

ARTIGO REF: 6898

UTILIZAÇÃO DA BASE DE DADOS DO PROGRAMA LTPP NA ANÁLISE DE FATORES QUE INFLUENCIAM O DESEMPENHO DE PAVIMENTOS

Dinis Gardete^{1(*)}, Luís Picado-Santos², Silvino Capitão³

¹Instituto Politécnico de Castelo Branco, Ceris-Cesur, UTC Eng.^a Civil, Castelo Branco, Portugal

²Ceris-Cesur, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, IST, Lisboa, Portugal

³IPC, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Ceris-Cesur, Lisboa, Portugal

(*)*Email*: dgardete@ipcb.pt

RESUMO

A recolha de informação em pavimentos em serviço permite obter informação valiosa e que não pode ser obtida utilizando outro tipo de procedimentos. O programa Long-Term Pavement Performance (LTPP) é o maior programa deste tipo e permite aceder a uma quantidade muito significativa de informação. Fez-se neste trabalho uma análise prospetiva da base de dados do Programa LTPP, nomeadamente do estudo SPS-9, avaliando a informação existente com o objetivo de detetar fatores que influenciam o desempenho de pavimentos, nomeadamente, a metodologia de formulação de misturas betuminosas. Com a informação existente selecionaram-se variáveis significativas modelando a evolução de diversas patologias utilizando modelos multilineares. A análise estatística não permitiu concluir assertivamente sobre como os diferentes fatores impactaram no desempenho global do pavimento, realçando que quando em serviço a quantidade e a qualidade da informação e o conjunto de fatores e suas possíveis interações apresentam uma complexidade que torna difícil a sua modelação.

INTRODUÇÃO

A análise do desempenho de pavimentos em serviço é fundamental para validar as metodologias, técnicas ou materiais utilizados na pavimentação rodoviária. Apesar da evolução dos ensaios laboratoriais, da disseminação de estruturas de ensaio à escala real e das técnicas numéricas, a observação do comportamento em serviço é importante, pois representa as condições reais de utilização nas suas diversas dimensões. Contudo, os recursos necessários para realizar este tipo de estudo são muito consideráveis. Apesar de existir um crescente número destes programas o programa LTPP é o mais antigo, tendo-se iniciado em 1987, e o que maior quantidade de informação disponibiliza (FHWA, 2014). O Programa LTPP monitoriza secções de pavimentos reais, recolhendo informação sobre essas mesmas secções durante períodos superiores a 10 anos. A informação recolhida tem a vantagem de permitir avaliar os pavimentos em situações reais de serviço apresentando um valor inerente muito elevado. A base de dados do programa LTPP é disponibilizada em DVD. Para simplificar a procura e a utilização dos dados, o LTPP facilita o acesso online à informação simplificada no sítio <http://www.infopave.com>.

Inserido num estudo mais alargado sobre como os parâmetros relacionados com as propriedades das misturas betuminosas influenciavam o desempenho de pavimentos em serviço realizou-se uma análise com base na informação contida no Programa LTPP. O objetivo centrava-se em compreender de que modo a metodologia de formulação de misturas

betuminosas pode influenciar o desempenho do pavimento. Nos Estados Unidos da América (EUA) existiu uma alteração nas metodologias de formulação na transição para a metodologia SUPERPAVE. Após uma análise dos estudos realizados pelo LTPP foi selecionado o estudo SPS-9 pois este procurou avaliar a introdução da metodologia SUPERPAVE, a qual inclui a formulação volumétrica de misturas betuminosas, em comparação com as metodologias de formulação tradicional utilizadas anteriormente (Hveem e Marshall). O estudo SPS-9 foi designado “*Validation of SHRP Asphalt Specifications and Mix Design*”.

Para o estudo, os Departamentos Estaduais de Transportes (DOT) tinham que construir em cada localização pelo menos três secções de teste. As exigências iniciais indicavam a construção de uma secção correspondente à metodologia tradicionalmente utilizada, uma correspondente à formulação SUPERPAVE de nível 1 e uma secção correspondente à formulação SUPERPAVE de nível 1 mas com um betume com classe *Performance Grade* (PG) um nível acima ou abaixo. Alguns parâmetros da metodologia SUPERPAVE têm vindo a ser modificados de modo a melhorar os resultados obtidos na formulação. A formulação SUPERPAVE utilizada no estudo SPS-9 teve como base as orientações existentes no momento de construção das secções de estudo.

O estudo SPS-9 considerou ainda diversas possibilidades de utilização de misturas, nomeadamente em aplicação de reforço sobre pavimento rígido contínuo, SPS-9C, pavimento rígido com juntas, SPS-9J, reconstrução ou pavimento novo, SPS-9N, e aplicação como reforço em pavimentos flexíveis existentes, SPS-9O. Consideraram-se na análise realizada as secções pertencentes ao SPS-9N uma vez que era o estudo em que o número de variáveis explicativas poderia ser mais reduzido. Uma das condições impostas a estas secções era que tinham que ser construídas em locais com um número de eixos de 80 kN igual ou superior a 50 000 por ano.

As localizações e correspondentes secções de teste do estudo SPS-9N incluídas nesta análise foram:

- Kansas: 20-0901; 20-0902; 20-0903;
- Arizona: 04-0902, 04-0903, 04-A901, 04-A902 e 04-A903;
- Carolina do Norte: 37-0901, 37-0902 e 37-0903;
- Texas: 48-0901 e 48-0902 e 48-0903;
- Wisconsin: 55-C901, 55-C902, 55-C903, 55-C959 e 55-C960;
- Montana: 30-0901, 30-0902 e 30-0903;
- Alberta: 81-A901, 81-A902 e 81-A903;
- Ontário: 87-0901, 87-0902, 87-0903, 87-0960, 87-0961 e 87-0962;
- Québec: 89-0901, 89-0902, 89-0903, 89-A901, 89-A902 e 89-A903;
- Saskatchewan: 90-0901, 90-0902, 90-0903, 90-0959, 90-0960, 90-0961 e 90-0962.

A localização das secções apresenta-se na Figura 1.

CARACTERIZAÇÃO DO DESEMPENHO DAS SECÇÕES

A base de dados fornece um conjunto muito significativo de informação que se encontra agrupada nas categorias estrutura de pavimento, construção, caracterização de materiais, monitorização do pavimento (inclui o levantamento de patologias), o tráfego e clima (FHWA, 1999). Observou-se que a base de dados continha omissões na informação relacionada com as condições iniciais significativas, nomeadamente relacionadas com a caracterização de materiais e formulação das misturas betuminosas, como sejam lacunas em elementos chave como o VMA (Vazios no Esqueleto do Agregado), percentagem em betume e energia de compactação de formulação, que tornaram impossível a introdução destes elementos na

análise realizada. Optou-se por realizar a análise comparando o desempenho de secções situadas na mesma localização de modo a simplificar o número de variáveis, nomeadamente, as variáveis climáticas.

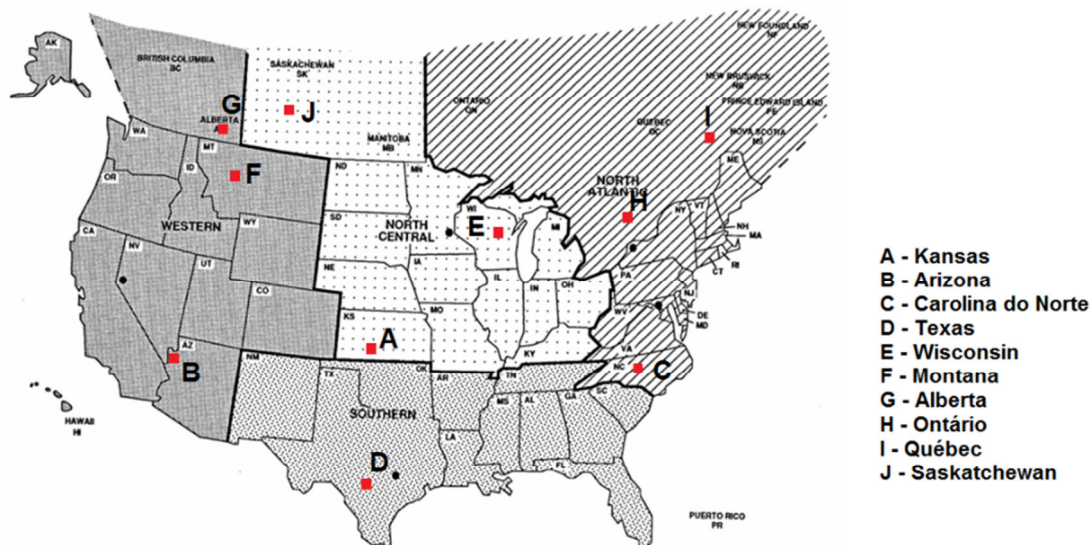


Fig. 1 - Localização das secções do estudo SPS-9N analisadas.

O desempenho do pavimento foi traduzido através da evolução das patologias observadas, nomeadamente, fendilhamento, cavado de rodeiras, irregularidade longitudinal e degradações superficiais. A observação das patologias é realizada de modo desagregado, por exemplo, no fendilhamento é avaliado o fendilhamento longitudinal nas rodeiras, fora das rodeiras, fendilhamento transversal, pele de crocodilo e fendilhamento em blocos. Estes valores são ainda divididos de acordo com o grau de severidade. Após uma análise às patologias observadas nas secções analisadas optou-se por agrupar os valores de algumas patologias relacionadas criando índices agregados para estas patologias. Deste modo, o fendilhamento e as patologias superficiais foram consideradas de modo aglomerado, expressão (1) e (2). Para o IRI (*International Roughness Index*) e o cavado de rodeiras foram considerados os valores medidos. Observou-se existir um número reduzido de secções em que foram observadas degradações superficiais.

Um exemplo da evolução dos valores das patologias no pavimento é apresentado na Figura 2, neste caso para a localização Saskatchewan.

$$I_{fend} = PC + 0,5 * (FLR + FLNR) \quad (1)$$

Em que:

I_{fend} - Índice representativo do fendilhamento;

PC - Área ocupada por pele de crocodilo [m^2];

FLR - Fendilhamento longitudinal na zona das rodeiras;

$FLNR$ - Fendilhamento longitudinal fora da zona das rodeiras.

$$I_{deg\sup} = AC + ADF + AD \quad (2)$$

Em que:

$I_{deg\ sup}$ - Índice representativo das degradações superficiais;

AC - Área afetada por covas [m^2];

ADF - Área afetada por deformações superficiais [m^2];

AD - Área afetada por desagregações superficiais [m^2].

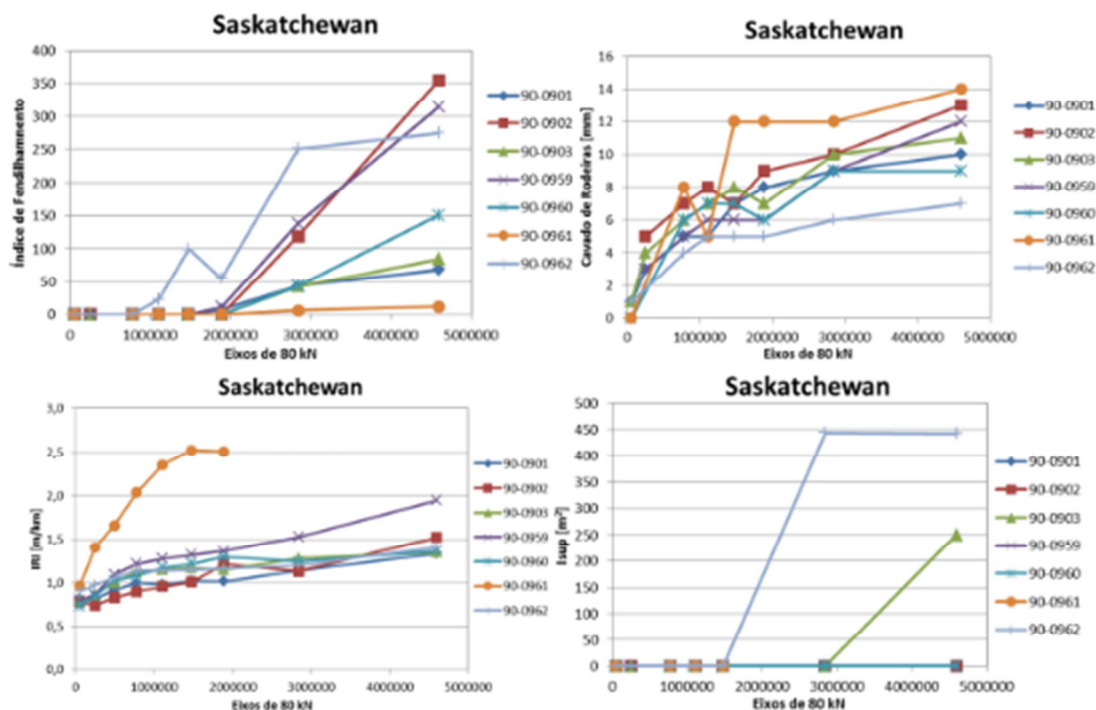


Fig. 2 - Evolução do cavado de rodéiras para as secções situadas em Saskatchewan.

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA METODOLOGIA DE FORMULAÇÃO - ANÁLISE ISOLADA

Para se poder avaliar como foi significativa a influência da alteração da metodologia de formulação, analisou-se como as patologias evoluíram para as secções em que se utilizaram metodologias tradicionais e a metodologia SUPERPAVE para cada localização. Esta evolução encontra-se representada nas figuras 3, 4, 5, 6. Representa-se a taxa de evolução das degradações com o tráfego. Nas figuras é referida a zona climática em que as secções se encontram, conforme definidas pelo LTPP, sendo estas a húmida não-fria (H NF), seca não-fria (S NF), húmida fria (H F) e seca fria (S F) (Jackson e Puccinelli, 2006).

Observa-se que não se encontra nenhuma tendência evidente. Contudo, a evolução do fendilhamento e do IRI apresenta valores superiores nas secções com metodologia SUPERPAVE. Nas degradações superficiais, embora existam registos em poucas secções, estas foram observadas com maior frequência em secções SUPERPAVE. Deste modo, numa análise simples aos dados recolhidos, a transição para a metodologia de formulação SUPERPAVE não aparentou trazer benefícios. Contudo esta é uma abordagem simples

permitindo apenas identificar tendências que se apresentem evidentes. Como o desempenho nos pavimentos depende de inúmeros fatores realizou-se uma análise por regressão multilinear para poder identificar, com uma análise mais complexa, a influência da variável metodologia de formulação.

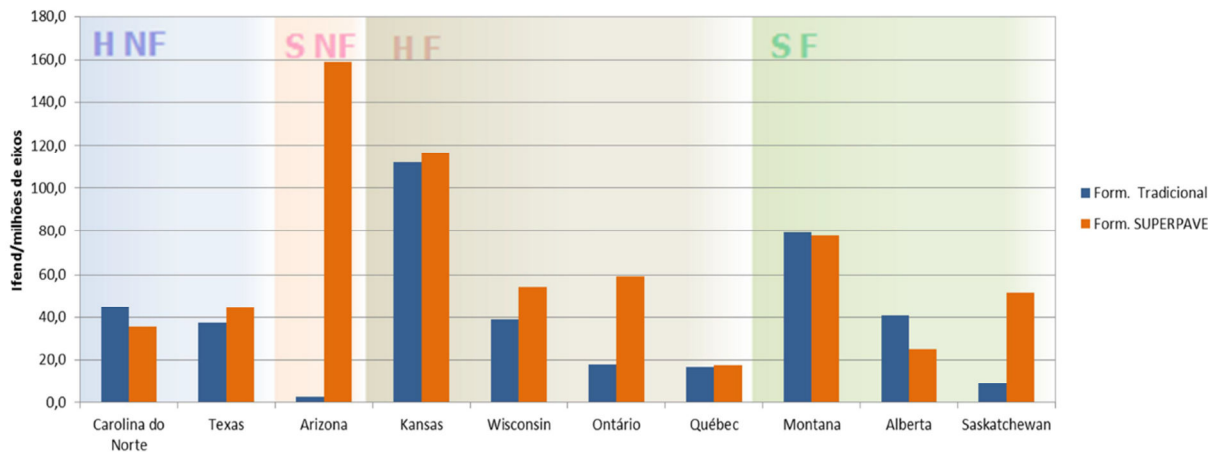


Fig. 3 -. Evolução do fendilhamento em função da metodologia de formulação.

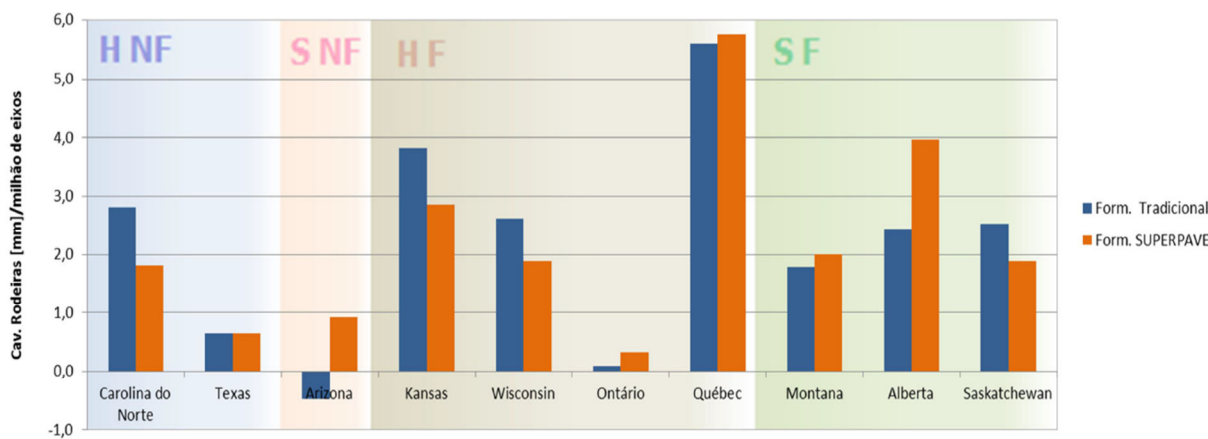


Fig. 4 - Evolução dos cavados de rodeira em função da metodologia de formulação.

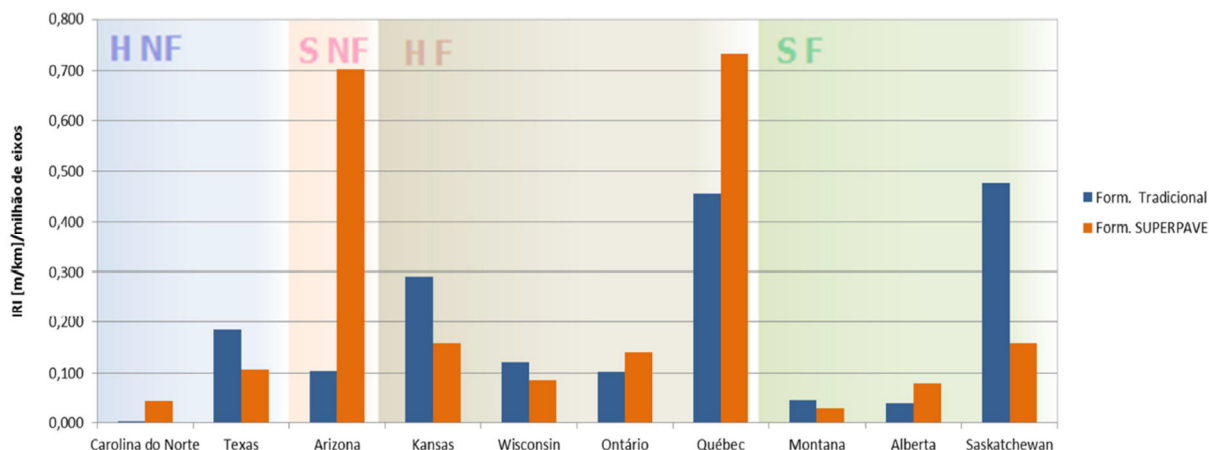


Fig. 5 - Evolução do IRI em função da metodologia de formulação.

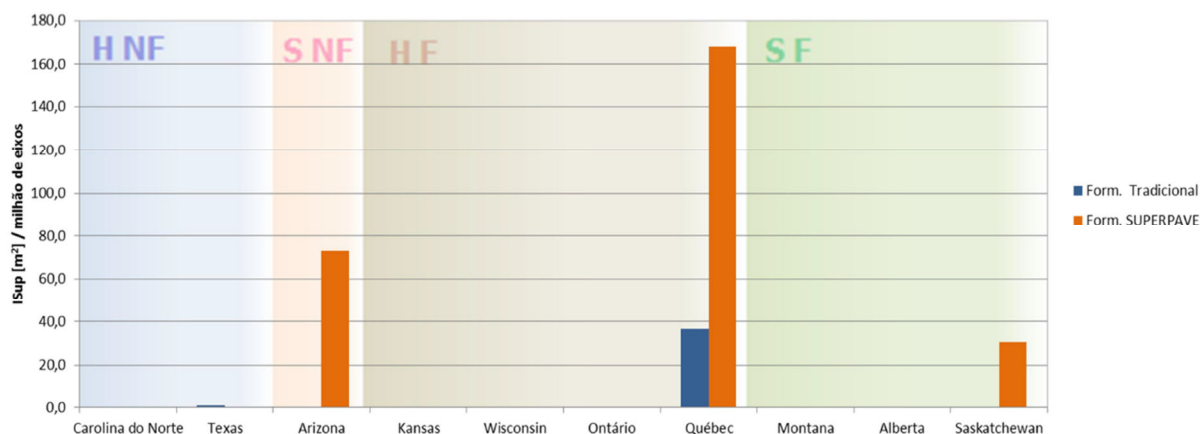


Fig. 6 - Evolução das degradações superficiais em função da metodologia de formulação.

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA METODOLOGIA DE FORMULAÇÃO - REGRESSÃO MULTILINEAR

Modelo utilizado

Realizou-se uma regressão multilinear procurando introduzir um conjunto de variáveis explicativas (Azevedo, 2013; Saghafi *et al.*, 2009). Com a informação existente, e que se revelou mais completa, selecionou-se um conjunto de variáveis que poderiam explicar o desempenho do pavimento, nomeadamente, a deflexão do pavimento, número acumulado de eixos padrão, metodologia de formulação, viscosidade do betume e espessura das camadas betuminosas, expressão (3). As variáveis deflexão do pavimento, número acumulado de eixos padrão e espessura das camadas betuminosas foram introduzidas utilizando os valores observados. A variável metodologia de formulação foi considerada como uma variável *dummy*. Devido a não existir correspondência unívoca entre as diferentes classificações de betumes encontradas na base de dados foi utilizada uma variável que correspondeu a uma classificação do betume de 1 a 6 procurando traduzir a sua viscosidade (correspondendo 1 a betumes mais moles e 6 a betumes mais duros).

$$I_{Patologia} = A \cdot Deflex + B \cdot N_{80} + C \cdot Metform + D \cdot Tipobet + E \cdot Espbet + F \quad (3)$$

Em que:

$I_{Patologia}$ - Índice da patologia que se pretende modelar;

$Deflex$ - Deflexão estimada [μm ou mm dependendo do Índice];

N_{80} - Número acumulado de eixos de 80 kN [milhões de eixos de 80 kN];

$Metform$ - Metodologia de formulação [0 - tradicional, 1 - SUPERPAVE];

$Tipobet$ - Tipo de betume [1-6]

$Espbet$ - Espessura das camadas betuminosas [mm];

A, B, C, D, E e F - Constantes do modelo de ajuste multilinear.

A análise realizada neste trabalho incidiu numa abordagem de eliminação para trás (*backward elimination*). Este processo pode ser resumido nas seguintes etapas:

- Iniciar o ajuste com todas as variáveis dependentes no modelo;
- Remover a variável com o valor de p mais elevado (se maior que o valor de referência α_{crit} , considerado com 0,05);
- Realizar novo ajuste e voltar ao passo anterior;
- Parar quando os valores de p forem todos inferiores a α_{crit} .

Os valores dos ajustes obtidos foram em geral aceitáveis. Estes foram avaliados utilizando o coeficiente R^2 , análise ANOVA e análise dos resíduos. O facto de existirem alguns valores incoerentes na evolução das patologias (ex. diminuição destas com o tempo) prejudicou alguns dos ajustes. Para exemplificar os ajustes realizados apresentam-se na Tabela 1 os valores obtidos para a localização Saskatchewan.

Como referido a omissão ou existência de informação incoerente restringiu o número de variáveis que se puderam introduzir na análise e dificultou igualmente a modelação. Na análise da informação observaram-se valores incongruentes na observação das patologias, o que dificultou o tratamento da informação e qualidade dos ajustes. Estas omissões são um dos problemas subjacentes quando se utilizam bases de dados de programas de monitorização ou gestão de pavimentos (Farhan e Fwa, 2015).

Tabela 1 - Ajustes obtidos para a localização Saskatchewan.

Patologia	Parâmetros	Unidade	Coefficiente	Parâmetros estatísticos
Fendilhamento lfend	N. Eixos 80	Milhões de eixos	41,86	$R^2=0,55$ $R^2_{ajust}=0,53$ ANOVA $p=2,00E-9$
	Met. Formulação	0 ou 1	43,21	
	Tipo de betume	Quadro	SS	
	Deflexão	μm	SS	
	Esp. Camadas bet.	mm	SS	
	Constante		-62,56	
Rodeiras	N. Eixos 80	Milhões de eixos	SS	$R^2=0,74$ $R^2_{ajust}=0,72$ ANOVA $p=1,18E-13$
	Met. Formulação	0 ou 1	-5,06	
	Tipo de betume	Quadro	1,25	
	Deflexão	mm	31,03	
	Esp. Camadas bet.	mm	SS	
	Constante		-7,74	
IRI	N. Eixos 80	Milhões de eixos	SS	$R^2=0,65$ $R^2_{ajust}=0,63$ ANOVA $p=4,40E-13$
	Met. Formulação	0 ou 1	-530,91	
	Tipo de betume	Quadro	SS	
	Deflexão	mm	2542,36	
	Esp. Camadas bet.	mm	27,90	
	Constante		-3094,09	
Degradações Superficiais	N. Eixos 80	Milhões de eixos	77,74	$R^2=0,41$ $R^2_{ajust}=0,35$ ANOVA $p=2,63E-4$
	Met. Formulação	0 ou 1	151,68	
	Tipo de betume	Quadro	-53,59	
	Deflexão	mm	-962,83	
	Esp. Camadas bet.	mm	SS	
	Constante		379,02	

SS – variável não significativa

Análise da influência da metodologia de formulação

Era objetivo do trabalho avaliar de que modo a variável metodologia de formulação, particularmente, a passagem de metodologias tradicionais de formulação, Hveem e Marshall para a metodologia de formulação SUPERPAVE, beneficiou o desempenho dos pavimentos. Assim, com base nos ajustes obtidos para as diferentes localizações foi analisado o coeficiente associado à variável metodologia de formulação (coeficiente C da expressão (3)), tendo a introdução da metodologia SUPERPAVE sido benéfica quando o coeficiente apresentou valor negativo. Esta informação apresenta-se na Tabela 2.

Refira-se que na seleção das variáveis significativas, *backward elimination*, existiram modelos em que a variável metodologia de formulação não foi considerada significativa pelo que foi retirada dos modelos. É possível observar que a influência particular de uma variável no desempenho dos pavimentos é difícil de avaliar, existindo uma maioria de localizações em que aquela variável foi considerada não significativa nos modelos quando comparada com a influência observada para outras variáveis consideradas. Para as localizações em que esta variável foi considerada significativa a contribuição da metodologia SUPERPAVE aparenta ter sido positiva conduzindo a menores valores de IRI. Para as outras degradações o número de secções em que a variável foi significativa foi relativamente baixo e com tendências variáveis.

Tabela 2. Influência da variável metodologia de formulação na evolução das patologias para as diferentes localizações.

Localização	Contribuição da metodologia SUPERPAVE			
	Fendilhamento	Cavado de rodeiras	IRI	Degradações Superficiais
Kansas	0	0	0	/
Arizona	0	-	-	0
Carolina do Norte	0	0	-	/
Texas	0	0	+	/
Wisconsin	+	0	0	/
Montana	0	0	+	/
Alberta	+	-	0	/
Ontário	0	0	+	/
Quebec	0	0	0	0
Saskatchewan	-	+	+	-
+ : Contribuição positiva - : Contribuição negativa 0 : Sem contribuição significativa / : Sem registo de patologias ou patologias insuficientes.				

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos não permitiram inferir tendências globais evidentes da importância destas variáveis no desempenho dos pavimentos quando em serviço. O número de variáveis envolvido, o modo como estas podem condicionar determinada vertente do desempenho dos materiais ou do pavimento, as dificuldades decorrentes das omissões e incongruências na informação, a forma como algumas variáveis podem interagir em condições de serviço, incrementa a possibilidade em não obter tendências claras, nomeadamente para cada variável em particular e como ela pode, numa determinada aplicação, influenciar o desempenho do pavimento. O recurso a metodologias de tratamento de dados destinadas a detetar padrões de comportamento em conjunto grandes e de grande variabilidade (“data mining”, por exemplo) pode revelar-se mais adequada para este tipo de avaliações.

Neste trabalho realizou-se uma análise simples mostrando a evolução das patologias em função da metodologia de formulação e realizando uma análise por regressão multilinear. As conclusões aparentes de cada abordagem não foram coincidentes mostrando a complexidade envolvida nestas análises e a necessidade de avaliar os procedimentos utilizados. Contudo, refira-se que a metodologia de formulação pode ser uma variável que acrescenta alguma dificuldade na análise pois uma metodologia pode estar mais adaptada a umas condições particulares (de tráfego, clima, tipo de mistura) enquanto outra a outro tipo de condições. Deste modo, a análise multilinear não forneceu tendências evidentes, excetuando o parâmetro IRI em que a metodologia SUPERPAVE aparentou ter permitido conduzir a menores valores deste parâmetro.

Embora a base de dados do LTPP seja muito útil, dispondo de um grande conjunto de informação, observam-se lacunas e incongruências nesta que dificultam estas análises. Neste caso estas lacunas foram evidentes. Contudo, deve ser referido que as secções incluídas no estudo foram construídas entre 1993 e 1998 tendo as metodologias de recolha de informação e

a qualidade desta sido melhoradas progressivamente. Importa referir que a metodologia SUPERPAVE foi sendo modificada e sofrendo alterações desde a sua introdução de modo a melhorar os seus resultados, deste modo, esta análise deve ser entendida dentro dos pressupostos temporais em que a informação foi recolhida.

REFERÊNCIAS

[1]-Azevedo, J., Avaliação do Desempenho a Longo Prazo de Pavimentos Flexíveis: Exploração da Base de Dados LTPP Americana, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, 2013.

[2]-Farhan, J., Fwa, T., Managing missing pavement performance data in pavement management system. Paper presented at the 9th International Conference on Managing Pavement Assets, 2015.

[3]-FHWA, LTPP 2014 and Beyond What is Needed and What Can Be Done?, Federal Highway Administration, 2014.

[4]-FHWA, Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program, Report No. FHWA-RD-03-031, Federal Highway Administration, 2003.

[5]-FHWA, Introduction to LTPP data, Federal Highway Administration, 1999.

[6]-Jackson, N., Puccinelli, J., Long-Term Pavement Performance (LTPP) Data Analysis Support:

[7]-National Pooled Fund Study TPF-5(013): Effects of Multiple Freeze Cycles and Deep Frost Penetration on Pavement Performance and Cost, Report FHWA-HRT-06-121, Federal Highway Administration, 2006.

[8]-Saghafi, B., Hassani, A., Noori R., Bustos, M., Artificial neural networks and regression analysis for predicting faulting in jointed concrete pavements considering base condition. Int. J. Pavement Res. Technol., 2: 20-25, 2009.