



IMPACTO DO AUMENTO DAS TEMPERATURAS NA REGIÃO DA BEIRA INTERIOR NO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Dinis Gardete¹, Rosa Luzia ², Silvino Capitão³, Luís Picado-Santos⁴

¹ Instituto Politécnico de Castelo Branco, Castelo Branco, Portugal, dgardete@ipcb.pt

² Instituto Politécnico de Castelo Branco, Castelo Branco, Portugal, rluzia@ipcb.pt

³ Instituto Politécnico de Coimbra, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, SusCita & CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal capitao@isec.pt

⁴ CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, luispicadosantos@tecnico.ulisboa.pt

Resumo

Uma das consequências esperadas das alterações climáticas em Portugal é o aumento das temperaturas durante os meses mais quentes. Este aumento das temperaturas terá consequências muito significativas no dimensionamento, no desempenho e na manutenção dos pavimentos rodoviários flexíveis durante a sua vida útil. Neste trabalho foram recolhidos dados sobre as temperaturas estimadas até ao final do século para duas localidades na região da Beira Interior em Portugal. As temperaturas estimadas baseiam-se em modelos globais e regionais do clima e consideram duas trajetórias de concentração de gases de efeito estufa (*Representative Concentration Pathways*), RCP4.5 e RCP8.5. Utilizando o método da Shell foi determinada, para cada cenário, a influência do aumento das temperaturas na temperatura ponderada do ar, na temperatura de serviço utilizada para dimensionamento, no módulo de deformabilidade das misturas betuminosas e na vida útil de estruturas típicas de pavimentos flexíveis. Os resultados obtidos indicam que mesmo para o cenário RCP4.5 o aumento estimado das temperaturas até ao final do século terá efeitos relevantes na redução dos módulos de deformabilidade das misturas betuminosas e da vida útil dos pavimentos flexíveis. Para o cenário RCP8.5 os efeitos são mais graves, estimando-se que a manutenção da capacidade de suporte dos pavimentos em idênticas condições pode implicar um aumento de 20% a 25% na espessura das misturas betuminosas.

Palavras-Chave:

Alterações climáticas, pavimentos flexíveis, misturas betuminosas, método da Shell.

1 Introdução

As alterações climáticas representam um desafio no dimensionamento, construção e manutenção dos sistemas de transporte. As alterações climáticas podem ter consequências diversas nos pavimentos flexíveis e seus materiais constituintes. Entre os diversos fatores relacionados com alterações climáticas com potencial para impactar na manutenção dos pavimentos está o aumento das temperaturas mais elevadas [1, 2]. Isto pode resultar num mais rápido envelhecimento do betume conduzindo a uma maior propensão para o fendilhamento das camadas betuminosas, e/ou à redução da rigidez do betume, conduzindo a menor resistência à deformação permanente. A temperatura é o fator ambiental mais importante no desempenho dos pavimentos flexíveis, exercendo uma influência considerável na sua durabilidade e nos fenómenos que conduzem ao aparecimento de patologias, e é um dos elementos críticos no seu dimensionamento [3]. As consequências para a durabilidade dos pavimentos e sua manutenção serão significativas, e a adaptação a estas alterações requer o desenvolvimento e utilização de novos materiais e métodos de construção [2, 4, 5]. A consideração das alterações climáticas e dos seus impactos nas infraestruturas pressupõe igualmente uma mudança de paradigma, pois o clima era normalmente considerado estático e os efeitos das alterações climáticas em geral ignorados [2].

O aumento das temperaturas é mais acentuado para cenários de emissões mais elevadas, indicando a importância da componente humana nas projeções climáticas. Deste modo, num cenário otimista de forte mitigação das emissões, RCP2.6 (*Representative Concentration Pathways*), é esperado um aumento da temperatura média em Portugal de 1 a 2°C até ao final do século XXI em comparação com a referência histórica, enquanto para um cenário sem mitigação, RCP8.5, o aumento pode atingir 6°C [6]. As projeções indicam que sem estratégias de mitigação a subida das temperaturas até 2100 estará entre 2,5°C e 7,8°C [7]. Em Portugal e na bacia mediterrânica observa-se um aumento da temperatura média com maior incidência nos meses de verão, esperando-se que essa tendência continue no sec. XXI [8].

Temperaturas mais elevadas reduzem a viscosidade do betume. Esta menor viscosidade facilita o aparecimento de patologias como as rodeiras de pequeno raio ou a exsudação do betume, reduzindo também a rigidez das misturas betuminosas [9, 10]. O efeito da temperatura na rigidez das misturas betuminosas é significativo, variando por um fator de 3 por cada 10°C [11]. Assim, diversos estudos referem alguns efeitos decorrentes da subida de temperaturas na diminuição da vida útil dos pavimentos, referindo uma redução de 17,5% para um incremento de 3°C, e indicando a necessidade de adaptar a construção de pavimentos, por exemplo, através da seleção das classes de betume utilizadas [5, 12]. Kumlai et al. referem que o impacto da subida de temperaturas pode conduzir a uma redução de 4 anos na vida útil dos pavimentos para as condições australianas [13].

2 Modelos climáticos e temperaturas previstas

2.1 Modelos climáticos e cenários de emissões de Gases com Efeito de Estufa

Os modelos globais de clima (GCMs) são baseados nos princípios físicos gerais da dinâmica dos fluidos e da termodinâmica e têm origem na previsão numérica de tempo. Os GCMs descrevem as interações entre os componentes do sistema climático global: a atmosfera, os oceanos e uma descrição básica da superfície da Terra (ou seja, aspetos da biosfera e litosfera, relevantes para a superfície e equilíbrio energético) [14]. Os modelos climáticos regionais (RCM) são modelos numéricos de previsão do clima para uma região e são habitualmente determinados a partir de GCMs. Os modelos climáticos regionais têm maior resolução numa área limitada, utilizando os GCM para definição das condições iniciais, condições-fronteira variáveis no tempo e condições-fronteira na superfície [14].

A elaboração de projeções climáticas pressupõe a utilização de cenários de emissões de GEE (Gases com Efeito de Estufa) como dados de entrada (inputs) nos modelos climáticos, designados por *Representative Concentration Pathways* (RCP), Figura 1 [7]. Estes cenários representam

possíveis evoluções socioeconómicas e respetivas emissões de GEE. A partir de uma concentração de CO₂ que ronda as 400 ppm dois RCP foram utilizados nas projeções [15]:

- RCP4.5: uma trajetória de aumento da concentração de CO₂ atmosférico até 520 ppm em 2070, aumentando de forma mais lenta até ao final do século;
- RCP8.5: uma trajetória de crescimento semelhante ao RCP4.5 até meio do século, seguida de um aumento rápido e acentuado, atingindo uma concentração de CO₂ de 950 ppm no final do século.

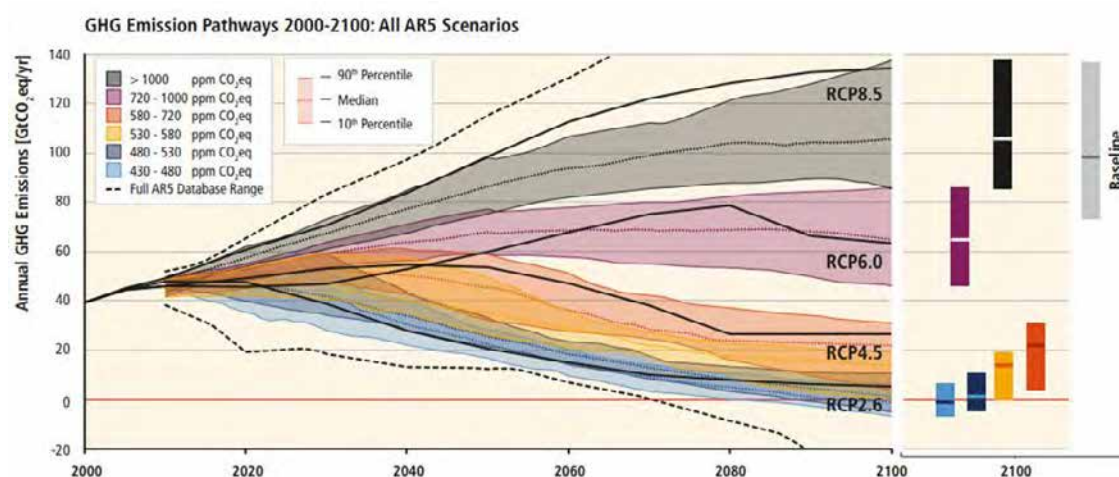


Figura 1. Trajetória das emissões de GEE para diversos cenários, retirado de [7]

Os dados simulados a partir dos modelos climáticos são geralmente representados recorrendo a grelhas com uma resolução espacial associada à capacidade de cada modelo para representar adequadamente os vários fenómenos atmosféricos e as massas terrestres e oceânicas. Estas simulações encontram-se disponíveis na internet e têm servido de base a estudos sobre o impacto das alterações climáticas em diversos setores [14, 15, 16].

Dos dados disponibilizados neste trabalho, optou-se por utilizar os correspondentes ao Ensemble [14]. O Ensemble agrupa a informação proveniente de projeções realizadas com diferentes modelos climáticos, tanto o GGM como o RCM. A utilização de ensembles permite lidar com algumas das incertezas associadas aos modelos climáticos, como sejam, as incertezas relativas aos cenários futuros, variabilidade natural e incerteza associada ao modelo [6]. Assim, para a opção Ensemble foram recolhidos os valores da temperatura média mensal para os dois cenários de emissões, RCP4.5 e RCP8.5, e para os períodos disponíveis: 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100 [14].

Os dados podem ser obtidos no Portal do Clima em diferentes formatos [14]. Para este trabalho optou-se por utilizar a informação em matriz (raster) com formato NetCDF (*Network Common Data Form*). Com base nos mapas, foram obtidos os valores das temperaturas mensais utilizando as ferramentas disponibilizadas pelo software QGIS.

2.2 Temperaturas médias mensais na Beira Interior

A Beira Interior é formada pelos distritos da Guarda e Castelo Branco (Figura 2). Recolheram-se valores de temperatura para estas duas localizações, pois representam a amplitude do clima que se encontra na Beira Interior, com o clima em Castelo Branco a ser mais quente com temperaturas elevadas e na Guarda mais frio com uma forte influência da sua altitude. Foram recolhidos os valores observados e estimados com o Ensemble para o período histórico 1971-2000 e as estimativas do modelo Ensemble para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 para os períodos 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100 (Tabela 1). Comparando as temperaturas para o período 1971-2000, valores observados e estimados pelo Ensemble (séries 1971-2000 Obs e 1971-2000 En), observa-se que as temperaturas estimadas no Ensemble são inferiores às observadas, principalmente para a localização de Castelo Branco. Isto indica que as projeções do Ensemble subestimam os

valores para este período e o mesmo pode ocorrer para as temperaturas estimadas em cenários futuros. Observa-se uma tendência de subida das temperaturas ao longo do século XXI com especial incidência nos meses mais quentes. Para o cenário RCP4.5 o aumento será de 1 a 2°C, enquanto para o cenário RCP8.5 o aumento chegará quase a 5°C (comparando com as temperaturas observadas em 1971-2000). A magnitude da subida de temperatura decorrente de um cenário de maior incremento das emissões é muito considerável.

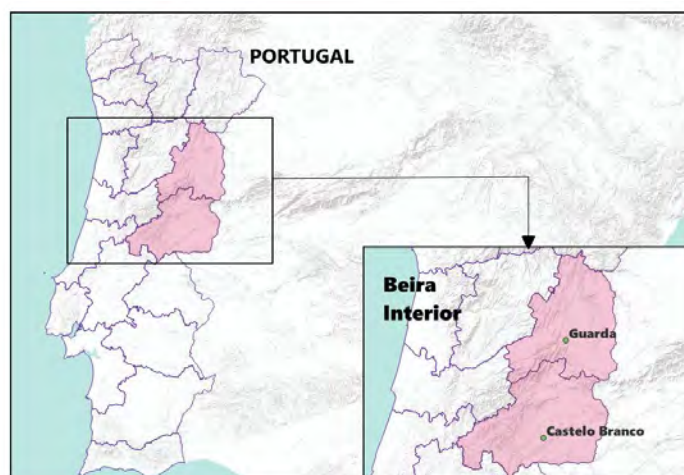


Figura 2. Localização da Beira Interior

Tabela 1. Temperaturas médias mensais para Castelo Branco e Guarda

Loc.	Série	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Castelo Branco	1971-2000 Obs	8,3	9,8	12,2	13,5	16,6	21,2	24,8	24,6	21,9	16,8	12,1	9,3
	1971-2000 En	7,0	7,8	9,7	11,6	14,7	19,2	23,8	24,1	20,1	14,6	10,2	7,5
	2011-2040 4.5 En	7,4	8,5	10,2	12,4	15,4	20,2	24,7	25,5	21,4	15,7	11,2	8,4
	2041-2070 4.5 En	8,1	8,7	10,3	12,8	16,6	21,5	25,9	26,3	22,5	16,5	11,8	8,8
	2071-2100 4.5 En	8,2	9,1	10,8	13,2	16,5	21,5	26,6	26,8	22,9	17,1	12,1	9,1
	2011-2040 8.5 En	7,7	8,4	10,2	12,5	15,6	20,8	25,1	25,4	21,8	16,1	11,2	8,4
	2041-2070 8.5 En	8,4	8,4	11,0	13,5	17,0	22,2	26,9	27,1	23,4	17,4	12,3	9,3
	2071-2100 8.5 En	9,5	10,3	12,2	15,0	18,8	24,6	29,2	29,4	25,4	19,1	13,8	10,7
Guarda	1971-2000 Obs	4,3	5,6	7,6	8,5	12,1	16,4	19,6	19,8	16,9	11,8	7,9	5,3
	1971-2000 En	4,1	4,6	6,2	7,9	10,6	14,7	19,0	19,3	15,6	10,8	7,0	4,6
	2011-2040 4.5 En	4,5	5,3	6,7	8,6	11,4	15,7	20,0	20,7	16,9	11,8	7,9	5,5
	2041-2070 4.5 En	5,2	5,4	6,8	9,0	12,4	16,9	21,2	21,6	18,0	12,6	8,5	5,8
	2071-2100 4.5 En	5,3	5,9	7,3	9,4	12,3	16,9	21,8	22,1	18,4	13,1	8,7	6,2
	2011-2040 8.5 En	4,8	5,2	6,7	8,7	11,4	16,2	20,4	20,6	17,3	12,1	7,8	5,5
	2041-2070 8.5 En	5,5	5,5	7,5	9,7	12,7	17,6	22,2	22,4	18,8	13,4	9,0	6,4
	2071-2100 8.5 En	6,6	7,1	8,6	11,1	14,4	20,0	24,6	24,8	20,9	15,1	10,5	7,9
1971-2000; 2011-2040; 2041-2070; 2071-2100 – Período de referência para as temperaturas 4.5; 8.5 – Cenário RCP4.5 ou RCP8.5 Obs; Ens – Temperaturas observadas ou estimadas pelo modelo Ensemble													

2.3 Temperaturas no Pavimento

Para se avaliar o impacto destas alterações no dimensionamento de pavimentos e sua vida útil recorreu-se ao método da Shell [17]. Numa primeira fase este determina, com base nas temperaturas médias mensais do ar, a temperatura média anual ponderada do ar. As expressões utilizadas são comumente referidas na literatura [3, 9]. É importante referir que o método da Shell

prevê a utilização da média das temperaturas mensais máximas e mínimas para cada mês e neste trabalho foram utilizadas diretamente as temperaturas médias mensais.

O fator de ponderação para a temperatura média mensal é dado pela expressão (1).

$$WF = 10^{(-1,224+0,06508 \cdot T_{air}-0,000145 \cdot T_{air}^2)} \quad (1)$$

Onde,

WF – Fator de ponderação mensal.

T_{air} – Temperatura média mensal do ar (°C).

A temperatura média anual ponderada do ar é dada pela expressão (2):

$$WMAAT = 19,66 + 16,91 \cdot \log(WF) + 0,3117 \cdot (\log(WF))^2 \quad (2)$$

Onde,

$WMAAT$ – Temperatura média anual ponderada do ar (°C).

WF – Fator de ponderação mensal médio.

A temperatura de serviço equivalente anual das misturas betuminosas (WMAPT) pode ser determinada pela expressão (3) [18].

$$WMAPT = 1.8959 \times WMAAT - 0.022212 \times t^{0.25} \times WMAAT^{1.5} - 1.8503 \quad (3)$$

Onde,

WMAPT – Temperatura de serviço equivalente anual das misturas betuminosas (°C).

WMAAT – Temperatura média anual ponderada do ar (°C).

t – Espessura das camadas betuminosas (mm).

3 Impacto do aumento das temperaturas no dimensionamento

3.1 Fatores de ponderação mensais

O impacto dos cenários de evolução da temperatura RCP4.5 e RCP8.5 nos fatores de ponderação mensais (WF) apresentam-se nas Figuras 3 e 4. Optou-se por agregar os valores dos fatores de ponderação por estação. É possível observar a tendência de crescimento dos fatores de ponderação, principalmente para a estação de verão (junho, julho e agosto). No caso do cenário RCP8.5 a evolução torna-se evidente em todas as estações, com os valores médios do fator de ponderação para a estação de outono (setembro, outubro e novembro) a aumentarem de uma forma evidente para os períodos 2041-2070 e 2071-2100. Isto indica que os meses mais quentes influenciarão cada vez mais o dimensionamento dos pavimentos flexíveis.

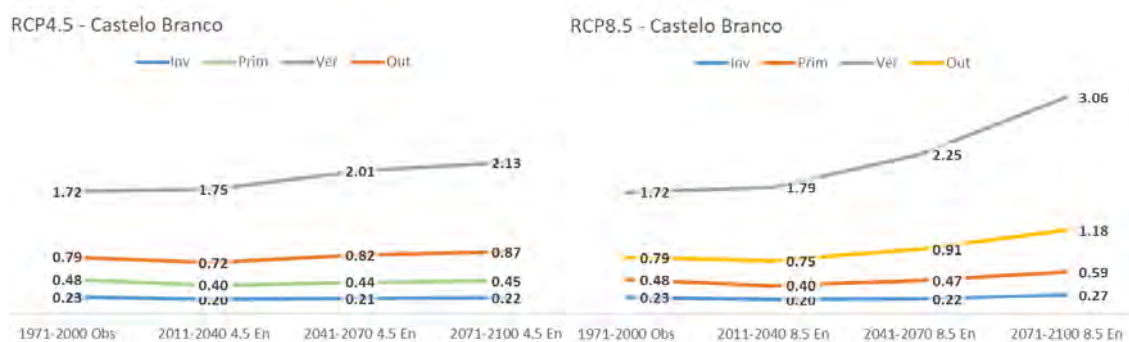


Figura 3. Fatores de ponderação agrupados por estação para Castelo Branco (esq. RCP4.5; dir. RCP8.5)

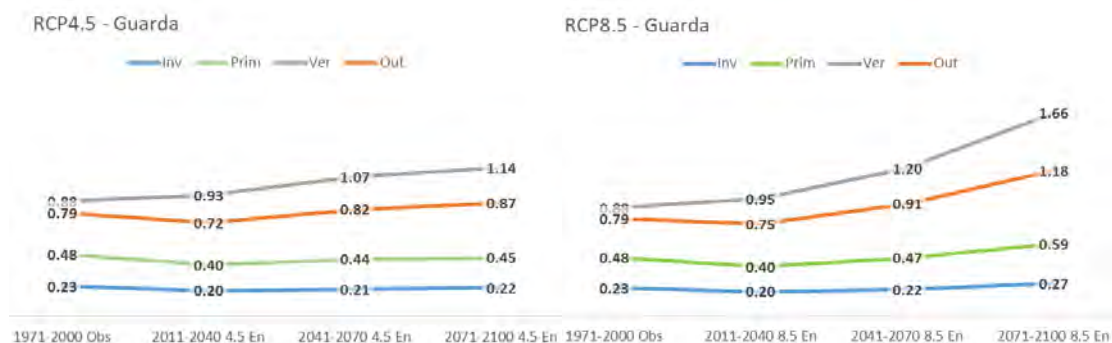


Figura 4. Fatores de ponderação agrupados por estação para a Guarda (esq. RCP4.5; dir. RCP8.5)

3.2 Temperaturas WMAAT e WMAPT

Com base na expressão (2) e nos fatores de ponderação foi determinada a WMAAT (temperatura média anual ponderada do ar). Os valores apresentam-se na Figura 5. É possível observar na evolução da WMAAT como o cenário RCP8.5 se torna mais gravoso ao longo do sec. XXI. Apesar de registar temperaturas mais baixas a subida da WMAAT tem maior magnitude na Guarda.



Figura 5. Evolução dos valores das temperaturas WMAAT para Castelo Branco e Guarda para os cenários RCP4.5 e RCP8.5

Com base na WMAAT e na expressão (3) (que traduz o Chart RT) foram determinados os valores de WMAPT (temperatura de serviço equivalente anual das misturas betuminosas). Refira-se que WMAPT é a temperatura equivalente considerada para dimensionamento. Como o seu valor é função da espessura das camadas betuminosas, os valores determinados consideraram espessuras de misturas betuminosas de 100 mm, 150 mm e 200 mm (Tabela 2). A evolução da temperatura equivalente das misturas betuminosas é mais pronunciada que a temperatura ponderada do ar. O aumento da temperatura equivalente das misturas betuminosas é mais gravoso no cenário RCP8.5 com as temperaturas a aumentar até ao final do século cerca de 4,5°C em Castelo Branco e 5,5°C na Guarda. Este aumento da temperatura de WMAPT é ligeiramente superior para espessuras de misturas betuminosas inferiores.

Tabela 2. Valores das temperaturas WMAPT.

Local	Série	Espessura total de misturas betuminosas		
		200 mm	150 mm	100 mm
Castelo Branco	1971-2000 Obs	26,00	26,44	27,02
	2011-2040 4.5 En	25,48	25,91	26,47
	2041-2070 4.5 En	26,75	27,22	27,82
	2071-2100 4.5 En	27,29	27,77	28,39
	2011-2040 8.5 En	25,76	26,20	26,77
	2041-2070 8.5 En	27,78	28,27	28,91
	2071-2100 8.5 En	30,51	31,09	31,83
Guarda	1971-2000 Obs	19,21	19,49	19,85
	2011-2040 4.5 En	19,41	19,69	20,06
	2041-2070 4.5 En	20,71	21,02	21,42
	2071-2100 4.5 En	21,28	21,61	22,03
	2011-2040 8.5 En	19,67	19,96	20,34
	2041-2070 8.5 En	21,79	22,12	22,56
	2071-2100 8.5 En	24,68	25,09	25,62
1971-2000; 2011-2040; 2041-2070; 2071-2100 – Período de referência para as temperaturas 4.5; 8.5 – Cenário RCP4.5 ou RCP8.5 Obs; Ens – Temperaturas observadas ou estimadas pelo modelo Ensemble				

3.3 Módulos de Deformabilidade

Para determinar os efeitos das temperaturas nos módulos das misturas betuminosas, foram utilizadas as expressões do método da Shell [9, 19, 20]. Os valores de temperatura considerados para a determinação dos módulos corresponderam aos apresentados na Tabela 2 para a WMAPT. A velocidade de tráfego considerada foi de 50 km/h. Considerou-se a utilização de camadas de desgaste em mistura do tipo AC14 e camadas de ligação e/ou base em misturas do tipo AC20/32. Relativamente às propriedades das misturas betuminosas, foi considerada a utilização de um betume 35/50 (comum utilização em Portugal). Para a mistura do tipo AC14 (BB) considerou-se uma percentagem em betume de 5,4% e uma porosidade de 3,5% e para a mistura do tipo AC20/32 (MB) uma percentagem em betume de 4,5% e uma porosidade de 5,5%. Os resultados obtidos apresentam-se na Tabela 3.

Tabela 3. Valores dos módulos de deformabilidade das misturas betuminosas (MPa)

Local	Série	Espessura total de misturas betuminosas					
		200 mm		150 mm		100 mm	
		AC14	AC20/32	AC14	AC20/32	AC14	AC20/32
Castelo Branco	1971-2000 Obs	4367	4944	4185	4756	3957	4519
	2011-2040 4.5 En	4587	5171	4404	4982	4175	4746
	2041-2070 4.5 En	4060	4626	3879	4438	3654	4201
	2071-2100 4.5 En	3854	4411	3674	4222	3450	3987
	2011-2040 8.5 En	4465	5045	4282	4856	4054	4619
	2041-2070 8.5 En	3670	4219	3491	4031	3269	3796
	2071-2100 8.5 En	2757	3249	2588	3066	2379	2840
Guarda	1971-2000 Obs	7878	8474	7704	8303	7483	8085
	2011-2040 4.5 En	7755	8353	7581	8181	7359	7962
	2041-2070 4.5 En	6980	7587	6801	7410	6575	7184
	2071-2100 4.5 En	6652	7261	6472	7081	6244	6853
	2011-2040 8.5 En	7593	8193	7417	8020	7195	7800
	2041-2070 8.5 En	6376	6986	6195	6804	5966	6574
	2071-2100 8.5 En	4939	5533	4756	5345	4526	5108
1971-2000; 2011-2040; 2041-2070; 2071-2100 – Período de referência para as temperaturas 4.5; 8.5 – Cenário RCP4.5 ou RCP8.5 Obs; Ens – Temperaturas observadas ou estimadas pelo modelo Ensemble							

Os resultados mostram que para o cenário RCP4.5 o impacto da subida de temperaturas nos módulos de deformabilidade das misturas betuminosas é maior na Guarda. Quando comparado o período 1971-2000 com o período 2071-2100, observa-se uma redução de cerca de 16% na Guarda e 12% em Castelo Branco. Para no cenário RCP8.5, a diminuição do módulo de deformabilidade é de 37% a 40% tanto em Castelo Branco como na Guarda. A redução do valor dos módulos é ligeiramente superior para espessuras de misturas betuminosas inferiores e é superior na mistura AC14 quando comparada com a mistura AC20/32.

4. Impacto na Vida Útil de Pavimentos Flexíveis

Para realizar a avaliação do efeito da subida de temperaturas na vida útil dos pavimentos, utilizaram-se as leis de fadiga do método da Shell [9, 21]. O eixo de cálculo utilizado foi o eixo de 80 kN recomendado pelo método da Shell [9]. Consideraram-se as estruturas de pavimento representadas na Figura 5. As espessuras das misturas betuminosas são iguais às consideradas no cálculo da WMAPT, deste modo os módulos utilizados para as misturas betuminosas no cálculo foram os apresentados na Tabela 3. As estruturas consideraram uma sub-base granular de 20 cm com módulo de 220 MPa e uma fundação de classe F3 de acordo com o MACOPAV (MACOPAV, 1995) com módulo de 100 MPa. Estas estruturas procuram simular estruturas representativas de pavimentos utilizados em estradas principais, estradas secundárias e arruamentos.

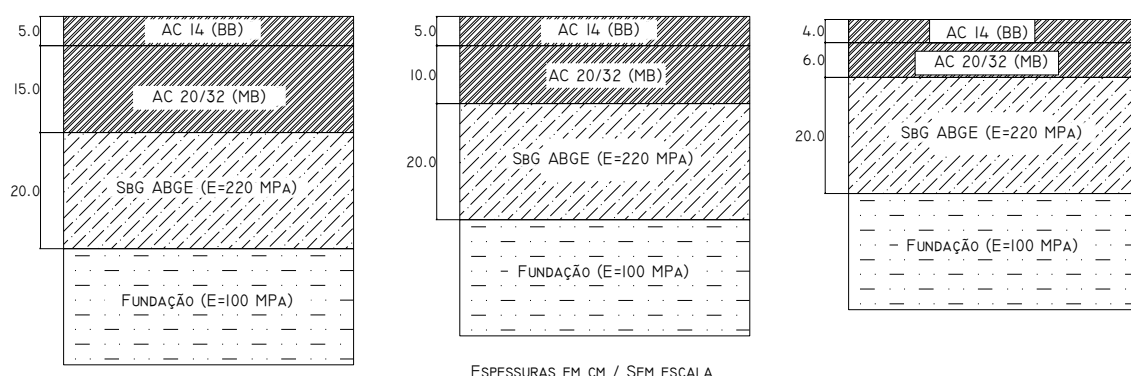


Figura 5. Estruturas de pavimento com espessuras de misturas betuminosas de 200 mm (esq.), 150 mm (centro) e 100 mm (dir.)

O cálculo das extensões na estrutura de pavimento foi realizado com recurso ao software PITRAPAVE. Determinou-se para cada caso qual o tráfego que provocaria 100% de dano no critério de fadiga, expressão 4, e de deformação permanente, expressão 5. Refira-se que no critério de fadiga não foram considerados coeficientes de ajuste devido a distribuição lateral do tráfego, tempo de recuperação e efeitos dos gradientes de temperatura [9]. Para a deformação permanente foi considerada a lei correspondente a 95% de sobrevivência [9]. Os resultados encontram-se na Tabela 4. Pode observar-se que o critério mais condicionante foi o da fadiga na totalidade dos casos. Considerando que o critério mais condicionante limita a vida útil do pavimento foi considerada a redução no tráfego admissível tendo como valor de referência o referente ao período 1971-2000.

$$\varepsilon_t = (0,856 \cdot Vb + 1,08) \cdot E_m^{-0,36} \cdot N_{80}^{-0,2} \quad (4)$$

Onde:

ε_t – Extensão de tração;

N_{80} – Número de eixos de 80 kN;

Vb – Percentagem volumétrica de betume

E_m – Módulo e deformabilidade da mistura betuminosa (Pa)

$$\varepsilon_{dp} = 1,8 \cdot 10^{-2} \cdot N_{80}^{-0,25} \quad (5)$$

Onde:

ε_t – Extensão de compressão

N_{80} – Número de eixos de 80 kN;

Observa-se que a redução do tráfego admissível é mais pronunciada para pavimentos mais espessos. Na cidade da Guarda a redução da capacidade dos pavimentos é mais significativa. Para este resultado pode contribuir o facto de em Castelo Branco as temperaturas poderem estar a ser subestimadas. Os valores de redução do tráfego admissível em pavimentos com 200 mm de misturas betuminosas são de cerca de 15% a 24% no Cenário RCP4.5 para Castelo Branco e Guarda, respetivamente. No cenário RCP8.5 os valores correspondentes são de 42% e 51%. Estes valores representam uma redução muito significativa na vida útil dos pavimentos.

Tabela 4. Número acumulado de eixos de 80 kN até 100% do dano.

Loc.	Série	Tráfego admissível para 100% dano (em milhões)								
		200 mm			150 mm			100 mm		
		Fadiga	Def. Perm.	%Tráf	Fadiga	Def. Perm.	%Tráf	Fadiga	Def. Perm.	%Tráf
Castelo Branco	1971-2000 Obs	18,5	23,2	100	3,53	5,24	100	0,494	0,970	100
	2011-2040 4.5 En	19,8	25,2	107	3,72	5,63	105	0,514	1,02	104
	2041-2070 4.5 En	16,9	20,5	91	3,27	4,72	93	0,468	0,897	95
	2071-2100 4.5 En	15,8	18,8	85	3,10	4,39	88	0,450	0,850	91
	2011-2040 8.5 En	19,1	24,1	103	3,61	5,41	102	0,503	0,993	102
	2041-2070 8.5 En	14,8	17,4	80	2,95	4,10	84	0,436	0,808	88
Guarda	2071-2100 8.5 En	10,7	11,1	58	2,30	2,81	65	0,372	0,615	75
	1971-2000 Obs	44,7	68,7	100	7,37	13,2	100	0,878	1,96	100
	2011-2040 4.5 En	43,6	66,6	98	7,20	12,8	98	0,862	1,92	98
	2041-2070 4.5 En	36,8	54,3	82	6,24	10,8	85	0,768	1,68	87
	2071-2100 4.5 En	34,1	49,5	76	5,85	9,96	79	0,729	1,58	83
	2011-2040 8.5 En	42,1	63,9	94	7,00	12,4	95	0,842	1,87	96
	2041-2070 8.5 En	31,9	45,7	71	5,54	9,31	75	0,698	1,50	79
	2071-2100 8.5 En	21,9	28,7	49	4,04	6,28	55	0,548	1,11	62
1971-2000; 2011-2040; 2041-2070; 2071-2100 – Período de referência para as temperaturas 4.5; 8.5 – Cenário RCP4.5 ou RCP8.5										
Obs; Ens – Temperaturas observadas ou estimadas pelo modelo Ensemble										
%Tráf – Percentagem do tráfego admissível comparando com a série 1971-2000 Obs										

Da Tabela 4 pode observar-se que o nível de tráfego admissível em geral diminui ao longo do sec. XXI para a mesma estrutura de pavimento. De modo a compreender o impacto desta diminuição, foi determinada a espessura de misturas betuminosas necessária em cada período para cada estrutura tipo apresentar um tráfego admissível igual ao nível de tráfego do período de referência 1971-2000. Apresenta-se na Tabela 5 a diferença de espessura obtida para cada período relativamente às espessuras consideradas nas estruturas tipo. Os maiores incrementos ocorreram para a estrutura com espessura de misturas betuminosas de 200 mm e para a localização da Guarda. Pode observar-se que para o cenário RCP4.5 a diferença de espessura foi moderada, resultando em incrementos de espessura inferiores a 1 cm. Para o cenário RCP8.5 e para os períodos 2011-2040 e 2041-2070, o aumento de espessura é inferior a 1 cm. Contudo, observa-se um incremento muito significativo no período 2071-2100 em que o aumento de espessura atinge os 4 cm na estrutura mais espessa. Para a estrutura menos espessa, o aumento é de cerca de 2,5 cm, o que representa um aumento de 25% na espessura de misturas betuminosas. Estes aumentos de espessura representam aumentos de custos muito significativos.

Importa referir que os cálculos foram realizados considerando os módulos da Tabela 3. Não se realizou nenhuma correção da temperatura de serviço WMAPT devido à diferença de espessura relativamente às espessuras consideradas nas estruturas tipo (200 mm, 150 mm e 100 mm). Para a generalidade dos períodos, a diferença de espessuras é relativamente pequena, pelo que o erro

é pouco significativo. No entanto, para o cenário RCP8.5 no período 2071-2100, a diferença de espessuras é significativa, embora a não correção da temperatura e, consequentemente, dos módulos introduzam um ligeiro erro por excesso nos valores das espessuras.

Tabela 5. Diferença de espessura de misturas betuminosas (em cm)

Loc.	Série	Diferença de espessura nas misturas betuminosas em relação a 1971-2001 Obs (cm)		
		Estrutura 200 mm	Estrutura 150 mm	Estrutura 100 mm
Castelo Branco	2011-2040 4.5 En	-0,2	-0,2	-0,1
	2041-2070 4.5 En	0,3	0,2	0,1
	2071-2100 4.5 En	0,5	0,4	0,2
	2011-2040 8.5 En	-0,1	-0,1	0
	2041-2070 8.5 En	0,7	0,6	0,3
	2071-2100 8.5 En	4,0	3,4	2,5
Guarda	2011-2040 4.5 En	0,1	0,1	0,0
	2041-2070 4.5 En	0,6	0,5	0,3
	2071-2100 4.5 En	0,8	0,6	0,4
	2011-2040 8.5 En	0,2	0,1	0,1
	2041-2070 8.5 En	1,0	0,8	0,5
	2071-2100 8.5 En	4,0	3,3	2,4
1971-2000; 2011-2040; 2041-2070; 2071-2100 – Período de referência para as temperaturas 4.5; 8.5 – Cenário RCP4.5 ou RCP8.5				
Obs; Ens – Temperaturas observadas ou estimadas pelo modelo Ensemble				

5. Conclusões

Este trabalho recolheu projeções de temperatura provenientes de modelos climáticos para compreender de que modo a subida estimada das temperaturas impactará na vida útil dos pavimentos flexíveis e no seu dimensionamento. Os modelos climáticos preveem um aumento das temperaturas médias mensais do ar na Beira Interior que, em cenários mais pessimistas, pode chegar a 5°C nos meses mais quentes no final do séc. XXI. Observa-se que a influência dos meses mais quentes no dimensionamento de pavimentos tende a ser cada vez mais condicionante.

A temperatura de serviço WMAPT aumenta moderadamente no cenário RCP4.5, entre 1°C e 2°C, enquanto no cenário RCP8.5 aumenta entre 4,5°C e 5,8°C. Os aumentos são superiores na Guarda e para pavimentos com espessuras de misturas betuminosas inferiores. Em estruturas típicas de pavimento, este aumento da temperatura de serviço pode significar, no cenário RCP4.5, a redução do tráfego admissível de 9% e 24%, e no cenário RCP8.5 entre 25% e 51%, reduções superiores na Guarda em pavimentos com espessura de misturas betuminosas superiores. Estes resultados apontam para impactos significativos da subida de temperatura na vida útil dos pavimentos. Para manter a capacidade de suporte dos pavimentos seriam necessários incrementos na espessura de misturas betuminosas de cerca de 3% a 4% no cenário RCP4.5 e de 20% a 25% no cenário RCP8.5. Refira-se que, se em lugar do método da Shell se utilizasse uma distribuição horária média da temperatura mensal nos pavimentos usados, por exemplo, o efeito na vida útil mencionado ainda seria mais gravoso [22].

Acresce que para fazer face às alterações descritas é aconselhável a consideração de condições climáticas dinâmicas no dimensionamento de pavimentos. Assim, o dimensionamento deverá ser realizado com previsões da evolução através de modelos climáticos credíveis. Isto permitiria considerar no dimensionamento dos pavimentos os efeitos das alterações climáticas e realizar o dimensionamento com condições mais próximas das que previsivelmente se irão verificar durante a sua vida útil. Também é necessário avaliar e utilizar materiais e soluções construtivas mais adaptados às condições climáticas estimadas para o período de vida útil. Estes são procedimentos fundamentais para a manutenção futura das infraestruturas durante a sua vida útil.

Agradecimentos

Os autores com afiliação CERIS agradecem o apoio financeiro da Fundação para a Ciência e a

Tecnologia, através do projeto UIDB/04625/2025 da unidade de investigação CERIS.

Referências:

- [1] Willway, T., Reeves, S., & Baldachin, L. (2008). *Maintaining pavements in a changing climate*. TSO.
- [2] Mahpour, A. El-Diraby, T. (2021). *Incorporating Climate Change in Pavement Maintenance Policies: Application to Temperature Rise in the Isfahan County, Iran*, Sustainable Cities and Society, Volume 71. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102960>
- [3] Sreejith, G. H. (2022). *Pavement Temperature Data Maps for Worldwide Locations*. International Journal of Pavement Research and Technology, 15:948–956. <https://doi.org/10.1007/s42947-021-00064-8>
- [4] Knott, J. F., Jacobs, J. M., Sias, J. E., Kirshen, P., & Dave, E. V. (2019). *A Framework for Introducing Climate-Change Adaptation. Pavement Management. Sustainability*, 11(16), 4382. <https://doi.org/10.3390/su11164382>
- [5] Almeida, A., Picado-Santos, L. (2022). *Asphalt Road Pavements to Address Climate Change Challenges -An Overview*. Applied Sciences, 12(24), 12515. <https://doi.org/10.3390/app122412515>.
- [6] Soares, P., Lima, D., Cardoso, R., Nogueira, M., Lemos, G., Bento, V., & Trigo R., (2024). *RNA2100 – Climate Projections, Extremes, and Indices – Mainland Portugal*. Agência Portuguesa do Ambiente, Lisboa.
- [7] IPCC (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge
- [8] Tuel, A., Eltahir, E. (2020). *Why Is the Mediterranean a Climate Change Hot Spot?*. Journal of Climate, 33 (14).
- [9] Branco, F., Pereira, P., & Picado-Santos, L. (2005). *Pavimentos Rodoviários*. Edições Almedina. Portugal.
- [10] Gardete, D., Santos, L. P., Pais, J. (2008). *Permanent deformation characterization of bituminous mixtures using laboratory tests*. Road Materials and Pavement Design, 9(3), 537-547.
- [11] Kuna, K., Kelly, K. (2019). *Flexible pavement design for hot climates – a case study*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Transport 172(3): 164–173, <https://doi.org/10.1680/jtran.16.00097>
- [12] El Haloui, Y., Sepaspour, R., Hajikarimi, P., Moghadas Nejad, F., Fakhari Tehrani, F., & Absi, J. (2023). Adoption of asphalt binder performance grades for Morocco considering climate change. International Journal of Civil Engineering, 21(7), 1061-1075.
- [13] Kumlai, S., Jitsangiam, P., & Pichayapan, P. (2017). *The implications of increasing temperature due to climate change for asphalt concrete performance and pavement design*. KSCE Journal of Civil Engineering, 21, 1222-1234.
- [14] Portal do Clima (2024). *Modelos climáticos*. Acedido em 27/09/2024: <http://portaldoclima.pt/pt/o-projeto/metodologia/modelos-climaticos/>
- [15] ClimAdaPT.Local (2016). *Estratégia Municipal de Adaptação às Alterações Climáticas de Castelo Branco*. Câmara Municipal de castelo Branco. Edição online: https://www.cm-castelobranco.pt/media/2386/00_emaac_castelobranco_s.pdf.
- [16] Branquinho, S., Rolim, J., & Teixeira, J.L. (2021). Climate Change Adaptation Measures in the Irrigation of a Super-Intensive Olive Orchard in the South of Portugal. Agronomy, 11, 1658. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081658>.
- [17] Shell (1978). *Shell Pavement Design Manual — Asphalt Pavements and Overlays for Road Traffic*. Shell International Petroleum Company Ltd., London.
- [18] Gardete, D., Luzia, R., Capitão, S., Picado-Santos, L. (2024). *Determination of an Analytical Expression for Chart RT (WMAPT) Using Evolutionary Polynomial Regression*. ICEUBI International Congress on Engineering 2024, 27-29 November, Covilhã, Portugal.
- [19] Shell (2003). *The Shell Bitumen Handbook Fifth edition*. Thomas Telford Ltd London
- [20] Subagio, B., Zurni, R., Rahman, H., Hariyadi, E. (2013). *The Resilient Modulus and Plastic Deformation of Hot Mix Recycling Asphalt (HMRA) using Modified Binder Evaloy®*. Journal of the Eastern Asia Society of Transportation Studies, Vol 10, pp. 1523-1536.
- [21] INIR (2012). *Directivas para a Conceção de Pavimentos - Critérios de Dimensionamento de Pavimentos*. Instituto de Infraestruturas Rodoviárias I.P., Lisboa
- [22] Picado-Santos, L. (2000). *Design Temperature on Flexible Pavements: Methodology for Calculation*. International Journal of Road Materials and Pavement Design, vol. 1, n. 3, pp. 355-371. <https://doi.org/10.1080/14680629.2000.12067148>