

OS PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS E A QUALIDADE DAS ESCORRÊNCIAS DE ESTRADAS NUM CENÁRIO DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

Ana Estela BARBOSA¹, Ana Cristina FREIRE², Simona FONTUL³, João Nuno FERNANDES⁴

Resumo

As condições climáticas, nomeadamente o regime de precipitação e as temperaturas médias do ar, condicionam a quantidade e a qualidade das águas de escorrência de estradas. Em Portugal constatam-se tendências distintas em diferentes regiões de precipitação: para um mesmo tipo de pavimento, autoestradas localizadas em regiões mais áridas, serão mais susceptíveis de provocar impactes agudos no meio hídrico. Embora hoje se conheçam os poluentes prioritários, é natural que esta realidade se altere pelas influências múltiplas que as alterações climáticas irão exercer sobre os processos de geração e transporte dos poluentes.

Este artigo foca-se numa importante origem de poluentes, o pavimento rodoviário e analisa como os vários tipos de pavimentos, sob a ação de alterações climáticas poderão ter um comportamento que altere as escorrências rodoviárias. Naturalmente, o comportamento do pavimento depende do tipo de material utilizado e da integridade da própria estrutura, incluído o seu sistema de drenagem.

Demonstra-se que a maioria dos potenciais impactes resultantes quer do aumento de temperatura, quer do aumento dos fenómenos extremos de precipitação, potencia um incremento na geração de poluentes (e.g.: partículas de ligante e agregados).

Para minimização dos impactes dos poluentes rodoviários no meio hídrico é importante que se fomente uma investigação científica multidisciplinar em cenários de alterações climáticas.

Palavras-Chave: alterações climáticas, escorrências pluviais, qualidade da água, pavimentos rodoviários,

¹ Investigadora Auxiliar, Departamento de Hidráulica e Ambiente, LNEC. Av. Brasil, 101, 1700-066 Lisboa. aestela@lnec.pt. Tel: 218443442. Fax: 218443072.

² Investigadora Auxiliar, Departamento de Transportes, LNEC. Av. Brasil, 101, 1700-066 Lisboa. acfreire@lnec.pt. Tel: 218443536. Fax: 218443029

³ Investigadora Auxiliar, Departamento de Transportes, LNEC. Av. Brasil, 101, 1700-066 Lisboa. simona@lnec.pt. Tel: 218443640. Fax: 218443029

⁴ Bolseiro de Pós Doutoramento, Departamento de Hidráulica e Ambiente, LNEC. Av. Brasil, 101, 1700-066 Lisboa. jfernandes@lnec.pt. Tel: 218443920. Fax: 218443072

1 INTRODUÇÃO

As águas de escorrência de estradas transportam poluentes cuja origem é diversa, incluindo os próprios veículos, os materiais de construção da estrada e as atividades de manutenção da rodovia. As fontes mais relevantes dos principais poluentes são os travões, a carroçaria da viatura, os combustíveis e óleos utilizados na mesma e, por outro lado, os materiais que constituem os pavimentos, nomeadamente os ligantes betuminosos ou hidráulicos. Também a ocupação do solo na bacia hidrográfica da estrada condiciona a geração de poluentes, nomeadamente pelos transportados por via atmosférica. Estes poluentes causam impactes na qualidade do meio hídrico (e.g.: Vieira *et al.*, 2013).

Há muito anos que a temática agora abordada é estudada em diferentes países - por exemplo, Driver e Tasker (1990) e Kayhanian *et al.* (2003), desenvolveram vários trabalhos nos EUA; Moy *et al.* (2003) no Reino Unido, etc. Sabe-se que as variáveis climáticas, tais como a precipitação e a temperatura, condicionam a composição físico-química das escorrências de estradas.

Ao longo do tempo tem-se evidenciado alterações sucessivas, como por exemplo o facto da utilização da gasolina sem chumbo ter ocasionado um enorme decréscimo do teor deste metal pesado nas águas de escorrência. Este aspeto foi observado em Portugal, desde os primeiros estudos de monitorização nacionais (Barbosa, 1999) até ao presente. Foi igualmente observado que, embora havendo padrões internacionais, os poluentes mais significativos sejam variáveis de país para país e inclusive, apresentam particularidades entre diferentes regiões do mesmo país.

O projecto G-Terra, “Directrizes para a gestão integrada da poluição das escorrências de estradas em Portugal”, que decorreu entre 2008 e 2011, angariou um conjunto de dados nacionais, caracterizando as escorrências de 5 estradas para um grande leque de poluentes. O G-Terra teve a participação de várias instituições, nomeadamente o Laboratório Nacional de Engenharia Civil, a Universidade do Minho, a Escola Superior de Tecnologia de Viseu e o Instituto da Água. Contou ainda com a colaboração das Estradas de Portugal e de um consultor externo da *Highways Agency*, do Reino Unido. Estes dados, em conjunto com o restante conhecimento nacional, foram processados de forma a melhor compreender a informação obtida e a encontrar relações entre os poluentes e entre estes e as características das estradas e do clima do local. Foi assim possível chegar a conclusões gerais, caracterizadoras das escorrências de estradas em Portugal e também observar padrões distintos e a influência do regime de precipitação (Barbosa *et al.*, 2011).

Este estudo identificou um grupo de poluentes considerados prioritários na avaliação da qualidade das escorrências rodoviárias e seus impactes no meio hídrico, nomeadamente: Zn, Cu, Fe, SST e CQO (Barbosa *et al.*, 2011). Para um estudo realizado num país com uma realidade climática diferente, Reino Unido, Moy *et al.* (2003) e Crabtree *et al.* (2004) apontam para outro conjunto de poluentes (e.g.: Moy *et al.*, 2003; Crabtree *et al.*, 2004).

Este artigo debruça-se sobre os pavimentos rodoviários como origem de poluentes e analisa sistematicamente os processos e os poluentes que poderão ser afectados por cenários de temperaturas e precipitações extremas. É importante considerar que, ao mesmo tempo que ocorrerão estas alterações climáticas, a indústria da especialidade evoluiu, com o desenvolvimento e a aplicação de novos materiais e de técnicas de construção para os pavimentos rodoviários que poderão condicionar as características das águas de escorrência.

2 A POLUIÇÃO DAS ESCORRÊNCIAS RODOVIÁRIAS

2.1 A drenagem rodoviária: quantidade e qualidade

A concretização de um projeto rodoviário inserido numa zona natural irá alterar os fluxos de caudais existentes, e eventualmente provocar ou acentuar ocorrências de inundações, por exemplo através do efeito de barreira. A construção de passagens hidráulicas assegura a drenagem transversal, sendo importante o seu correto dimensionamento e colocação no alinhamento natural da linha de água. A redução do tempo de concentração, associada a maiores velocidades de escoamento, pode induzir alterações nos processos de erosão e sedimentação, tendo consequências tanto ao nível da morfologia das linhas de água como da qualidade do meio hídrico.

A deterioração da qualidade do meio hídrico pela influência de estradas deve-se à poluição acumulada no pavimento e na atmosfera (proveniente de outras origens) e transportada pelas águas das chuvas. A Figura 1 ilustra estes aspetos.



Figura 1 – Drenagem rodoviária: o transporte de águas pluviais de taludes e do pavimento, traduzindo a incorporação de diferentes substâncias. Amostras de águas de escorrência rodoviária e do meio hídrico receptor das mesmas, sendo visível o efeito de diluição no aspeto da água.

2.2 Acumulação e lavagem de poluentes nas estradas

O pavimento rodoviário funciona como um acumulador de poluentes, sendo também o local onde podem ocorrer transformações físicas, químicas e biológicas dos poluentes, durante o período seco. O próprio pavimento, em função das características dos materiais que o constituem, é também uma origem de substâncias indesejáveis, tais como sólidos orgânicos e inorgânicos e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos. Posteriormente, na sequência de um evento de precipitação, haverá uma lavagem total ou parcial destes poluentes acumulados à superfície e nos espaços intersticiais do pavimento, que se traduzirão mais por partículas e poluentes associados a estas (particulados).

Nos estudos de avaliação das características das escorrências rodoviárias, a monitorização geralmente envolve a caracterização dos eventos de precipitação (duração, volume,

intensidade) e do escoamento produzido, a par da amostragem e posterior análise das amostras recolhidas. Uma variável importante é o período seco entre eventos de precipitação, sendo também interessante que fatores climáticos como a temperatura desempenham um papel relevante nos processos dos poluentes. Por exemplo, temperaturas mais elevadas, muitas vezes associadas a maior radiação solar, tendencialmente reduzem a presença de hidrocarbonetos nas escorrências rodoviárias.

3 ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS VS DRENAGEM RODOVIÁRIA

3.1 O que contemplam cenários de alterações climáticas

As alterações climáticas são apontadas como cenários futuros com **temperaturas extremas**, bem como o aumento de condições severas no regime de precipitação, com uma maior frequência **de cheias quer de secas** (e.g.: Santos *et al.*, 2002). Há estudos que apontam, em Portugal, para uma redução da precipitação média anual, a par com o incremento de volume dos eventos extremos (Costa *et al.*, 2012). Naturalmente, estas alterações irão mudar tanto as condições dos meios hídricos receptores das escorrências rodoviárias como os processos de génese, acumulação, transformação e transporte dos poluentes.

Refira-se ainda que, com as alterações climáticas, os pavimentos rodoviários são sujeitos a uma maior exposição à precipitação e a um incremento da fissuração por variações térmicas o que poderá favorecer a escorrência para o interior da própria estrutura, conduzindo a um comprometimento do seu desempenho (Dawson, 2007), bem como a alterações nos atuais processos físicos, químicos e biológicos que afetam os poluentes acumulados no pavimento.

No Reino Unido, identificaram-se fatores relacionados com o local e as características do evento de precipitação que afetam as concentrações de poluentes nas escorrências rodoviárias (Crabtree *et al.*, 2008). As variáveis associadas ao evento que se revelaram importantes foram a precipitação do mês ou do evento; a intensidade máxima horária de precipitação e o período seco antecedente.

Desta forma, o momento presente, no qual se projetam cenários de alterações climáticas, suscita a necessidade de se compreender quais as repercussões dos mesmos na qualidade das escorrências rodoviárias. A avaliação dos processos das escorrências rodoviárias em estradas localizadas em regiões climáticas distintas, acaba por proporcionar um “insight” sobre estas questões.

3.2 Análise comparativa de duas auto-estradas localizadas em diferentes regiões climáticas

Constatou-se que, mesmo num pequeno país como é o caso de Portugal, estradas localizadas em regiões climáticas distintas apresentam diferentes padrões de quantidade e qualidade nas suas águas de escorrência (Barbosa e Fernandes, 2012). Por exemplo, foram comparadas as variáveis relativas a 6 poluentes monitorizados na autoestrada A1, num local próximo de Fátima e na autoestrada A22 na zona de Alcantarilha (ver Figura 2). A precipitação média anual para a região da A1 é de 1100 mm e para a A22 é de 560 mm. Durante o período de monitorização a A1 contabilizou um tráfego médio diário anual de 27746 e a A22 de 24000.

O Quadro 1 demonstra claramente que os dois locais de estudo apresentam diferentes características climáticas. A média do período seco antecedente (PSA) é superior no caso da A22 (4,7 dias, comparado com 3,7 dias no caso da A1). Por outro lado, a precipitação média de cada evento manifesta a tendência oposta sendo superior na A1 (5,2 mm contra 3,1 mm na A22).

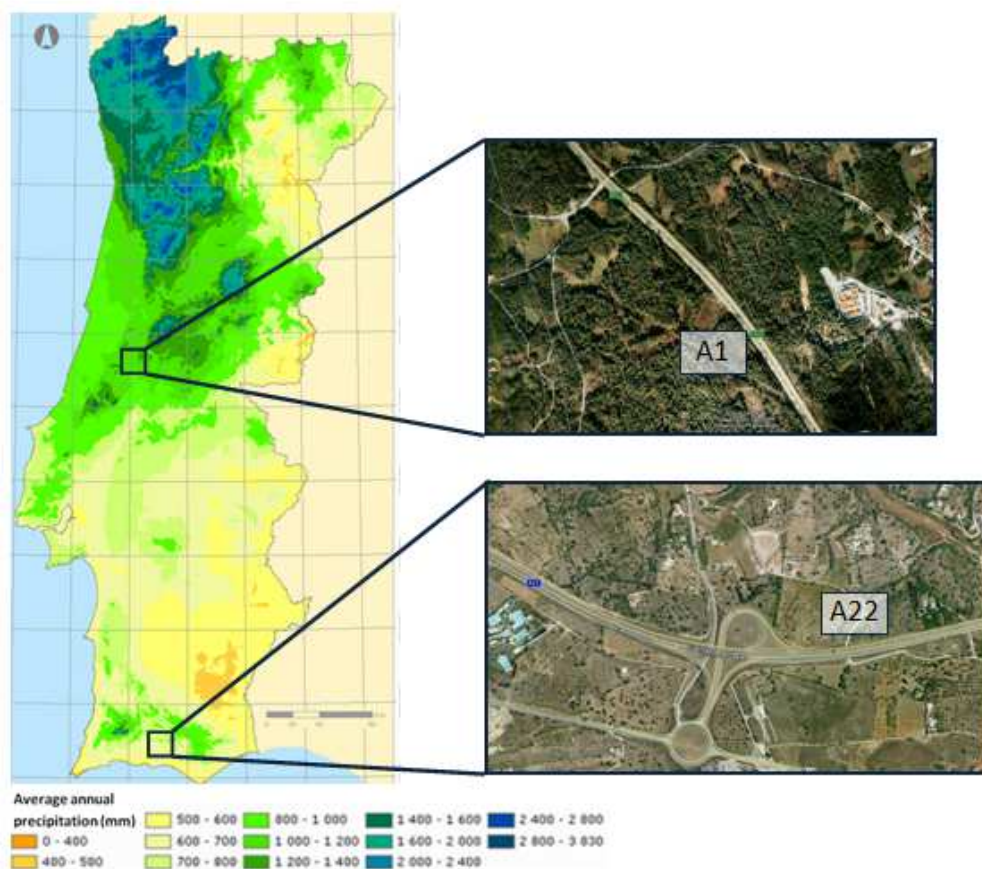


Figura 2. Localização das duas autoestradas no mapa de Portugal, padrão da precipitação média anual.

O PSA e o volume de precipitação foram as duas variáveis que demonstraram uma maior associação com a presença de poluentes nas escorrências das duas auto-estradas (o que corrobora com as conclusões de, por exemplo, Gan *et al.*, 2008 e Kayhanian *et al.*, 2003).

O coeficiente de escoamento é, em média, muito superior na A22 que na A1, sendo este resultado atribuído ao facto da área de drenagem ser mais pequena e a temperatura mais baixa para o período de monitorização. A A22 foi monitorizada no Inverno e a A1 na Primavera. Durante este período, a temperatura média do ar foi de 17,6°C para a A1 e de 12,3°C para a A22.

O Quadro 2 evidencia que, embora a A1 seja responsável por maiores cargas poluentes anuais quando comparada com a A22, esta última pode apresentar concentrações máximas quase tão elevadas como as registadas no caso da A1 (ou superiores, como acontece para

o parâmetro N-Kjeldhal). Mais dados sobre esta comparação podem ser encontradas em Barbosa e Fernandes (2012).

Estes resultados comprovam a elevada relevância do volume de precipitação, bem como do PSA na descarga de concentrações mais elevadas de poluentes. Para um mesmo tipo de pavimento, autoestradas localizadas em regiões mais áridas, serão mais susceptíveis de produzir impactes agudos no meio hídrico.

Quadro 1. Caracterização dos eventos monitorizados: evidências de realidades climáticas distintas

| Local | Evento | Volume evento (mm) | Duração evento (horas) | Intensidade do evento (mm/h) | Coefficiente de escoamento. | Período seco Antecedente (dias) |
|-------|---------------------|--------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| A1 | 1 | 4,6 | 2,0 | 2,3 | 0,04 | 3* |
| | 2 | 2,2 | 0,6 | 3,8 | 0,05 | 4,4 |
| | 3 | 2,8 | 1,3 | 2,2 | 0,15 | 0,2 |
| | 4 | 2,8 | 0,8 | 3,4 | 0,08 | 0,8 |
| | 5 | 2,4 | 0,8 | 3,2 | 0,22 | 0,2 |
| | 6 | 11,2 | 9,1 | 1,2 | 0,29 | 0,3 |
| | 8 | 16,2 | 2,8 | 5,7 | 0,24 | 14* |
| | 9 | 4,2 | 1,1 | 3,9 | 0,15 | 12,7 |
| | 10 | 3,2 | 0,3 | 12,8 | 0,28 | 0,7 |
| | 11 | 2,8 | 0,9 | 3,1 | 0,12 | 1,5 |
| | Média (n=10) | | 5,2 | 2,0 | 4,2 | 0,16 |
| A22 | 1 | 5,2 | 3,1 | 1,7 | 0,30 | 10,5 |
| | 2 | 1,8 | 2,7 | 0,7 | 0,14 | 1,9 |
| | 3 | 1,0 | 0,8 | 1,2 | 0,29 | 3,6 |
| | 5 | 4,8 | 2,4 | 2,0 | 0,56 | 1,8 |
| | 6 | 1,4 | 1,0 | 1,4 | 0,18 | 0,7 |
| | 7 | 8,0 | 2,8 | 2,9 | 0,42 | 0,9 |
| | 8 | 1,0 | 0,2 | 6,0 | 0,71 | 0,2 |
| | 9 | 1,4 | 2,1 | 0,7 | 2,00** | 2,7 |
| | 10 | 3,4 | 3,1 | 1,1 | 1,00 | 20,4 |
| | Média (n=9) | | 3,1 | 2,0 | 2,0 | 0,45 |

* Valor estimado com base em dados nacionais (SNIRH) e registos de monitorização.

** Valor inconsistente (provavelmente devido a medições de caudal incorretas) e não considerado no cálculo da média.

Quadro 2. Caracterização das escorrências da A1 e da A22 para uma seleção de poluentes.

| Parâmetros/estrada | A1 (11 eventos) | | | A22 (9 eventos) | | |
|--------------------|-----------------|-------------|------------------------|-----------------|-------------|------------------------|
| | CML (mg/l) | Max. (mg/l) | Carga Pol. (kg/ha/ano) | CML (mg/l) | Max. (mg/l) | Carga Pol. (kg/ha/ano) |
| SST | 22,2 | 350,0 | 5956 | 52,4 | 220,0 | 2937 |
| COT | 22,7 | 72,0 | 2624 | 18,4 | 38,0 | 1028 |
| CQO | 81,9 | 330,0 | 9475 | 38,3 | 226,0 | 2147 |
| Cu | 0,02 | 0,051 | 2,3 | 0,03 | 0,046 | 1,4 |
| Fe | 0,35 | 7,192 | 40,2 | 1,9 | 6,627 | 108,7 |
| N-Kjeldhal | 2,0 | 5,0 | 230 | 2,7 | 10,0 | 152 |

4 AS FUNÇÕES E CARACTERÍSTICAS DO PAVIMENTO RODOVIÁRIO

4.1 Principais tipos de pavimentos rodoviários

A principal função de um pavimento rodoviário é assegurar uma superfície de rolamento livre e desempenada que permita a circulação de veículos em condições de segurança, conforto e economia, durante o seu período de vida, estando este submetido às ações do tráfego e às ações climáticas (LNEC, 1962).

Um pavimento rodoviário, no que respeita à sua constituição, pode ser considerado como um sistema multiestratificado, formado por um conjunto de camadas de espessura finita, apoiadas na fundação constituída pelo terreno natural, sendo que as características desta podem ser melhoradas na superfície, formando o leito do pavimento.

A fundação do pavimento é, em geral, constituída pelo material resultante das terraplenagens realizadas no decorrer da obra, e tem como funções criar uma plataforma com uma superfície regular e desempenada, apresentar uma adequada capacidade de suporte a curto e a longo prazo, e permitir a circulação do equipamento de obra necessário à construção do pavimento. Quando esta plataforma, constituída por terreno natural, não apresenta as características desejadas, pode ser colocada uma camada de solo com características melhoradas, podendo esta ser ou não ser tratada com ligantes - leito do pavimento-, sendo que faz parte integrante da fundação. A sua função, entre outras, é a de melhorar a regularidade geométrica da plataforma e aumentar a capacidade de suporte da fundação (Batista, 2009; Croney, 1998).

Assim, as camadas dum pavimento podem distinguir-se pelas funções que desempenham na estrutura - a camada de desgaste, superficial; e as restantes camadas que constituem o corpo do pavimento.

A camada de desgaste tem como principal função assegurar as características funcionais do pavimento, de modo a contribuir para uma circulação em condições de segurança, conforto e economia. Pode ainda contribuir para o comportamento estrutural, referindo-se a sua importante função de impermeabilização do pavimento, evitando a entrada das águas de escorrência para as camadas inferiores e para o solo de fundação.

O corpo do pavimento desempenha uma importante função estrutural, sendo o elemento responsável pela capacidade estrutural do pavimento, suportando as solicitações do tráfego, e pode ser constituído por camadas estabilizadas com ligantes betuminosos ou hidráulicos ou ainda por camadas granulares não ligadas (Croney, 1998).

Cada uma dessas camadas tem também a função de suportar a camada sobrejacente. No caso de pavimentos com camadas betuminosas, a camada subjacente à camada de desgaste designa-se por camada de regularização, sendo que abaixo desta, dispõem-se as camadas de base, aglutinadas ou não, e assentando sobre a fundação tem-se a última camada do corpo do pavimento, a camada de sub-base, geralmente constituída por materiais granulares apenas estabilizados mecanicamente por compactação, mas também por solos tratados com cimento (Batista, 2009; Bernucci *et al.*, 2008).

Da associação das diferentes camadas constituintes do pavimento, resultam diferentes tipos de pavimentos, que apresentam diferentes comportamentos quando solicitados pelas cargas dos veículos em combinação com as ações climáticas a que estão submetidos. Assim, e em função do tipo de materiais e da sua deformabilidade, podem distinguir-se três tipos

principais de pavimentos – flexível, rígido e semi-rígido - conforme a seguir descritos (Willway *et al.*, 2008):

- Pavimentos flexíveis - apresentam as camadas superiores da estrutura do pavimento constituídas por misturas betuminosas, isto é, por materiais estabilizados com ligantes betuminosos, estando subjacentes a estas camadas uma ou duas camadas constituídas por material granular ligado ou não ligado. O principal elemento estrutural deste tipo de pavimento é a camada de base constituída pelo referido material granular, podendo, também esta, ser formada por misturas betuminosas, e neste caso, o pavimento poderá ser designado por semi-flexível;

- Pavimentos rígidos - apresentam a camada superior constituída por betão de cimento, ou seja por materiais estabilizados com ligantes hidráulicos, geralmente cimento Portland. As camadas subjacentes podem ser constituídas por material granular estabilizado com ligante hidráulico e/ou constituídas apenas por material granular não ligado. O seu principal elemento estrutural é a camada de betão de cimento, que desempenha simultaneamente a função de camada de desgaste;

- Pavimentos semi-rígidos – apresentam características comuns aos outros dois tipos de pavimentos anteriormente referidos, nomeadamente, uma ou duas camadas superiores constituídas por misturas betuminosas, seguidas de uma camada constituída por agregado estabilizado por ligante hidráulico, que corresponde à camada de base, sendo esta, o principal elemento estrutural deste tipo de pavimentos, podendo ainda dispor de uma camada granular, não ligada, constituindo a camada de sub-base.

4.2 Influência do clima no comportamento dos materiais de pavimentação

As camadas que constituem os pavimentos rodoviários sofrem alterações sob a ação dos fatores climáticos, como a temperatura e a precipitação. A influência destes fatores depende do tipo de material utilizado e da integridade da própria estrutura do pavimento, incluído o seu sistema de drenagem.

Os pavimentos flexíveis representam a maioria dos pavimentos existentes em Portugal. Como já referido, as misturas betuminosas a quente são o material predominante nas suas camadas de desgaste e estruturais, O fabrico de misturas betuminosas a quente é efetuado em centrais, onde os agregados e o ligante betuminoso são previamente aquecidos e posteriormente misturados de modo a resultar nos vários tipos de misturas. O ligante que à temperatura ambiente se encontra quase no estado sólido, necessita ser aquecido não só para o fabrico mas também para o espalhamento e a compactação da mistura.

Este tipo de material tem uma sensibilidade elevada à variação da temperatura, mudando o seu estado para viscoelástico e plástico para temperaturas mais elevadas. Por outro lado, este material sofre um envelhecimento ao longo do tempo sob a ação dos raios ultravioletas. Assim, um incremento da temperatura devido às alterações climáticas pode resultar em:

- dificuldades de compactação do material betuminoso durante a sua colocação em obra;
- amolecimento do mesmo, quando em funcionamento, levando ao aparecimento de rodeiras na camada de misturas betuminosas e perda das características funcionais;
- envelhecimento acelerado do ligante, levando à desagregação de partículas e micro fendilhamento, com propagação de cima para baixo.

Dentre os fenômenos acima apresentados, o segundo poderá promover uma aglutinação das partículas e poluentes particulados ao ligante que, após arrefecimento levará ao encapsulamento destes poluentes rodoviários. Por outro lado, o último processo poderá influenciar negativamente a qualidade das águas de escorrência, devido a um incremento na geração de poluentes, tais como partículas de ligante e agregados. O surgimento de fendas na estrutura do pavimento promove a infiltração da água para as camadas inferiores, de base, em material granular não ligado, o que facilita a lavagem das frações finas deste material, levando a uma degradação acelerada da sua capacidade estrutural.

Atualmente existem estudos que pretendem desenvolver soluções para retardar o envelhecimento da camada de desgaste e a proteção da mesma do aquecimento ambiente decorrente do aumento da temperatura (Emery, 2010). Assim, no Japão encontra-se em estudo uma película protetora do pavimento “heat-sheild coating material”, que permite a redução da temperatura em 15°C, principalmente dedicada à utilização em meios urbanos. No Canadá e na China estuda-se, como solução para baixar a temperatura do pavimento, a aplicação de uma camada de cal hidratada na superfície do mesmo. Contudo, a utilização destes materiais requer o acompanhamento dos poluentes que poderão resultar da sua aplicação nos pavimentos conduzindo a alterações nas características das águas de escorrência.

Relativamente aos pavimentos rígidos, pouco utilizados em Portugal, a temperatura tem uma grande influência no encurvamento dos mesmos devido a diferença de temperatura entre a superfície da camada e a base, sendo que durante o dia as lajes em betão têm uma forma côncava e durante a noite apresentam uma forma convexa (Willway *et al.*, 2008) Qualquer alteração da temperatura máxima poderá levar a microfendilamentos e à degradação estrutural do pavimento. Ao mesmo tempo, o material que garante o isolamento das juntas sofre, à semelhança do ocorrido para o ligante betuminoso, um amolecimento com o aumento da temperatura e o conseqüente envelhecimento. Isso promove a infiltração de água nas camadas subjacentes e lavagem dos finos, levando ao desenvolvimento do fenómeno de bombagem nas juntas e à perda de base de apoio para as lajes em betão.

No que respeita ao aumento de volume dos eventos extremos de precipitação, surgem situações ligadas às condições de drenagem superficial dos pavimentos, que se tornam cruciais. A estagnação de água na superfície do pavimento, não só impede a utilização do mesmo em condições de segurança como promove a infiltração da mesma nas camadas subjacentes e o conseqüente enfraquecimento estrutural.

O possível aumento do nível das águas freáticas poderá alterar o teor em água das camadas não ligadas, que constituem as camadas de base dos pavimentos. Assim, como o módulo de deformabilidade daquelas camadas se reduz substancialmente para teores em água mais elevados, poderá levar a uma significativa perda de capacidade de carga e à ocorrência de deformações, como assentamentos e rodeiras na estrutura dos pavimentos.

4.3 Perspetivando o futuro dos pavimentos rodoviários num cenário de alterações climáticas

As alterações climáticas têm um forte impacto sobre todos os aspetos da circulação rodoviária. Atualmente esta debate-se com a ação dos eventos climáticos extremos, tanto em termos de interrupção da circulação, como dos danos causados à própria infraestrutura. Perante esta situação, as autoridades rodoviárias precisam de ser apoiadas com propostas

de estratégias adequadas para garantir a fiabilidade, a disponibilidade, a manutenção e a segurança das infraestruturas rodoviárias (FEHRL, 2013).

Estas alterações podem manifestar-se através de mudanças graduais dos parâmetros climáticos que, ao contrário das condições meteorológicas extremas, podem passar despercebidos, mas que têm um efeito sobre a durabilidade e o funcionamento das infraestruturas rodoviárias, referindo-se os aumentos constantes da temperatura ambiente e da radiação ultravioleta de exposição, bem como um aumento do nível das águas do mar e mudanças nos níveis das águas subterrâneas.

Na sequência de mudanças climáticas na área geográfica da Europa, são diversos os riscos para os pavimentos, nomeadamente inundações resultantes da precipitação ou de um potencialmente rápido derretimento da neve/gelo em algumas regiões e alguns dos efeitos associados, tais como a interrupção operacional, a redução da disponibilidade e bloqueios de rede, saturação das camadas não ligadas, resultando em perda de material fino, assentamentos e saturação das camadas de fundação conduzindo a uma redução da sua capacidade de suporte.

Por outro lado, verões mais quentes e secos, levando a uma forte redução dos teores em água dos materiais constituintes da estrutura do pavimento, podem levar ao fendilhamento da camada superficial comprometendo deste modo a sua integridade e o seu desempenho funcional e estrutural ao longo prazo. Gradientes térmicos elevados podem ainda promover a ocorrência de tensões internas, dando origem a ondulação ou deformação em pavimentos de betão.

Complementarmente, a redução da vegetação nas zonas envolventes à estrutura do pavimento, devido a temperaturas mais elevadas e secas, e/ou a velocidade do vento mais elevadas contribuem para o incremento da erosão em aterros, levando à sua instabilidade.

Contrariamente, um clima mais ameno, com amplitudes térmicas menores, poderá ter implicações no norte da Europa, onde o solo está congelado durante o inverno, dando deste modo origem a processos de congelamento e descongelamento dos materiais constituintes da estrutura do pavimento para os quais estas não estarão, eventualmente, preparados.

5 NECESSIDADES DE INVESTIGAÇÃO

Mesmo num país relativamente pequeno como Portugal, perspetivam-se cenários distintos para as mudanças climáticas em diferentes regiões do território. É sabido que as condições climáticas, nomeadamente o regime de precipitação e o incremento da temperaturas média do ar condicionam direta e indiretamente a drenagem rodoviária (quantidade e qualidade) e ainda a eficácia dos sistemas de tratamento.

Este artigo debruça-se sobre os principais efeitos das alterações climáticas nos vários tipos de pavimentos e nos impactes diretos e indiretos que estes fenómenos irão causar no que hoje são as características conhecidas das escorrências rodoviárias em Portugal. O Quadro 3 apresenta uma síntese dos aspetos mais relevantes desta reflexão, podendo-se concluir que a maioria dos potenciais impactes resultantes, quer do aumento de temperatura quer do aumento dos fenómenos extremos de precipitação, é de carácter negativo. Colocam-se várias questões. Por exemplo, será que a descarga de sólidos suspensos totais (SST) hoje já reconhecidos como um poluente prioritário em escorrências rodoviárias, irá aumentar? Isso dependerá, entre outros fatores, da acção futura dos operadores rodoviários.

Quadro 3. Principais efeitos das alterações climáticas nos vários pavimentos e impactes diretos e indiretos nas escorrências rodoviárias e no meio hídrico.

| Tipo de pavimento | Aumento da temperatura tem como impactes diretos: | Aumento de eventos de precipitação extremos tem como impactes diretos: |
|-------------------------|--|---|
| Flexível e semi-rígido* | <p>T1- Amolecimento do pavimento em funcionamento pode conduzir a uma incorporação de poluentes acumulados na própria mistura betuminosa ⇒ Redução de poluentes nas escorrências rodoviárias após períodos secos e quentes</p> <p>T2- O envelhecimento acelerados do ligante conduz à desagregação de partículas do pavimento ⇒ Incremento de partículas do pavimento e poluentes associados nas escorrências superficiais</p> | <p>P1- Maior estagnação de água na superfície dos pavimentos ⇒ maior infiltração de água ⇒ redução acelerada da capacidade estrutural ⇒ consequências semelhantes a T2 e T3: Incremento de partículas do pavimento e poluentes associados nas escorrências superficiais</p> <p>P2 – Aumento do nível freático subjacente à estrutura do pavimento ⇒ perda de capacidade de carga e ocorrência de deformações que podem conduzir tanto a incremento de partículas nas escorrências como a maior infiltração de poluentes dissolvidos e contaminação de águas subterrâneas</p> |
| Rígido | <p>T3- Facilmente criam microfendilhamentos e se degradam ⇒ Incremento de partículas do pavimento e poluentes associados nas escorrências superficiais</p> | |

*Tipos mais comuns em Portugal

| | |
|--|---|
| Impactes indiretos do aumento de temperatura e redução da precipitação média anual, em Portugal | Redução da vegetação nas zonas envolventes à estrada conduzirá a maior erosão em aterros. O fenómeno incrementa diretamente o transporte de sólidos mas também conduz à instabilidade da plataforma rodoviária e restante envolvente ⇒ Incremento de partículas e poluentes nas escorrências superficiais |
|--|---|

O Fórum Europeu dos Laboratório Rodoviários (*Forum of European Highway Research Laboratories–FEHRL*) concebeu, em 2009, o *Forever Open Road Programme* (FOR) tendo este, em 2011, sido incluído no Programa Estratégico Rodoviário Europeu (*Strategic European Road Research Programme V-SERRP V*), com vista ao desenvolvimento de uma nova geração de estradas conceptualmente mais avançadas e acessíveis e que podem ser usadas tendo em vista a manutenção da rede existente como a construção de novas estradas (FEHRL, 2013).

Isso permitirá aos operadores rodoviários considerar, no futuro, inovações emergentes e, ao mesmo tempo superar as crescentes restrições à capacidade, sustentabilidade, confiabilidade e integração das infraestruturas rodoviárias. Considera-se que a próxima geração de estradas vai exigir elevados níveis de adaptação, automação e resiliência, sendo

que se pretende que uma estrada resiliente possa manter os seus níveis de serviço perante condições climáticas extremas.

Por outro lado, a investigação direcionada para os problemas de gestão da poluição hídrica terá que atualizar o que se passa em termos dos poluentes rodoviários, tanto a carga anual como as concentrações médias e máximas, o período seco antecedente expectável, etc. Conforme se verificou com o exemplo comparativo das autoestradas A1 e A22, o clima afeta estas variáveis. A par disto, surgirão certamente alterações na composição dos materiais constituintes e no comportamento, ao longo da vida útil, das infraestruturas rodoviárias, além do que se possa vir a alterar nos cenários da indústria automóvel, da utilização de viaturas, etc.

Assim, será essencial que haja uma investigação multidisciplinar na qual se integrem os objetivos de diferentes áreas científicas. Os gestores das infraestruturas rodoviárias procuram garantir a sua integridade, estabilidade, segurança e resiliência, entre outros aspetos, podendo ser estes perfeitamente equacionados também numa perspectiva de controlo da poluição rodoviária e proteção dos solos e recursos hídricos.

Considera-se assim do maior interesse a conceção e o desenvolvimento de estudos em cenários de alterações climáticas, conducentes à minimização dos impactes dos poluentes rodoviários no meio hídrico, a par com o desenvolvimento de novos materiais a aplicar nas camadas dos pavimentos e ainda de novas técnicas construtivas que contribuam para a manutenção das características funcionais e estruturais dos pavimentos.

No que respeita aos materiais, o desenvolvimento de ligantes, betuminosos ou hidráulicos que, perante condições climáticas extremas tenham a capacidade de se adaptarem quer a temperaturas elevadas, quer perante o aumento dos níveis freáticos ou dos volumes das águas de escorrência, com a manutenção da capacidade de suporte e das condições de serviço.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barbosa, A. E., Fernandes, J. N. (2012) *Comparison of the pollutant potential of two Portuguese highways located in different climatic regions*, S. Rauch and G.M. Morrison A. (eds.), *Highway and Urban Environment: Proceedings of the 10th Highway and Urban Environment Symposium*, pp. 263-273, Springer, 2012, 448 pp. ISBN 978-94-007-2539-3.

Barbosa, A. E.; Telhado, A.; Calíço, J.; Fernandes, J. N.; Vieira, J.; Almeida, L. V.; Whitehead, M.; Ramísio, P. J.; Antunes, P. B. and Baguinho R. (2011) *Guidelines for Integrated Road Runoff Pollution Management in Portugal*, Barbosa, A.E. (ed), Europress, 84 pp.

Barbosa, A.E. (1999) *Highway Runoff Pollution and Design of Infiltration Ponds for Pollutant Retention in Semi-Arid Climates*. Ph.D. Thesis, Environmental Engineering Laboratory, Aalborg University, Denmark, ISBN 87-90033-19-1.

Batista, F. (2009) *Reabilitação de pavimentos flexíveis através da reciclagem com cimento*, Dissertação de Mestrado, Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico

Bernucci, L., Motta, L., Cerratii, J.e Soares, J. (2008) *Pavimentação asfáltica. Formação básica para engenheiros*. PETROBRÁS, ABEDA, Rio de Janeiro.

- Costa, A. C.; Santos, J.A. e Pinto, J.G. (2012) Climate change scenarios for precipitation extremes in Portugal. *Theor Appl Climatol* 108:217-234.
- Crabtree, B., Dempsey, P. Moy, F., Brown, C. e Song, M. (2008) *Improved Determination of Pollutants in Highway Runoff – Phase 2. Final Report*. Highways Agency Contract Reference 3/376. Report No. UC7697. August 2008, 74 pp.
- Crabtree, B., Moy, F., Roe, A. e Whitehead, M. (2004) *Long term monitoring of pollutants in highway runoff. In Sustainable Techniques and Strategies in Urban Water Management*, M. Desbordes and B. Chocat (Eds), NOVATECH 2004, June Lyon.
- Croney, D, Croney, P. (1998) *Design and performance of road pavements*. 3rd Edition, McGraw-Hill, ISBN 0-07-014451-6
- Dawson, A. (2007) *Water Movement in Road Pavements and Embankments*, SUMMARY FINAL REPORT of Cost Action 351.
- Driver N.E. e Tasker G.D. (1990) *Techniques for estimation of storm-runoff loads, volumes and selected constituent concentrations in urban watersheds in the United States*. (U.S., Geological Survey water supply paper 2363) 44 pp.
- Emery, J. (2010) - *Climate change impacts on asphalt pavements. Global perspective. Adaptation and opportunities*. World Road Association Congress, Edmondton, 2010.
- FEHRL (2013) *The resilient road. A road map for research. An element of the Forever Open Road*. FEHRL, Brussels. ISBN 9789491749018.
- Gan, H., Zhuo, M., Li, D. and Zhuo, Y. (2008) *Quality characterization and impact assessment of highway runoff in urban and rural area of Guangzhou, China*. *Environ Monit Assess* 140: 147-159.
- <http://snirh.pt/> (Dados climatológicos Nacionais)
- Kayhanian M., Singh A., Suverkropp C. e Borroum S. (2003) *Impact of annual average daily traffic on highway runoff pollutant concentrations*. *J Environ Eng* 129:11, 975-990.
- LNEC E1 (1962) *Vocabulário de estradas e aeródromos*., Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa.
- Moy F., Crabtree R. e Simms T. (2003) *Long term Monitoring of Pollution from Highway Runoff*. Environment Agency R&D Report No. P2-038. 2003.
- Santos, F.D., Forbes, K. e Moita, R. (2002) *Climate Change in Portugal. Scenarios, impacts and adaptation measures*. SIAM Project. , Gradiva, Lisboa, 454 pp.
- Vieira, R., Fernandes, J. N., Barbosa, A. E. (2013) *Evaluation of the impacts of road runoff in a Mediterranean reservoir in Portugal*, *Environ Monit Assess* 185: 7659-7673.
- Willway, T Baldachin, L, Reeves, S., Harding, M., McHale, M e Nunn, M (2008) *The effects of climate change on highway pavements and how to minimise them*. Published Project Report PR 184 TRL. Reino Unido.