

IMPACTO DO AUMENTO DAS TEMPERATURAS NA VIDA ÚTIL DOS PAVIMENTOS – ANÁLISE PARA AS CONDIÇÕES DE CASTELO BRANCO

Dinis Gardete

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

Rosa Luzia

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

Silvino Capitão

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

Luís Picado-Santos

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

RESUMO: As consequências das alterações climáticas no desempenho e vida útil dos pavimentos rodoviários flexíveis poderão ser muito significativas. Entre os vários fatores com potencial para impactar na manutenção e desempenho destes está o aumento das temperaturas. Neste trabalho foram recolhidos dados sobre as temperaturas históricas e estimadas para Castelo Branco para as trajetórias de concentração de gases de efeito estufa (Representative Concentration Pathways) RCP4.5 e RCP8.5. Utilizando o método da Shell foi avaliado o impacto no dimensionamento dos pavimentos da subida estimada das temperaturas até ao fim do século. Foi determinada a influência desta subida na temperatura ponderada do ar, na temperatura de serviço para dimensionamento, no módulo de deformabilidade de misturas betuminosas utilizadas em Portugal e na vida útil de uma estrutura típica de pavimento flexível. Os resultados obtidos indicam que mesmo no cenário RCP4.5 o efeito da subida de temperaturas é significativo, cerca de 12% de redução no módulo de deformabilidade e 3 anos de redução na vida útil. Para o cenário RCP8.5 os efeitos são significativamente ampliados com a redução do módulo de rigidez de cerca de 35% e com uma redução da vida útil do pavimento superior a 6 anos.

PALAVRAS-CHAVE: Alterações climáticas, Pavimentos flexíveis, Dimensionamento de pavimentos, Aumento das temperaturas, Método da Shell.

1. Introdução

As alterações climáticas terão um expectável impacto no desempenho e vida útil de diversas componentes das vias de comunicação, nomeadamente nos pavimentos rodoviários flexíveis. Estas alterações podem ter consequências diversas nos pavimentos e materiais constituintes, por exemplo, um mais rápido envelhecimento do betume conduzindo a uma maior propensão para o fendilhamento das camadas ou a redução da rigidez do betume e menor resistência à deformação permanente. Entre os diversos fatores com potencial para impactar

na manutenção dos pavimentos está o aumento das temperaturas mais elevadas (Willway et al., 2008; Mahpour e El-Diraby, 2021). 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 (Mahpour e El-Diraby, 2021; Knott et al., 2019; Almeida e Picado-Santos, 2022). 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 (Mahpour e El-Diraby, 2021).

Um dos fatores que impactará a durabilidade dos pavimentos flexíveis é o esperado aumento das temperaturas estivais (Willway et al., 2008). 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 (Sreejith, 2022). 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 (Tuel e Eltahir, 2020). Contudo, esta tendência é mais acentuada 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, 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 (Soares et al., 2024).

Temperaturas mais elevadas induzem menor rigidez do betume que pode facilitar o aparecimento de patologias como as rodeiras de pequeno raio, devido a deformações nas misturas betuminosas, ou a exsudação do betume (Branco et al., 2005, Gardete et al, 2008). O efeito da temperatura na rigidez do betume deve ser avaliado com atenção pois esta varia com um fator de 3 por cada 10°C (Kuna e Kelly, 2019). Assim, diversos estudos referem alguns efeitos decorrentes desta subida 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 (El Haloui et al., 2023; Almeida e Picado-Santos, 2022). Kumlai et al. refere que o impacto da subida de temperaturas pode conduzir a uma redução de 4 anos na vida útil de dos pavimentos para as condições Australianas (Kumlai et al., 2015).

Neste trabalho utilizam-se as temperaturas históricas e estimadas para Castelo Branco para dois cenários de previsível evolução da temperatura até ao final do século, para simular o impacto dessas condições no dimensionamento dos pavimentos.

2. Temperaturas Históricas e Estimadas

2.1 Modelos Climáticos

Os modelos globais de clima (GCMs) são baseados nos princípios físicos gerais da dinâmica dos fluidos e 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) (Portal do Clima, 2024). Os modelos climáticos regionais (RCM) são modelos numéricos de previsão do clima para uma região, 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 (Portal do Clima, 2024).

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) (IPCC, 2013). Estes cenários representam possíveis evoluções

socioeconómicas e respetivas emissões de GEE. A partir de uma concentração de CO₂ que ronda as 400 ppm (partes por milhão) dois RCP foram utilizados nas projeções (ClimAdaPT.Local, 2016):

- 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.

Os dados simulados a partir dos modelos climáticos são geralmente representados recorrendo a grelhas com uma resolução espacial associada à capacidade de cada modelo em representar adequadamente os variados fenómenos atmosféricos e as massas terrestres e oceânicas. Estas simulações têm servido de base a estudos sobre o impacto das alterações climáticas em diversos setores (CMCB, 2016; Branquinho et al., 2021).

Neste trabalho optou-se por utilizar um Ensemble. O Ensemble agrupa a informação proveniente de projeções realizadas com diferentes modelos climáticos, tanto GGM como 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 (Soares et al, 2024). Assim, para a opção Ensemble foram recolhidos os elementos referidos à temperatura média mensal para os dois cenários de emissões, RCP4.5 e RCP8.5, e para os períodos disponíveis (Portal do Clima, 2024).

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

2.2 Temperaturas Médias Mensais em Castelo Branco

Foi recolhida informação sobre séries de temperaturas médias mensais registadas ao longo do sec. XX e início do XXI de livros, documentos online e sites. Isto permite avaliar como o clima tem variado e também avaliar como as séries históricas comparam com projeções futuras. Foram recolhidas as seguintes séries históricas: 1915-1941 (OIdL, 1945); 1931-1960 (SMN, 1970); normal climatológica 1971-2000 (IPMA, 2024); normal climatológica 1981-2010 (IPMA, 2024); 1986-2015 (Carmo, 2016); 1991-2020 (Climate Data, 2024). Importa referir as séries podem ter sido obtidas em locais diferentes; por exemplo a série de 1986-2015 resulta de medições realizadas no posto meteorológico da Escola Superior Agrária de Castelo Branco (Horta, 2016). Do Portal do Clima recolheram-se as séries Histórico Observado 1971-2000; Histórico Estimado 1971-2000 (simulação para o período 1971-2000 com o modelo Ensemble).

Apresenta-se na Tabela 1 a comparação entre as séries históricas recolhidas. Para o período 1971-2000 são incluídos os valores obtidos com base nos dados do Portal do Clima, série Obs 1971-2000 (Portal do Clima, 2024), que como esperado se aproxima da normal climatológica, série 1971-2000 (IPMA, 2024). É possível observar que as temperaturas historicamente não apresentam variações muito significativas durante grande parte do sec. XX.

Relativamente às temperaturas futuras foram recolhidas as projeções obtidas no Ensemble para o período 1971-2000 e para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 e para os períodos 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100. Na Figura 1 apresentam-se as temperaturas médias mensais estimadas para o cenário RCP 4.5. São incluídas as temperaturas para o período 1971-2000, tanto observadas como os valores estimados para o mesmo período no Ensemble (séries Obs 1971-2000 e Est 1971-2000 Ens). Observa-se que as temperaturas estimadas no Ensemble para o período 1971-2000 são inferiores às observadas. Isto indica que as projeções do Ensemble subestimaram os valores para este período e o mesmo pode ocorrer para as temperaturas estimadas em cenários futuros. Para o cenário RCP4.5 observa-se uma tendência de subida das temperaturas com especial incidência

nos meses mais quentes (1 a 2°C de aumento no final do sec. XXI). Para os meses mais frios a série correspondente ao observado de 1970 a 2000 apresenta temperaturas superiores.

Tabela 1. Valores da temperatura média em Castelo Branco para diversos períodos do sec. XX e XXI.

Série	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
1915-1941	7,7	8,5	10,6	12,9	15,7	20,5	23,8	24,2	21,1	16,3	10,7	8,2	15,0
1931-1960	7,9	9,2	11,6	14,0	16,9	21,4	24,6	24,4	21,5	16,5	11,6	8,4	15,6
1971-2000	7,9	9,6	12,7	13,1	16,8	21,0	25,0	24,4	21,3	16,3	11,7	9,0	15,7
1981-2010	8,1	9,5	12,4	13,6	16,8	21,7	24,7	24,6	21,7	16,6	11,8	8,9	15,9
1986-2015	7,1	8,5	11,4	12,9	16,8	21,4	24,6	24,0	20,5	15,7	10,7	7,9	15,0
1991-2020	7,6	8,7	11,2	13,6	17,4	22,3	24,7	25,0	21,8	16,7	11,0	8,3	--
Obs 1971-2000	8,3	9,8	12,2	13,5	16,6	21,2	24,8	24,6	21,9	16,8	12,1	9,3	--

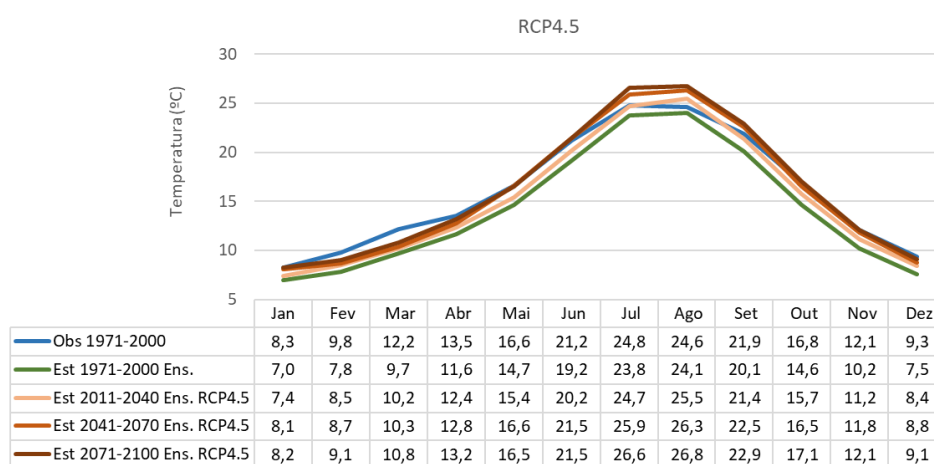


Figura 1. Temperaturas para o cenário RCP4.5.

A magnitude das alterações provocadas num cenário de maior incremento das emissões de CO₂ é visível na Figura 2. O aumento das temperaturas é sensível em todos os meses, com maior incidência nos mais quentes nos quais o aumento é muito gravoso. Para o mês de agosto a temperatura média no período 2070-2100 encontra-se cerca de 5°C acima do observado em 1971-2000.

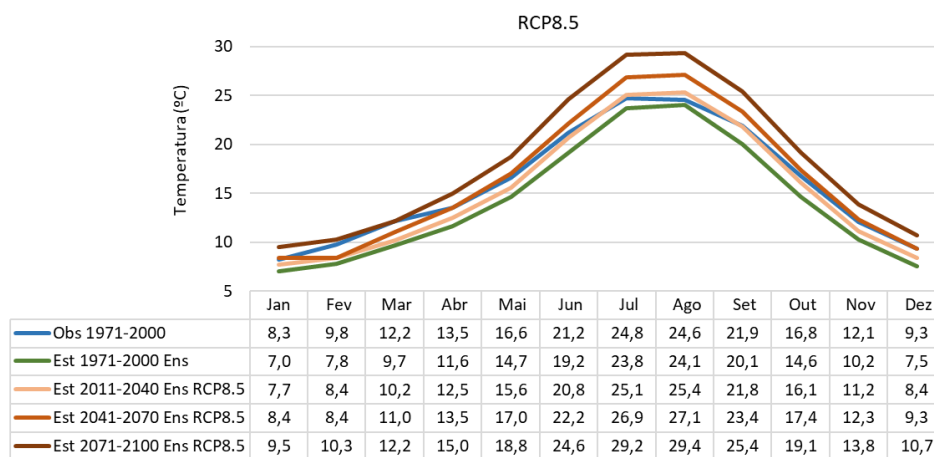


Figura 2. Temperaturas para o cenário RCP8.5.

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 (Shell, 1978). Numa primeira fase este determina, com base nas temperaturas médias mensais, a temperatura média anual ponderada. As expressões utilizadas são comumente referidas na literatura (Sreejith, 2021; Gardete et al., 2024; Branco et al., 2005). 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, contudo as diferenças não são significativas.

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 (°C).

A temperatura média anual ponderada 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 (WMAPT) pode ser determinada pela expressão (3) (Gardete et al., 2024).

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

Onde,

$WMAPT$ – Temperatura de serviço equivalente anual do pavimento (°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 na Figura 3. Optou-se por agregar os valores 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 RCP.8.5 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.

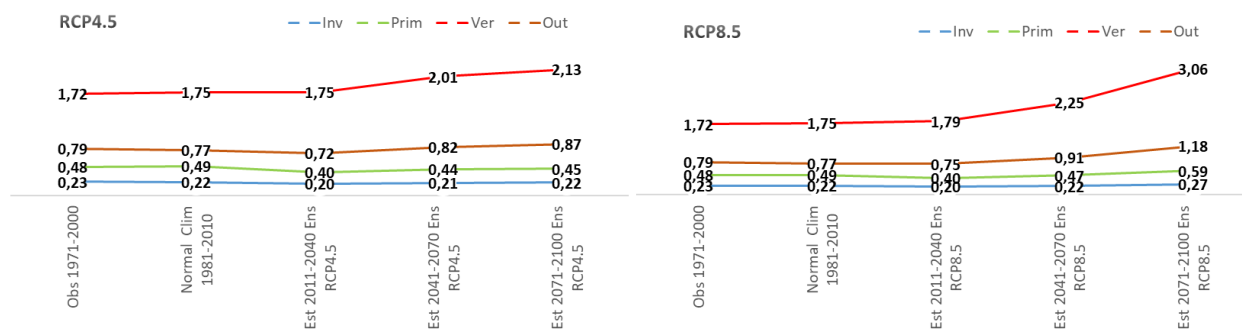


Figura 3. Evolução dos valores do fator de ponderação médio para os cenários RCP4.5 e RCP8.5.

3.2 Temperaturas WMAAT e WMAPT

Com base nas expressões (2) e (3) foram determinados os valores de WMAAT e WMAPT. Apresenta-se na Figura 4 os valores obtidos. Refira-se que WMAPT é a temperatura equivalente considerada para dimensionamento. Como o seu valor é função da espessura das camadas betuminosas os valores apresentados na Figura 4 consideraram uma espessura de misturas betuminosas de 200 mm. Pode observar-se que a evolução das temperaturas no pavimento é mais pronunciada que nas temperaturas do ar, como esperado. Observa-se um aumento de cerca de 1°C na WMAAT até ao final do século para o cenário RCP4.5 e um aumento superior a 4°C para o cenário RCP8.5.

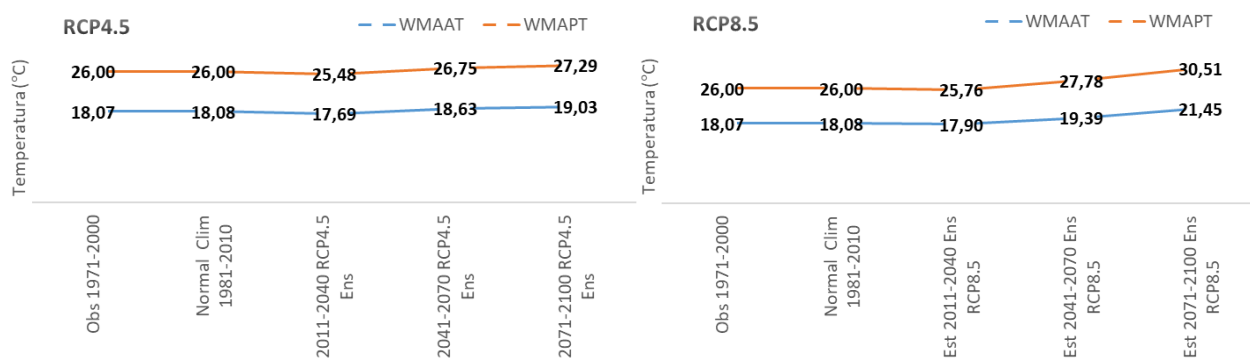


Figura 4. Evolução dos valores das temperaturas WMAAT e WMAPT para os cenários RCP4.5 e RCP8.5.

3.3 Módulos de Deformabilidade

Para determinar os efeitos das temperaturas nos módulos das misturas betuminosas foram utilizadas as expressões do método da Shell (Branco et al., 2005; Shell, 2003; Subagio et al. 2013). Os valores de temperatura considerados para a determinação corresponderam às temperaturas apresentadas na Figura 4 para WMAPT. A velocidade de tráfego considerada foi de 30 km/h. Para as misturas foi considerada a utilização de um betume 35/50 (comum utilização na área de Castelo Branco), para a mistura AC 14 (BB) considerou-se uma percentagem em betume de 5,4% e uma porosidade de 3,5% e para as misturas AC 20 /32 (MB) uma percentagem em betume de 4,5% e uma porosidade de 5,5%. Os resultados obtidos apresentam-se na Figura 5.

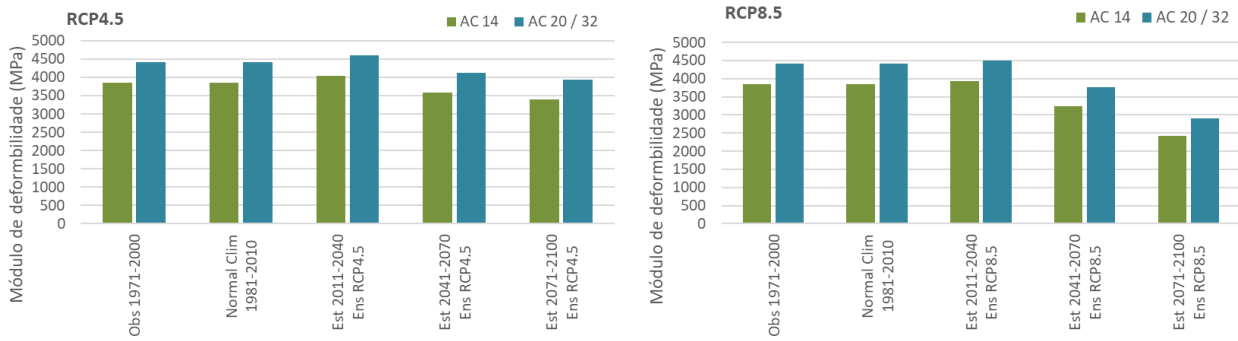


Figura 5. Evolução dos módulos de deformabilidade para os cenários RCP4.5 e RCP8.5.

Os resultados mostram que para o cenário RCP4.5 o impacto da subida de temperaturas nos módulos de deformabilidade das misturas até ao final do sec. XXI é mais moderado, com uma diminuição de 12% para a mistura AC 14 e de 11% para as misturas AC 20/32, em relação ao período 1971-2000. Para no cenário RCP8.5, a diminuição do módulo de deformabilidade é de 37% e de 34% para a mistura AC 14 e AC 20/32, respetivamente. Deste modo, para um cenário semelhante ao RCP8.5 o impacto da subida das temperaturas nos meses mais quentes tem um efeito considerável, com um impacto muito significativo nos módulos de deformabilidade das misturas betuminosas na fase de dimensionamento dos pavimentos, uma redução de cerca de 35%.

4. Impacto do Aumento das Temperaturas na Vida Útil dos Pavimentos

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 (Branco et al., 2005; INIR, 2012). O eixo de cálculo utilizado foi o eixo de 80 kN recomendado pelo método da Shell (Branco et al., 2005). Considerou-se a estrutura de pavimento representada na Figura 6 como base para avaliação do efeito da subida de temperaturas. Esta é uma estrutura típica com 20 cm de espessura das camadas betuminosas, semelhante ao considerado no cálculo da WMAPT, uma sub-base granular com 20 e uma fundação de classe F3 de acordo com o MACOPAV (MACOPAV, 1995).

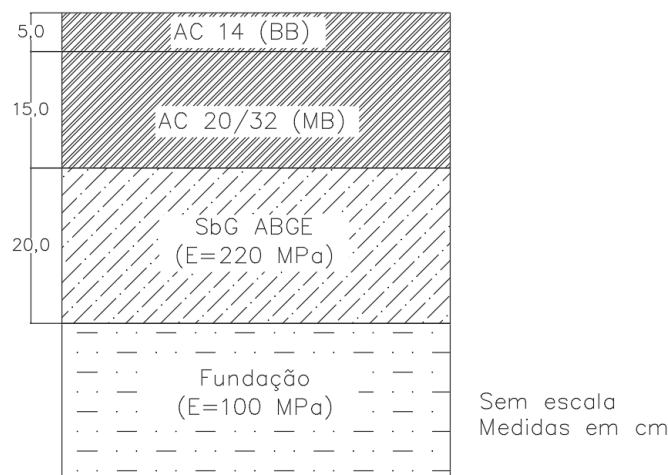


Figura 6. Estrutura de pavimento.

Os módulos utilizados para as misturas betuminosas foram os determinados anteriormente (ver Figura 5). 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 e de deformação permanente. Os resultados encontram-se na Figura 7. A diminuição no número de eixos padrão acumulado até 100% de dano é muito significativa. Considerando como referência o período 1971-2000 observa-se que para o cenário RCP4.5 e período 2071-2100 a diminuição do N_{80} para 100% de dano é de 14%

no critério de fadiga e de 18% no critério de deformação permanente. Para as mesmas condições, mas no cenário RCP8.5 a redução é de 39% no critério de fadiga e de 51% no critério da deformação permanente.

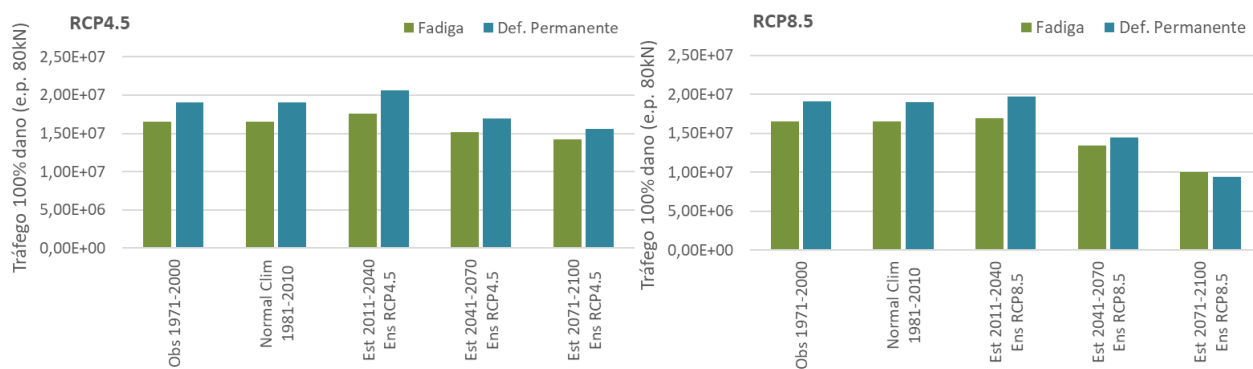


Figura 7. Número acumulado de eixos de 80 kN até 100% do dano.

Para avaliar a redução na vida útil determinaram-se as condições de tráfego que fornecem um valor de N_{80} de modo que para as condições 1971-2000 a estrutura de pavimento tivesse uma duração de 20 anos. Assim, para o critério de fadiga considerou-se um fator de agressividade de 4, uma taxa de crescimento anual de 3% e calculou-se um TMDAp no ano de abertura e na via de projeto de 421 v.p.. Para as mesmas condições no critério de deformação permanente o TMDAp determinado para no ano de abertura e via mais solicitada foi de 486 v.p.. Para estas condições de tráfego determinou-se para cada cenário e período, quantos anos decorreriam até o número de eixos padrão acumulado atingir o limite ($N_{80} = N_{80}^{adm}$, ou seja, dano igual a 100%, ver Figura 8 e Figura 9). Se para o cenário de RCP 4.5 a duração do pavimento se manteria acima dos 17 anos no período 2071-2100, para o cenário RCP8.5 a diminuição é bastante gravosa. Para o período 2071-2100 a duração da estrutura considerada seria de 13,5 anos no critério de fadiga (redução de 6,5 anos) e de 11,3 anos no critério da deformação permanente (redução de 8,7 anos).

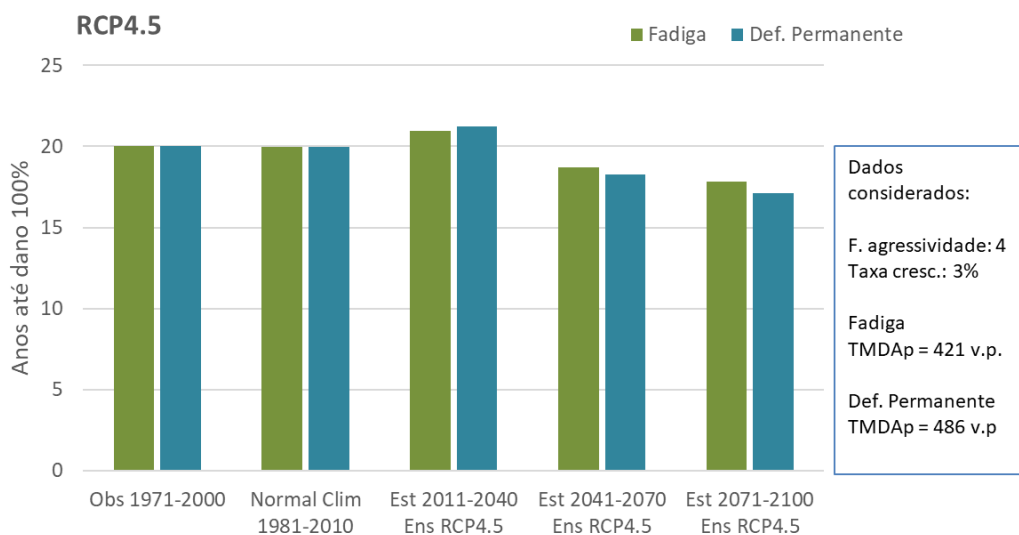


Figura 9: Anos até se atingir um dano de 100% no cenário RCP4.5.

5. Conclusões

Este trabalho utilizou dados históricos e projeções para compreender de que modo a subida estimada das temperaturas impactará na vida útil dos pavimentos flexíveis e no seu dimensionamento. A comparação com séries históricas permite observar que o clima apresentou alguma estabilidade durante o sec. XX. Contudo, os modelos climáticos preveem um aumento das temperaturas médias mensais que em cenários mais pessimistas pode chegar a 5°C nos meses mais quentes no final do sec. XXI.

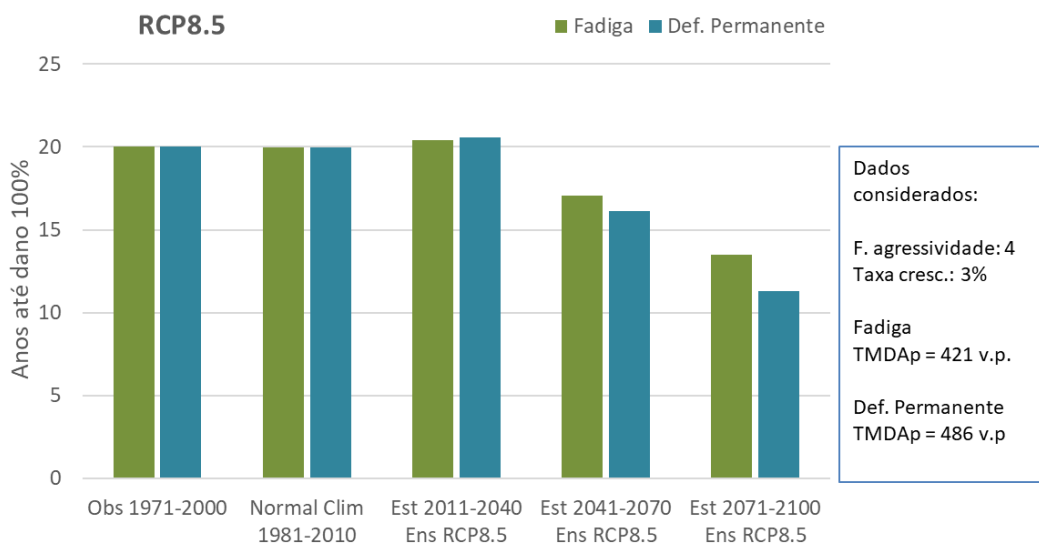


Figura 10: Anos até se atingir um dano de 100% no cenário RCP8.5.

Salienta-se que alguns modelos aparentam estar a subestimar as temperaturas para a zona de Castelo Branco, podendo a realidade ser mais gravosa que as estimativas indicam. O método da Shell foi utilizado para avaliar o impacto das temperaturas no dimensionamento de pavimentos flexíveis. Observa-se que a influência dos meses mais quentes no dimensionamento de pavimentos tende a ser cada vez maior. Assim, é esperado um aumento da temperatura de serviço de dimensionamento, de 1,3°C e 4,5°C (entre 1971-2000 e 2071-2100 para RCP4.5 e RCP8.5 respetivamente). Numa estrutura típica de pavimento este aumento da temperatura de serviço pode significar no cenário RCP4.5 a redução do N_{80}^{adm} de 14% no critério de fadiga e de 18% no critério de deformação permanente e no cenário RCP8.5 de 39% no critério de fadiga e de 51% no critério da deformação permanente. Estes resultados apontam para impactos muito significativos da subida de temperatura na vida útil dos pavimentos, com reduções superiores a 6 anos para o critério da fadiga e até quase 9 no critério da deformação permanente anos no cenário RCP8.5. Se em lugar do método da Shell se utilizasse uma distribuição horária média da temperatura mensal nos pavimentos dos pavimentos usados como exemplo (Picado-Santos, 2000), o efeito na vida útil mencionado ainda seria mais gravoso.

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.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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>.
- Branco, F., Pereira, P., & Picado-Santos, L. (2005). *Pavimentos Rodoviários*. Edições Almedina. Portugal.
- 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>.
- Carmo, M. C., (2016). *Normal Climatológica 1986-2015*, Edições IPCB, Instituto Politécnico de Castelo Branco, Castelo Branco.

- Climate Data (2024) Clima em Castelo Branco (Portugal). Acedido em 5/10/2024: <https://pt.climate-data.org/europa/portugal/castelo-branco/castelo-branco-4315/#climate-table>,
- CMCB (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.
- 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.
- 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.
- 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.
- INIR (2012). *Directivas para a Concepção de Pavimentos - Critérios de Dimensionamento de Pavimentos*. Instituto de Infraestruturas Rodoviárias I.P., Lisboa
- IPMA (2024). Normais climatológicas. Instituto Português do Mar e da Atmosfera, Acedido em 30/09/2024: <https://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/>
- 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>
- 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.
- 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>
- OIdL (1945). *O Clima de Portugal*, Observatório do Infante dom Luiz, Lisboa.
- 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>
- Portal do Clima (2024). Modelos climáticos. Acedido em 27/09/2024: <http://portaldoclima.pt/pt/o-projeto/metodologia/modelos-climaticos/>
- SMN (1970). *O Clima de Portugal*, Serviço Meteorológico Nacional, Lisboa.
- Shell (2003). *The Shell Bitumen Handbook Fifth edition*. Thomas Telford Ltd London
- Shell (1978). *Shell Pavement Design Manual — Asphalt Pavements and Overlays for Road Traffic*. Shell International Petroleum Company Ltd., London.
- 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.
- 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>
- 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.
- Tuel, A., Eltahir, E. (2020). Why Is the Mediterranean a Climate Change Hot Spot?. *Journal of Climate*, 33 (14).
- Willway, T., Reeves, S., Baldachin, L. (2008). *Maintaining pavements in a changing climate*. TSO.