de camadas delgadas como a “*Poroelastic Surface*” (Fujiwara et al., 2005), concebidas para controlar a textura e os vazios, introduzindo novos materiais como a borracha, e novos conceitos de pavimento como o “*Ecotechic Pavement*” e o “*Euphonic Pavement*” (Camomilla & Luminari, 2004).

Assim, qualquer intervenção no ambiente rodoviário, em particular urbano, deve procurar optimizar a escolha da solução da camada de desgaste, de modo a reduzir a “área de influência da estrada” quanto à propagação do ruído produzido por esta. Na Figura 5 apresenta-se a evolução do “mapa de ruído” após a aplicação de uma nova camada de desgaste em mistura betuminosa com betume modificado com borracha reciclada.

Além deste tipo de impacto das intervenções ao nível dos pavimentos rodoviários devem ser avaliados outros, nomeadamente a qualidade das águas de escorrência das estradas e a qualidade do ar.

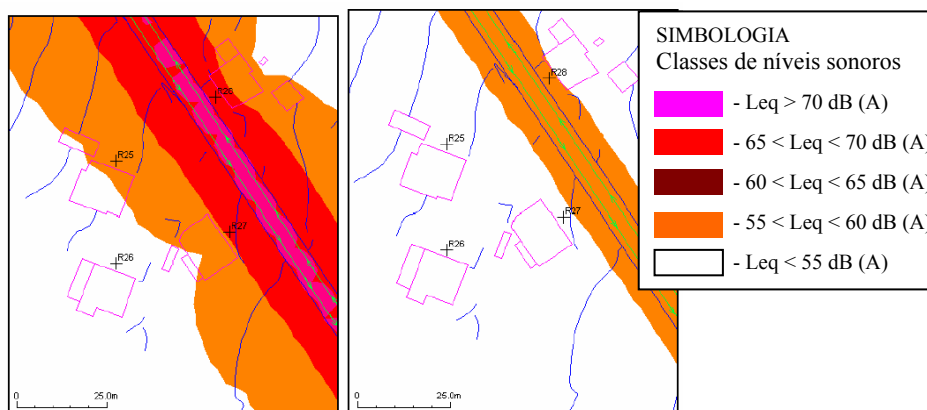


Figura 5 – Mapa de ruído comparativo dos efeitos de uma intervenção de reabilitação (Nobre, 2006)

4.2. A Construção e Conservação Sustentável dos Pavimentos Rodoviários

Nos últimos anos tem vindo a aumentar a preocupação em limitar os trabalhos de conservação e de reabilitação à camada de desgaste (Nunn, 1997). A camada de desgaste apresenta um conjunto de diferentes possibilidades de intervenção, as quais, dada a sua importância para assegurar as diferentes funções dos pavimentos, constituem objecto de investigação fundamental e aplicada.

As camadas de desgaste inovadoras devem ser resistentes, duráveis e, em particular, devem proporcionar condições superficiais capazes de garantir aos utentes segurança, conforto, e economia na circulação, e a nível global garantir qualidade ambiental ao longo de toda a sua vida em serviço. Para além destas funções, estas camadas devem também integrar sistemas inteligentes de referência e de detecção das degradações, baseados nas TIC, interagindo directamente com o sistema de gestão da exploração e com o utente, assegurando em permanência condições de circulação e obedecendo a exigentes padrões de qualidade.

No entanto, a implementação de um programa inovador ao nível das camadas de desgaste exige a inovação na componente estrutural do pavimento, integrando a temática da *Construção e Conservação Sustentável dos Pavimentos Rodoviários*.

Neste contexto, os pavimentos, quanto à sua estrutura, devem ser mais duráveis, integrando materiais inovadores e devem ser “amigos do ambiente”, incorporando resíduos industriais. Deste modo, ao longo do ciclo de vida dos pavimentos, os custos de observação, *in situ* e em laboratório, serão reduzidos, ao mesmo tempo que será aumentada a fiabilidade dos modelos de previsão do comportamento das estruturas.

Assim, é necessário promover a sustentabilidade estrutural dos pavimentos, caminhando para “pavimentos perpétuos”, apenas com manutenção superficial, ao mesmo tempo que é preciso assumir que um pavimento deve ser uma estrutura em ciclo fechado: os materiais entram na fase de construção e depois é minimizada (tendencialmente eliminada) a rejeição de materiais ao longo da sua vida.

4.2.1. A Reciclagem de Pavimentos

Nesta abordagem, a reciclagem de pavimentos ainda continuará a assumir um papel fundamental no ciclo de vida dos pavimentos, e logo nas necessidades de investigação, procurando-se maximizar a incorporação de materiais degradados nas técnicas de reabilitação de qualquer tipo de pavimento, incluindo a sua utilização nas camadas de novos pavimentos.

A seguir apresentam-se dois casos de estudo de reciclagem de pavimentos, na reabilitação de pavimentos (Pereira & Picado-Santos, 2006): i) reciclagem a quente em central; ii) reciclagem a frio “*in situ*” com emulsão.

O primeiro caso de estudo apresenta as seguintes características:

- a estrutura do pavimento é composta por uma camada de desgaste em betão betuminoso (0/16) com 5 cm de espessura, uma camada de base betuminosa em macadame betuminoso (0/25) com 23 cm de espessura e uma camada de sub-base granular (0/50) com 20 cm de espessura (Figura 6);
- o tráfego previsto no dimensionamento inicial do pavimento foi de 40×10^6 eixos padrão de 80 kN;
- o pavimento encontra-se em serviço há 7 anos;
- as degradações do pavimento consistem em fendilhamento com origem à superfície até uma profundidade de 10 cm; as camadas granulares encontram-se em bom estado, podendo considerar-se um módulo de deformabilidade do solo de fundação de 60 MPa;

- a extensão do pavimento a reabilitar é de 10 km, com duas faixas de rodagem de 8 metros de largura, resultando numa área de 160000 m².

As características do segundo caso de estudo são as seguintes:

- a estrutura do pavimento é composta por uma camada de desgaste em betão betuminoso (0/16) com 5 cm de espessura, uma camada de base betuminosa em macadame betuminoso (0/25) com 7 cm de espessura, uma camada de base granular (0/40) com 20 cm de espessura e uma camada de sub-base granular (0/50) com 20 cm de espessura (Figura 7);
- o tráfego previsto no dimensionamento inicial do pavimento foi de 2×10^6 eixos padrão de 80 kN;
- o pavimento encontra-se em serviço há 12 anos;
- o pavimento apresenta um avançado estado de degradação, necessitando de uma intervenção ao nível de todas as camadas;
- da análise “in situ” das características do pavimento concluiu-se que o módulo de deformabilidade do solo de fundação é de 60 MPa;
- a extensão do pavimento a reabilitar é de 10 km, com uma faixa de rodagem de 8 metros de largura, resultando numa área de 80000 m².

Para cada caso foram adoptadas duas alternativas de reabilitação (fresagem/reforço tradicional ou reciclagem) de forma a avaliar os benefícios da utilização da reciclagem ou reutilização dos materiais usados. Assim, no primeiro caso de estudo a solução tradicional consiste em fresar os 10 cm superiores do pavimento (com a normal colocação a vazadouro), aplicando uma nova camada de regularização e de desgaste. No segundo caso de estudo, aplicar-se-ia apenas um reforço tradicional sobre o pavimento existente, incluindo uma camada anti-propagação de fendas (SAMI), para retardar o fenómeno de reflexão de fendas.

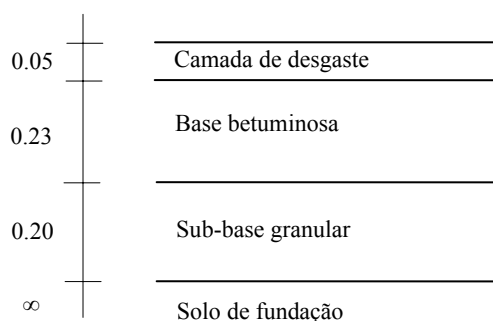


Figura 6 – Estrutura do pavimento do primeiro caso de estudo

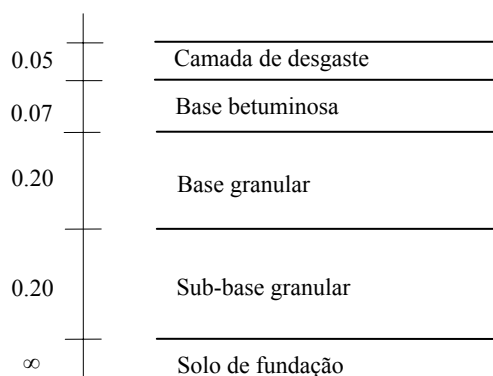


Figura 7 – Estrutura do pavimento do segundo caso de estudo

Relativamente à utilização das técnicas de reciclagem, no primeiro caso, o material fresado seria incluído na produção (em central, a quente) da mistura betuminosa de regularização a utilizar no mesmo pavimento. Deste modo, é possível reutilizar 40% do material fresado. No segundo caso, o pavimento existente seria reciclado “in situ”, numa espessura de 15 cm, com a adição de uma emulsão betuminosa (3% de betume residual).

O dimensionamento do pavimento para cada uma das alternativas apresentadas foi efectuado com base no programa de cálculo BISAR. Os resultados obtidos para a espessura das novas camadas apresentam-se no Quadro 2. Os custos associados à aplicação de cada camada, para as várias alternativas, apresentam-se no Quadro 3 e na Figura 8.

Quadro 2 – Espessuras (cm) das novas camadas de cada alternativa

Camada	Caso de Estudo 1		Caso de Estudo 2	
	Fresagem/Reforço	Reciclagem	Reforço	Reciclagem
Desgaste	5,0	2,0	5,0	5,0
Regularização ou Base	11,0	14,0	10,0	15,0

Quadro 3 – Custos (€) associados a cada alternativa de reabilitação

Camada	Caso de Estudo 1		Caso de Estudo 2	
	Fresagem/Reforço	Reciclagem	Reforço	Reciclagem
Desgaste	800000	352000	400000	400000
Regularização ou Base	1232000	1097600	560000	240000
SAMI	--	--	80000	--
Total	2032000*	1449600	1040000	640000
Diferença	582400 (28,7%)		400000 (38,5%)	

Não considerando o custo da colocação a vazadouro dos materiais fresados ($€20/m^3 \times 16000m^3 = €320000$)

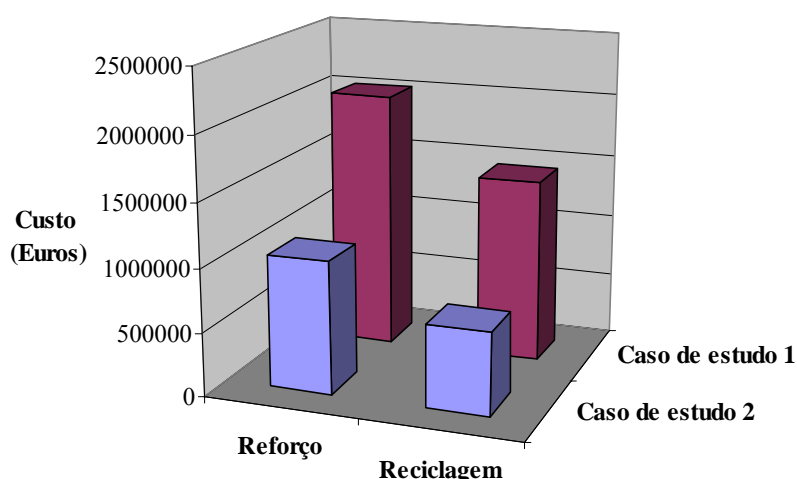


Figura 8 – Custos associados às alternativas dos casos de estudo

4.2.2. Novos materiais de pavimentação

Entretanto, a procura de estruturas de pavimentos com um comportamento mais fiável, incluirá a investigação de novos materiais de alto desempenho, assumindo a minimização das intervenções de conservação, quer pelos seus custos directos para a administração rodoviária, quer, em particular, pelos custos directos para os utentes e para o ambiente.

Assim, uma vez que se pretende obter materiais com um desempenho optimizado, tem sido estudado pormenorizadamente o comportamento das misturas betuminosas através da análise dos fenómenos que ocorrem a um nível microestrutural.

A análise da micromecânica nas misturas betuminosas tem sido efectuada por diversos autores (Buttlar & You, 2001; Silva, 2006), que recorreram a ensaios mecânicos e a modelos microestruturais de elementos discretos ou finitos para identificar as causas iniciais (a um nível micro) de um comportamento inadequado (a um nível macro).

De acordo com Buttlar & You (2001), a modelação microestrutural das misturas betuminosas consegue simular a estrutura interna dos agregados e do mastique, sendo o método que consegue prever com maior fiabilidade o seu comportamento.

Para o estudo do fendilhamento das misturas betuminosas, a utilização dum modelo de elementos de treliça (*lattice model*) é mais eficaz devido à importância que a ligação entre os materiais (agregado-agregado, agregado-mastique e mastique-mastique) tem para a simulação deste comportamento. De uma forma simplificada, a modelação com treliça envolve a aproximação de um meio contínuo, usando uma treliça (*lattice*) em que cada elemento representa uma ligação intacta que pode ser quebrada durante o carregamento, formando uma descontinuidade (microfenda). Os modelos de treliça podem ser utilizados para simular um material heterogéneo, como é o caso das misturas betuminosas.

Recentemente, Silva (2006) desenvolveu um modelo microestrutural e heterogéneo de elementos de treliça, utilizado para estudar a evolução do fendilhamento do mastique e das misturas betuminosas. Os principais resultados obtidos nos ensaios monotónicos de tracção foram a resistência à tracção, a extensão na rotura e o módulo tangente nas diferentes configurações de ensaio. Na Figura 9 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de tracção realizados para estudo do fendilhamento do mastique (a) e das misturas betuminosas (b). Estes resultados foram fundamentais para o desenvolvimento de modelos de previsão do comportamento do mastique e das misturas betuminosas.

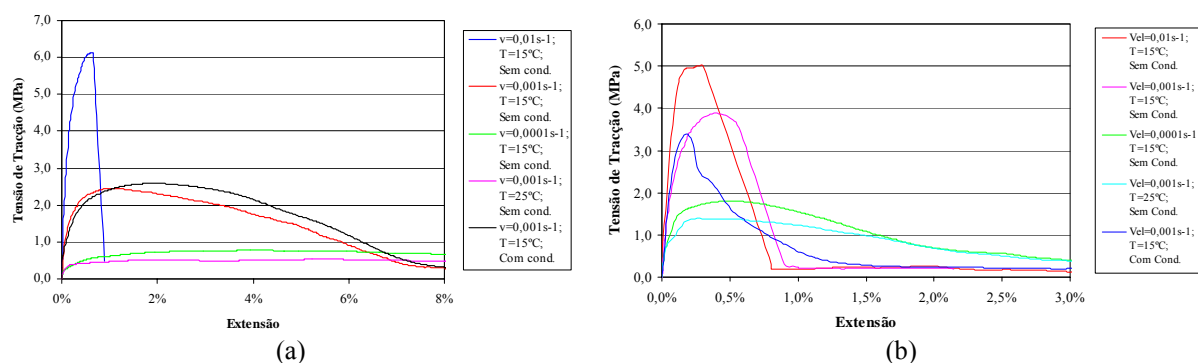


Figura 9 – Variação da tensão de tracção do mastique (a) e das misturas betuminosas (b) em função da extensão aplicada

Em seguida, as propriedades dos mastiques e das misturas betuminosas foram utilizadas num modelo microestrutural de elementos de treliça, para avaliar a influência da micromecânica no fendilhamento das misturas betuminosas. Esse modelo simula os ensaios monotónicos de tracção realizados em laboratório sobre as misturas betuminosas. A

distribuição dos agregados e do masticque no modelo foi efectuada com base em imagens digitalizadas dos provetes de mistura betuminosa.

Os factores que permitiram analisar a qualidade da previsão do comportamento das misturas betuminosas com os modelos heterogéneos de elementos de treliça foram os seguintes: i) a variação da resistência com o aumento de deformação, ou seja, a resposta não linear das misturas betuminosas (comparação com resultados experimentais); ii) o padrão de fendilhamento observado nos provetes.

O comportamento obtido em tracção nos modelos de previsão foi comparado com o comportamento das misturas betuminosas observado em laboratório, tendo-se observado uma boa relação entre a previsão numérica e os resultados experimentais (Figura 10).

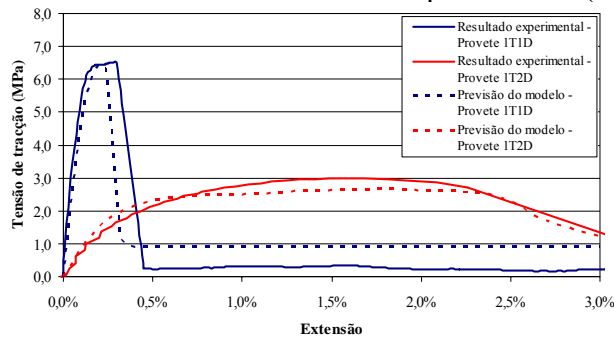


Figura 10 – Comportamento das misturas betuminosas em tracção observado em laboratório e previsto no modelo de simulação

A análise comparativa entre os ensaios numéricos e experimentais também permitiu avaliar se os padrões de fendilhamento dos modelos são similares aos observados em laboratório, como se exemplifica na Figura 11.

A análise do padrão de fendilhamento foi efectuada visualmente, podendo concluir-se que, normalmente, o fendilhamento observado em laboratório foi adequadamente previsto com os modelos de elementos de treliça.

A análise desta modelação numérica permitiu observar que o fendilhamento previsto ocorreu sempre através do masticque, habitualmente em locais próximos de agregados, o que comprova a ocorrência de fendilhamento na ligação agregado-masticque devido a problemas de coesão interna do masticque.

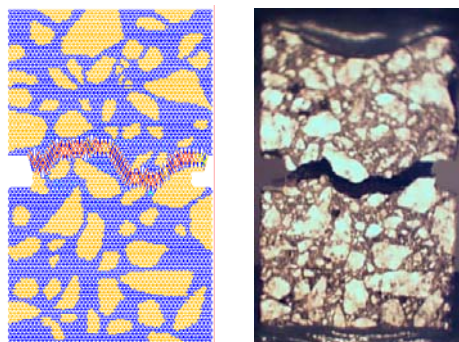


Figura 11 – Padrão de fendilhamento previsto no modelo numérico e obtido em laboratório

A introdução de novos materiais na constituição das camadas dos pavimentos e a evolução da configuração das cargas dos veículos, conduz à actualização dos métodos de dimensionamento actuais, assim como a actualização das especificações relativas aos materiais e ao comportamento inicial a exigir às estruturas inovadoras de pavimentos.

Com o objectivo de melhorar o desempenho dos pavimentos flexíveis, tem-se realizado um número cada vez maior de pesquisas sobre novos materiais que possam aumentar a sua vida útil e diminuir os custos de manutenção. Uma alternativa bastante utilizada no meio rodoviário tem sido a adição de materiais poliméricos aos ligantes betuminosos tendo por objectivo a melhoria das suas propriedades, principalmente no que se refere à susceptibilidade térmica e flexibilidade (Neto, 2003).

Associadas à melhoria do comportamento dos ligantes betuminosos, e principalmente das misturas betuminosas com estes ligantes, estão as preocupações de ordem ambiental.

Experiências com pavimentos reabilitados em diferentes países têm mostrado o excelente desempenho estrutural e funcional das misturas betuminosas com betume-borracha.

É neste contexto de melhoria do comportamento dos materiais betuminosos e diminuição da poluição ambiental que se inserem os ligantes betuminosos modificados com borracha granulada de pneus usados, conhecidos como betume-borracha. Em geral, são observadas melhorias na vida à fadiga, redução do custo de manutenção das vias, aumento da resistência à derrapagem, diminuição da reflexão de fendas, além de redução nos níveis de poluição sonora quando se empregam misturas de graduação descontínua ou aberta.

A diferença de desempenho entre as misturas betuminosas com betume modificado com borracha e as misturas betuminosas com betume convencional foi observada por Sousa et al. (2000), recorrendo a ensaios de fadiga por flexão em 4 pontos (Figura 12).

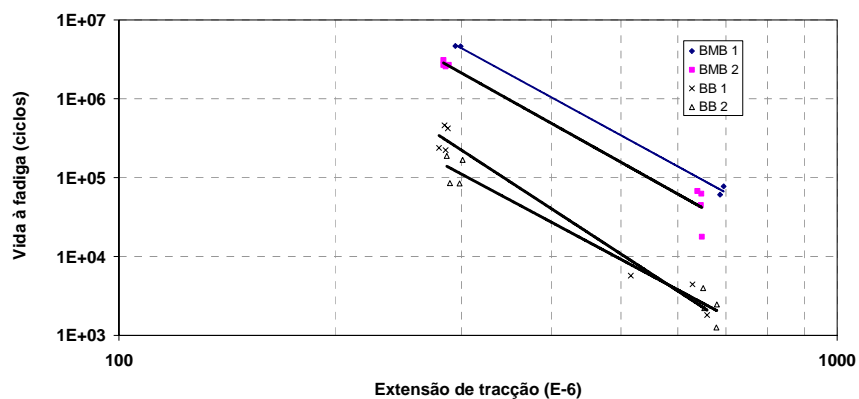


Figura 12 – Observação laboratorial do desempenho de misturas betuminosas com borracha comparativamente a misturas convencionais

A justificação para a diferença de desempenho entre as misturas com betume modificado com borracha e as misturas com betume convencional é descrita por Holleran & Reed (2000). Segundo estes autores, os asfaltenos e as fracções leves (maltenos, resinas) dos betumes convencionais interagem com as partículas de borracha formando uma película de gel sobre estas partículas (Figura 13), provocando a fixação das fracções leves que deixam de ser atacadas pelos agentes climáticos, evitando assim a sua evaporação com o tempo.

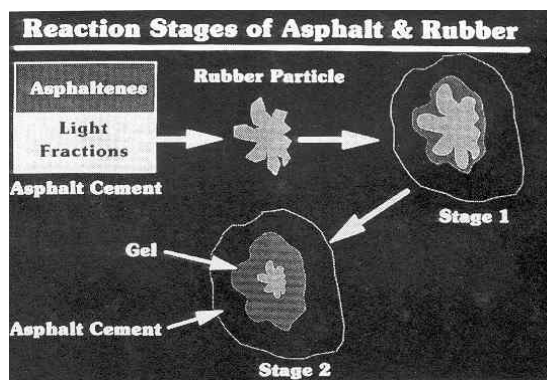


Figura 13 – Modelo hipotético de interação entre as partículas de borracha granulada e o betume convencional (Hollaran & Reed, 2000)

A aplicação da modelação numérica ao dimensionamento de reforços de pavimentos permite verificar que os reforços com misturas betuminosas com betume modificado com borracha necessitam de menos espessura que os correspondentes com misturas utilizando betume convencional (Figura 14).

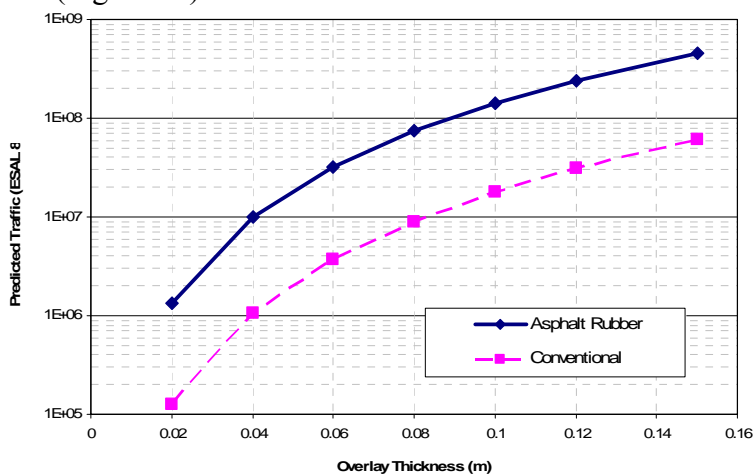


Figura 14 – Influência do tipo de mistura betuminosa na vida de um reforço (Sousa et al., 2005)

5. CONCLUSÕES

A reabilitação da rede rodoviária assumirá no futuro muito próximo uma importância que deverá conduzir à adopção de uma visão proactiva no domínio da gestão rodoviária. Esta visão global da reabilitação terá que integrar todas as componentes da rede rodoviária, assim como todos os intervenientes com o seu serviço.

Neste contexto, a inovação assumirá cada vez mais um papel insubstituível no apoio às administrações rodoviárias, incluindo os domínios da segurança rodoviária, procurando integrar a interacção “condutor-veículo-estrada” e a qualidade funcional para os utentes, não utentes e ambiente. Esta abordagem apenas será possível com apoio numa estratégia de construção e conservação sustentada da rede rodoviária, a qual deverá ser enquadrada numa cooperação estratégica entre universidades, administrações rodoviárias e empresas.

6. REFERÊNCIAS

- AIPCR – Technical Committee C7/8, Innovative Pavement Design, Paris (2003).
- FP2, Foundation for Pavement Preservation, Pavement Preservation Today, Vol.2, nº1, Summer 2001, Virginia (2001).
- Austroroads, Road Environment Safety Guide to Road Safety Program Management, Sydney (2003).
- Buttlar W., You Z., Discrete element modeling of asphalt concrete: a micro-fabric approach, *TRB 80th Annual Meeting*, Transportation Research Board, Washington D.C. (2001).
- Camomilla G., Luminari M., Silent road for urban and extra-urban use: the innovative resilient and resonant pavements, *5th symposium on pavement surface characteristics - roads and airports*, World Road Association, CD-Rom. Toronto (2004).
- FEHRL – Federation of European Highway Research Laboratories, Nr2c – New Road Construction Concepts, Bruxelles (2004).
- Fujiwara T., Meiarashi S., Namikawa Y., Hasebe M., Noise reduction effect of porous elastic road surface and drainage asphalt pavement, *84th Transportation Research Board Annual Meeting*, Transportation Research Board, Washington, 2005.
- Hofman R., Kooij J., Results from the dutch noise innovation program road traffic (IPG) and roads to the future program (WnT), *Proceedings of Internoise 2003, 32nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering*, Korea (2003).
- Holleran, G. e Reed, J.R. Emulsification of asphalt rubber blends, *Asphalt Rubber 2000 Conference*, Vilamoura (2000).
- Macedo A., Gomes S., Cardoso J., Políticas e programas de segurança rodoviária e sua relação com o risco de acidentes em diferentes países europeus, *Estrada 2006, Centro Rodoviário Português, CD-Rom*, Estoril (2006).
- Martins P., Nabais E., Segurança rodoviária algumas reflexões sobre metodologias de gestão e sua implementação em Portugal, *Estrada 2006, Centro Rodoviário Português, CD-Rom*, Estoril (2006).
- Neto, S.A.D., Avaliação das propriedades dos ligantes e das misturas asfálticas modificadas com borracha granulada de pneus usados, *Tese de doutoramento*, Universidade de Brasília (2003).
- Nobre S., Pavimentos modificados em borracha – enquadramento ambiental, *Estrada 2006, Centro Rodoviário Português, CD-Rom*, Estoril (2006).
- Nunn M., Long-Life Flexible Roads, *8th International Conference on Asphalt Pavements, Vol. I, pp 3-16*, Seattle (1997).
- Pereira, P. and Picado-Santos, L., Technical-Economical Evaluation of Pavement Recycling Alternatives, *Third Gulf Conference on Roads*, Muscat (2006).
- Rothengatter T., Huguenin D., Traffic and transport psychology - theory and application, *Proceedings of the ICTTP 2000*, Oxford, Elsevier (2004).
- Silva H., Characterization of the bituminous mastic and the aggregate-mastic bond: contribution to the study of the bituminous mixtures' behaviour, *Tese de doutoramento*, University of Minho, Guimarães (2006).
- Sousa, J.B., Pais, J.C. e Way, G.B., A Mechanistic-Empirical Based Overlay Design Method for Reflective Cracking, *Asphalt Rubber 2003 Conference*, Brasilia (2003).
- Sousa, J.B., Pais, J.C. e Way, G.B., A Mechanistic-Empirical Based Overlay Design Method for Reflective Cracking, *Road Materials and Pavement Design, n° 3, vol. 6* (2005).