

## **Roteiro para adaptação climática de pontes de betão armado: Ponte sobre o Rio Angueira**

**E. Figueiredo**<sup>1</sup>

**I. Moldovan**<sup>2</sup>

**L.O. Santos**<sup>3</sup>

**L. Dias**<sup>4</sup>

### **RESUMO**

A maioria dos colapsos de pontes ocorre devido à combinação simultânea de vários fatores, muitas vezes durante ou após um evento natural extremo, que tem a particularidade de explorar vulnerabilidades estruturais escondidas. Foi assim em Portugal com o colapso da Ponte Hintze Ribeiro, cuja vulnerabilidade ao nível das fundações foi exposta durante um período de cheia, e em Itália com a Ponte Morandi, cuja vulnerabilidade ao nível da ligação dos tirantes ao tabuleiro foi manifestada durante a ocorrência de chuva intensa. De acordo com um relatório da Comissão Europeia, o impacto da pressão climática já representa 30% a 50% dos custos atuais de manutenção de estradas na Europa. Entretanto, o número de fenómenos climáticos extremos parece estar a aumentar, em virtude de alterações no sistema climático provocadas pelas emissões de gases com efeito de estufa. Estarão as pontes mais vulneráveis a colapsos em função dos fenómenos climáticos extremos? Será a adaptação às alterações climáticas uma nova dimensão na reabilitação? Este artigo pretende sintetizar um roteiro para adaptação climática de pontes de betão armado, bem como apresentar um plano de adaptação com base na realidade da ponte sobre o Rio Angueira.

**Palavras-chave:** Pontes; Betão Armado; Alterações Climáticas; Adaptação; Resiliência.

### **1. INTRODUÇÃO**

A maioria das pontes colapsam devido à combinação simultânea de vários fatores, frequentemente na sequência de um evento natural extremo [1]. O evento natural tem a particularidade de explorar vulnerabilidades estruturais escondidas. Foi assim em Portugal em 4 de março de 2001 com o colapso da Ponte de Hintze Ribeiro, em Entre-os-Rios, cuja vulnerabilidade ao nível das fundações foi exposta com o aumento do caudal da água no rio Douro durante um período de cheia. A queda do tabuleiro deveu-se ao colapso de um dos pilares em resultado do fenómeno de erosão localizado no leito aluvionar, resultando na formação de cavidades junto da fundação do pilar. Note-se que a erosão resulta da existência de obstáculos (pilares e encontros) no seio do escoamento da água do rio. Em Itália, a 14 de agosto de 2018, a ponte de Génova colapsou parcialmente durante a ocorrência de chuva intensa, em virtude da vulnerabilidade ao nível da ligação dos tirantes ao tabuleiro.

---

<sup>1</sup> Faculdade de Engenharia, Universidade Lusófona, Lisboa, Portugal, [eloi.figueiredo@ulusofona.pt](mailto:eloi.figueiredo@ulusofona.pt) | CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal

<sup>2</sup> Faculdade de Engenharia, Universidade Lusófona, Lisboa, Portugal, [dragos.moldovan@ulusofona.pt](mailto:dragos.moldovan@ulusofona.pt) | CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal

<sup>3</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal. [luisosantos@lnec.pt](mailto:luisosantos@lnec.pt)

<sup>4</sup> cE3c: Centre for Ecology, Evolution and Environmental Changes, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 1749-016 Lisboa, Portugal. [lfdias@ciencias.ulisboa.pt](mailto:lfdias@ciencias.ulisboa.pt)

Em julho de 2021, as cheias e inundações na Alemanha mostraram a vulnerabilidade das infraestruturas à precipitação extrema de curta duração. Várias pontes foram destruídas e estradas interditadas. Em julho de 2022, a onda de calor na Europa expôs a vulnerabilidade das infraestruturas aos extremos máximos diários da temperatura. Por exemplo, no Reino Unido alguns elementos estruturais da ponte centenária de Hammersmith foram envolvidos com película de alumínio de forma a refletir os raios solares e minimizar dilatações térmicas e fissuração do material; nas linhas férreas, alguns segmentos de carris foram pintados de branco de forma a reduzir os danos relacionados com as expansões térmicas.

Em Portugal, a 30 de maio de 2023, e de acordo com os órgãos de comunicação social, a queda intensa de granizo provocou "prejuízos imensos" nas vinhas na zona de Porrais. A subida das águas de um ribeiro derrubou uma ponte rodoviária na Ribeirinha, concelho de Murça. A 17 de junho de 2023, uma ponte no centro da Sérvia desabou após dias de chuva forte; os pilares cederam sob a pressão da quantidade de água que o rio teve de escoar.

Esta vulnerabilidade tem um custo para a sociedade. Por exemplo, de acordo com um relatório da Comissão Europeia, o impacto da pressão climática representa já 30% a 50% dos custos atuais de manutenção de estradas na Europa [2]. Então, como e quando adaptar? Como podemos aumentar a resiliência estrutural, isto é, reduzir a perda de funcionalidade e o tempo para recuperação devido a danos? A adaptação das pontes às alterações climáticas deverá ser feita tanto para as pontes a construir como para as existentes.

Para as pontes a construir, a resiliência climática pode ser garantida através da escolha da localização e do dimensionamento em fase de projeto, tendo como base o clima atual e as projeções futuras. Isso é particularmente importante no caso de infraestruturas com vida útil superior a 20 anos e, em particular, as pontes com vida útil de projeto de 100 anos [3], cujas decisões de investimento influenciam o bem-estar e a segurança das gerações futuras. Nestes casos, ajustes aos regulamentos podem resolver o problema, pois em boa verdade a periodicidade de revisão dos mesmos combina com o período necessário para identificar alterações climáticas. Para as infraestruturas de transporte, de acordo com a Comissão Global para a Adaptação, estudos mostram que uns ligeiros aumentos dos custos iniciais de 3% podem alavancar benefícios várias vezes superiores aos custos iniciais [4]. No entanto, os mapas europeus atuais para dimensionamento térmico de edifícios e pontes são baseados em dados climáticos que, com algumas exceções, têm na sua maioria mais de 15 anos e ignoram os efeitos potenciais das alterações climáticas [5]. Não obstante, em 1997 no Canadá surgiu um bom exemplo de adaptação em fase de projeto, onde o tabuleiro da Ponte da Confederação foi construído mais alto para acomodar uma possível subida de um metro do nível médio da água do mar. Na Suécia em 2012, no vale do rio Gota, uma nova estrada e uma linha férrea foram elevadas até um máximo de 1,5 m para acomodar possíveis subidas do nível médio da água do mar. Para as pontes existentes, a resiliência climática pode ser garantida de forma pró-ativa através de atividades de manutenção, conservação e reforço estrutural.

## **2. ROTEIRO PARA ADAPTAÇÃO CLIMÁTICA DAS PONTES DE BETÃO ARMADO**

### **2.1 Impacto das alterações climáticas nas pontes**

As pontes são normalmente construídas de forma a serem resilientes às condições climáticas do passado. O que acontecerá se o clima deixar de ser estável? Uma ação de adaptação antecipada e bem planeada pode economizar dinheiro e, eventualmente, salvar vidas humanas.

De acordo com o AR5-IPCC [6], a influência humana no sistema climático é clara. Emissões antropogénicas recentes de gases com efeito de estufa têm tido impactos generalizados nos sistemas humanos e naturais. Embora a magnitude dessas alterações esteja envolvida em grande incerteza, o facto de que o nosso clima está a mudar é inequívoco. Apesar de haver “certeza das incertezas”, devemos “esperar para ver” até entendermos tudo sobre alterações climáticas? Esta é uma opção científica inaceitável e extremamente perigosa.

As alterações climáticas são atualmente uma das maiores preocupações para a integridade das pontes existentes, pois é um fator que pode contribuir para a deterioração acelerada dos materiais (ex. carbonatação do betão), introdução de esforços internos e aumentos de tensões, alteração das condições de apoio (ex. erosão do leito dos rios). A Figura 1 resume os principais impactos das alterações climáticas nas pontes em função das alterações projetadas.

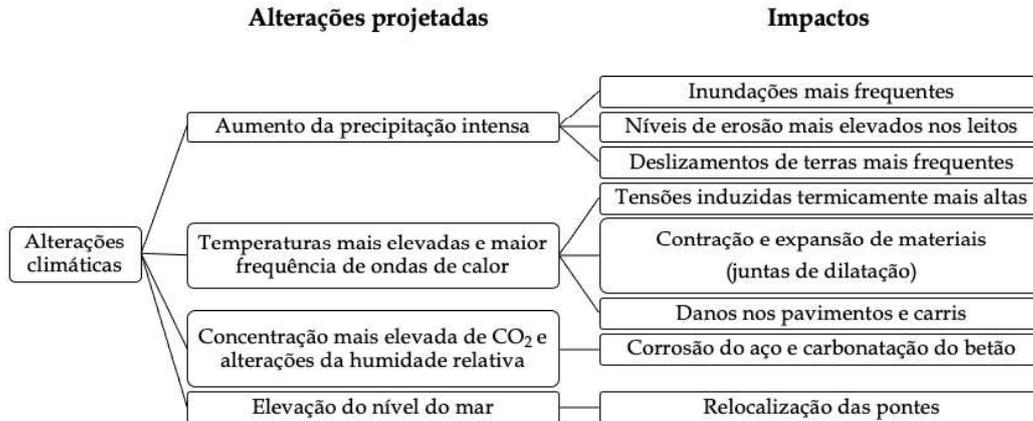


Figura 1. Impactos das alterações climáticas em pontes de betão armado [7].

Devido ao período de vida útil (>100 anos), ao custo de construção significativo (ex. Ponte Vasco da Gama ±1000 milhões de euros) e ao grande valor económico, tornar as pontes resistentes às alterações climáticas é um desafio importante.

Não são as alterações médias no clima que geralmente são perceptíveis, mas sim os eventos extremos associados (tais como cheias, inundações e ondas de calor), que causam o maior impacto na segurança, funcionalidade e durabilidade das nossas pontes. As projeções dos modelos climáticos indicam maior frequência e intensidade de tais eventos à medida que o século XXI avança. Por exemplo, no caso da temperatura, o aumento da média e da variação levam à existência de mais casos extremos de temperatura (temperaturas máximas muito altas e ondas de calor).

## 2.2 Cenários de alterações climáticas

Existem vários cenários de alterações climáticas (Figura 2) que consideram as emissões e concentrações de gases com efeito de estufa e aerossóis e gases quimicamente ativos, bem como alterações nos usos dos solos. Estes cenários são definidos através de trajetórias de concentração representativas (RCPs - *Representative Concentration Pathways*). Cada RCP fornece apenas um dos muitos cenários possíveis que levariam a modificações específicas do forçamento radiativo, nomeadamente: RCP 8.5 – é o pior cenário de alteração climática, apesar de sua relativa improbabilidade (cenário de emissões elevadas); RCP 6.0 – as emissões atingem o pico por volta de 2080, depois declinam; RCP 4.5 – é um cenário intermediário de alteração climática (cenário mais provável); RCP 2.6 – exige que as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) comecem a diminuir até 2020 e cheguem a zero até 2100 (cenário de mitigação de baixas emissões).

## 2.3 Modelos climáticos

Os modelos climáticos (Figura 3) atualmente disponíveis para representar o sistema climático são os modelos de circulação geral atmosfera-oceano (AOGCM - *atmosphere-ocean global climate models*). Modelos climáticos regionais (RCMs) são determinados a partir de modelos climáticos globais (GCMs), utilizando técnicas de redução de escala, que permitem obter simulações climáticas de maior resolução para regiões limitadas.

Os modelos climáticos são construídos em função da nossa compreensão da física básica e dos processos da Terra e são fundamentados em observações e medições. Os modelos consistem em diferentes

módulos que descrevem a atmosfera, oceanos, gelo/neve e a superfície terrestre, procurando representar o clima global em termos de caixas empilhadas lado a lado e umas sobre as outras. Cada caixa contém equações matemáticas que representam as características físicas e os processos. As equações são convertidas em código computacional de forma a definir variáveis climáticas e/ou indicadores de saída em forma de projeções.

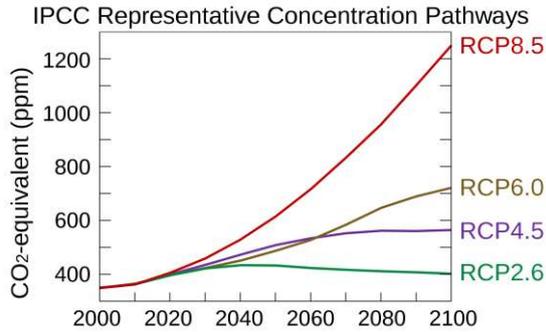


Figura 2. Cenários climáticos

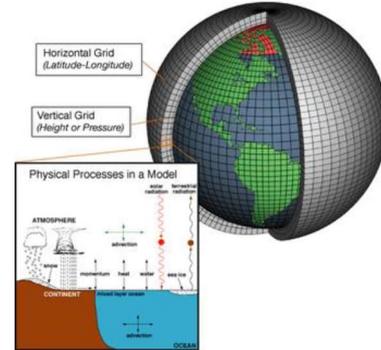


Figura 3. Modelos climáticos globais.

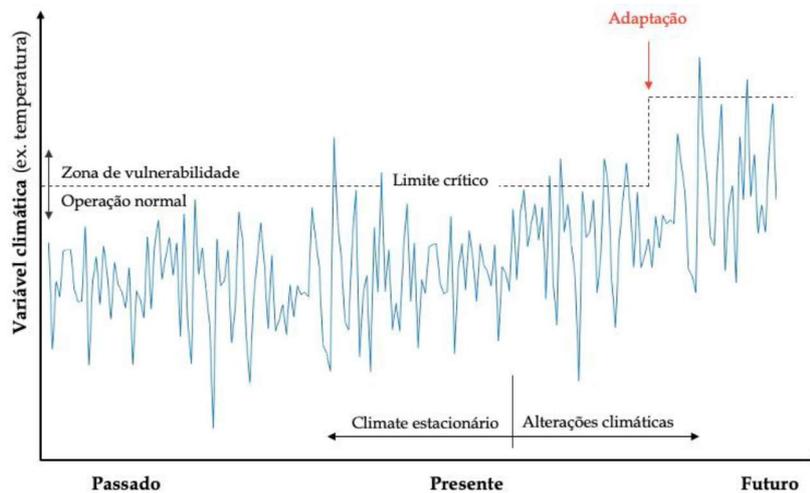


Figura 4. Operação normal e zona de vulnerabilidade antes e depois da adaptação [7].

## 2.5 Resiliência estrutural

A resiliência estrutural de pontes é genericamente definida pela capacidade das pontes de absorver, resistir e recuperar rapidamente de eventos adversos severos. Em particular, a resiliência estrutural pode ser definida pelo "triângulo de resiliência" que representa a perda de funcionalidade (ou serviço) devido à interrupção (ou dano) provocada por um evento adverso e o tempo de recuperação, tal como esquematizado na Figura 5. A resiliência refere-se à área cinzenta: quanto menor a área, maior a resiliência.



Figura 5. Resiliência estrutural de pontes

## **2.5 Adaptação às alterações climáticas**

Neste contexto, adaptação significa intervir nas pontes (ou na envolvente) de forma a diminuir a vulnerabilidade e aumentar a sua resiliência às alterações climáticas. Por exemplo, a temperatura, enquanto variável climática, pode aumentar os seus valores extremos (levando, por exemplo, a ondas de calor mais frequentes e intensas) o que irá implicar que os limites críticos de comportamento estrutural sejam ultrapassados também com maior frequência.

Enquanto medidas de adaptação incremental, podem-se expandir a operação normal, alterando esses limites críticos por forma à interrupção ser reduzida (Figura 4). O sistema é considerado 'resiliente' dentro da operação normal. Alguns exemplos de medidas de adaptação climática são [7]:

- Projetar pontes para temperaturas máximas mais elevadas;
- Projetar pontes mais altas para acomodar a subida do nível médio da água do mar;
- Instalar juntas de dilatação mais largas;
- Pintar as pontes de branco para aumentar o efeito albedo;
- Reforçar ou proteger as fundações existentes;
- Aumentar a espessura do recobrimento de betão e usar aço inoxidável.

## **3. PLANO DE ADAPTAÇÃO: PONTE SOBRE O RIO ANGUEIRA**

A metodologia presente neste artigo é baseada na metodologia proposta pelo UK Climate Impacts Programme (UKCIP), adaptada à realidade portuguesa através da metodologia ADAM para avaliação de vulnerabilidades atuais, para elaboração de estratégias municipais de adaptação às alterações climáticas [8].

### **3.1 Localização e descrição estrutural**

A ponte sobre o rio Angueira (Figura 6) está inserida na estrada nacional N219, ligando os concelhos de Vimioso e Mogadouro, no distrito de Bragança (região de Trás-os-Montes).



Figura 6. Ponte sobre o Rio Angueira.

Estruturalmente, trata-se de uma ponte de betão armado e pré-esforçado com um comprimento total de 230 m dividido em três tramos (Figura 7): um tramo central com 115 m e dois tramos extremos com 57,5 m cada. A largura total do tabuleiro é de 11,8 m, sendo 9 m dedicados à faixa de rodagem. A secção transversal do tabuleiro é composta por um caixão monocelular com almas verticais de altura variável entre 7 m sobre os pilares e 2,5 m no meio vão central e nas zonas contíguas aos encontros. A espessura da laje inferior varia de 1,10 m nas secções junto aos pilares a 0,2 m nas secções de menor altura. A laje

superior, cuja espessura no eixo da secção é de 0,29 m, prolonga-se lateralmente, para além das almas do caixão, por duas consolas com vãos de 2,90 m. As fundações são diretas e os pilares possuem uma secção retangular oca de 5,50 m por 4,60 m. A altura dos pilares, medida desde a face inferior do tabuleiro até à face superior das sapatas, é de 42 m. Todo o tabuleiro foi construído pelo método dos avanços sucessivos em consola, partindo do coroamento dos pilares, tendo o fecho do tramo central sido efetuado no início de 1994.

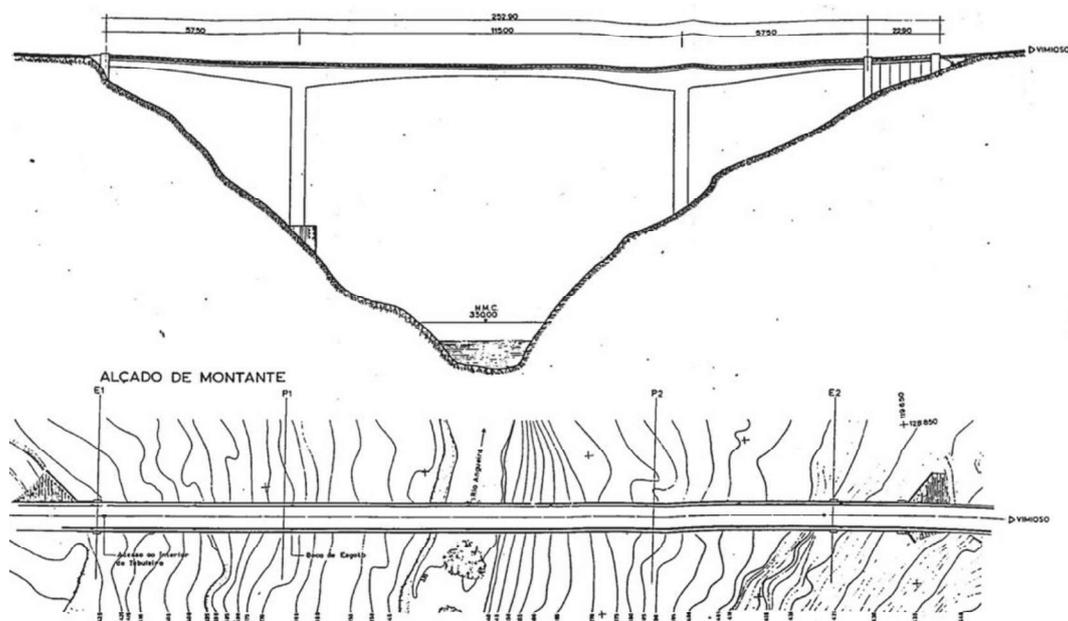


Figura 7. Esquema em alçado e planta da ponte sobre o Rio Angueira.

### 3.2 Projeções climáticas

As variáveis climáticas (temperatura, humidade relativa, precipitação) ou índices (ondas de calor) de estudo, foram definidas em função da experiência técnica de engenharia de pontes e dos impactos observados nos últimos anos nas pontes. Todas as projeções apresentadas nesta secção foram obtidas através do Portal do Clima (<http://portaldoclima.pt/>), na área geográfica da ponte sobre o Rio Angueira no distrito de Bragança.

O Quadro 1 resume as principais variáveis climáticas e índices, em termos de anomalia, para o caso em estudo, ao nível da temperatura máxima, humidade relativa média do ar, número de dias com temperatura superior a 35 °C, número de ondas de calor e precipitação. Uma anomalia é definida como a diferença do clima futuro projetado (2071-2100) em comparação com o período de referência (1971-2000). Os resultados presentes no Quadro 1 baseiam-se em nove modelos regionais. Os valores máximos e mínimos correspondem aos valores do modelo com maior e menor sinal das alterações. A análise das *variáveis climáticas* e dos *índices* permite concluir que:

- O aumento da temperatura (e índices associados) é a variável climática mais significativa. Para o cenário RCP 8.5 projeta-se (2071-2100) um aumento médio da temperatura máxima de 5,4 °C e um aumento máximo de 25 ondas de calor;
- As anomalias na humidade relativa ( $\leq 5\%$ ) e precipitação não terão impacto significativo na ponte. Em termos de precipitação, constata-se uma redução do número de dias com precipitação (-39) e um pouco significativo (7) aumento do número de dias com precipitação  $\geq 20$  mm; a estes valores, junta-se a particularidade de o rio assumir um caudal muito baixo ao longo do ano e as fundações estarem fundadas em terreno rochoso e elevadas em relação ao nível médio da água do rio.

Quadro 1. Principais variáveis climáticas e índices para o caso de estudo.

<i>Variável ou índice</i>	<i>1971-2000</i>	<i>2071-2100</i>	
	<i>Referência</i>	<i>RCP 4.5 Anomalia</i>	<i>RCP 8.5 Anomalia</i>
<b>Temperatura máxima (°C)</b>			
Máximo	21,7	+2,5	+5,4
Média	20,4	+2,1	+5
Mínima	18,8	+1,4	+4,6
<b>Humidade relativa média do ar (%)</b>			
Máximo		0	-1
Média		-1	-4
Mínima		-4	-5
<b>Número de dias com temperatura <math>\geq 35^{\circ}\text{C}</math></b>			
Máximo		+11	+46
Média		+6	+23
Mínima		+1	+9
<b>Ondas de calor: Número dias consecutivos muito quentes (<math>35^{\circ}\text{C}</math>)</b>			
Máximo		+15	+25
Média		+7	+15
Mínima		+4	+8
<b>Precipitação</b>			
Número máximo de dias $\geq 20$ mm		+1	+5
Número máximo de dias $\geq 50$ mm		0	+2
Número de dias com precipitação ( $\geq 1$ mm)		-12	-39

### 3.3 Impactos climáticos

O Quadro 2 resume os impactos climáticos associados aos principais eventos (em função das variáveis climáticas e índices) para o caso em estudo. Um evento é definido como uma percepção qualitativa de vulnerabilidade em pontes, obtida através do levantamento histórico e recorrendo a referências bibliográficas e meios de comunicação social. Os principais eventos definidos para o caso em estudo são: ondas de calor, temperaturas elevadas e precipitação excessiva com potencial de inundações e cheias. Os impactos esperados são: fissuração do betão causada por gradientes térmicos, juntas de dilatação com abertura insuficiente para acomodar dilatações, inundações na envolvente e cheias provocadas pela subida da água do rio. Foi atribuída uma importância baixa, com valor unitário, aos impactos provocados pela precipitação, pois as fundações estão sobre rocha a meia encosta e o tabuleiro está sobre pilares com mais de 40 m de altura o que evita o galgamento do ponto de vista prático.

### 3.4 Vulnerabilidades climáticas e matrizes de risco

O Quadro 3 resume o nível de risco associado aos impactos climáticos identificados Quadro 2. A frequência da ocorrência do evento no presente está associada ao número de casos identificados no levantamento realizado. Por outro lado, nos períodos futuros, a frequência é obtida em função das anomalias identificados no Quadro 1. A Figura 8 ilustra as matrizes de risco, com referência aos impactos climáticos na ponte, em função da magnitude e frequência para cada período (presente, 2041-2070 e 2071-2100). Observa-se um aumento do risco ao nível da ocorrência de ondas de calor e temperaturas elevadas, com impacto na fissuração do betão e insuficiência das juntas de dilatação.

Quadro 2. Principais impactos climáticos para o caso de estudo.

Ref. <sup>a</sup>	Impactos / Consequências								
	Clima Presente			Clima futuro			7. Importância (impactos) (1-3)		
	1. Tipo de evento climático	2. Impactos passados	3. Projeções climáticas (2071-2100)	4. Impactos negativos diretos (ameaças)	5. Impactos negativos indiretos	6. Impactos positivos (oportunidades)			
A	Ondas de Calor	Fissuração do betão	25	Redução da segurança estrutural	Aumento dos custos de manutenção	-	1	2	3
B	Temperaturas Elevadas	Juntas de dilatação	5,4	Esmagamento do betão estrutural no tabuleiro e nos encontros	Perturbação da via	-	1	2	3
C	Precipitação excessiva	Inundações	2	Galgamento/Rotura do tabuleiro	Custos de reconstrução	-	1	1	1
D	Precipitação excessiva	Cheias	2	Erosão do leito do rio/Perda de estabilidade das fundações	Custos de reconstrução	-	1	1	1

Quadro 3. Nível de risco associado aos impactos climáticos.

Ref. <sup>a</sup>	1. Tipo de evento climático	2. Impactos	3. Frequência da ocorrência do evento	4. Magnitude da consequência (1-3)	5. Risco (3.) x (4.)	6. Frequência da ocorrência do evento	7. Magnitude da consequência (1-3)	8. Risco (6.) x (7.)	9. Frequência da ocorrência do evento	10. Magnitude da consequência (1-3)	11. Risco (9.) x (10.)						
												Presente		Período futuro (2041-2070)		Período futuro (2071-2100)	
												A	Ondas de Calor	Fissuração do betão	2	1	2
B	Temperaturas Elevadas	Juntas de dilatação	2	1	2	2	2	4	3	2	6						
C	Precipitação excessiva	Inundações	1	1	1	1	1	1	1	1	1						
D	Precipitação excessiva	Cheias	1	1	1	1	1	1	1	1	1						

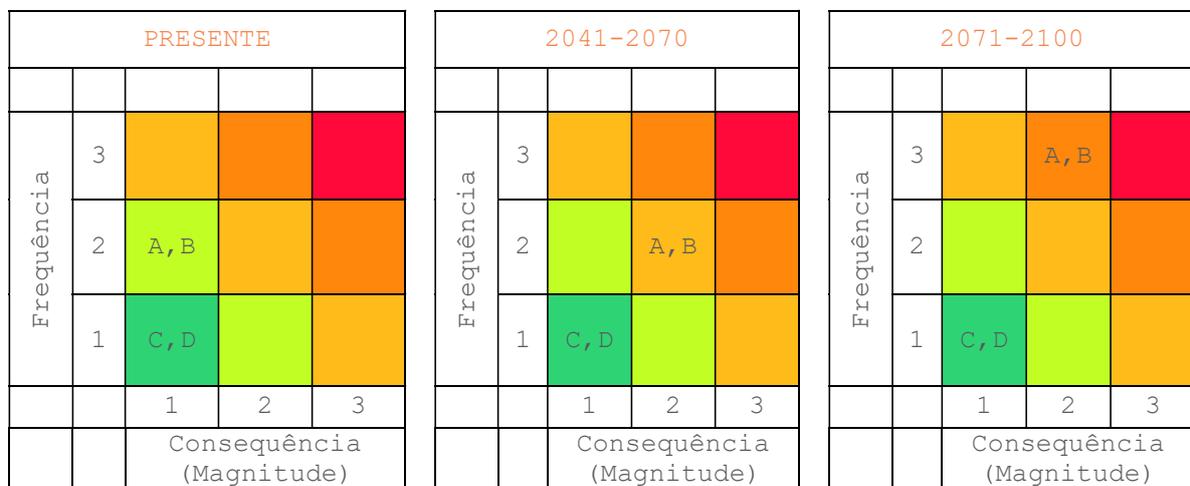


Figura 8. Matrizes de risco.

### 3.5 Identificação e avaliação das medidas de adaptação

O Quadro 4 identifica e descreve sumariamente algumas medidas de adaptação correntes em função do impacto esperado na fonte. O Quadro 5 resume a avaliação das medidas de adaptação em função de uma análise multicritério.

Quadro 4. Identificação das medidas de adaptação.

1. ID	2. Medida de adaptação	3. Descrição da medida	4. Tipo de medida	5. Característica face à incerteza	6. Observações
1	Pintar a ponte de branco	Aumentar o efeito albedo - aumentar a reflexão dos raios solares de forma a evitar a expansão do tabuleiro.	Infraestruturas cinzentas	Low-regret*	-
2	Alterar as juntas de dilatação	Aumentar o campo de movimentação das juntas de dilatação, de forma a acomodar as dilatações do tabuleiro.	Infraestruturas cinzentas	Low-regret*	-
3	Proteção da fundação	Proteger a fundação da ponte com enrocamento, de forma a evitar a erosão acelerada do leito do rio.	Infraestruturas cinzentas	Low-regret*	-
4	Reconverter as margens do rio	Aumentar a capacidade de vazão do rio e assim diminuir o efeito de erosão junto das fundações.	Infraestruturas verdes	Win-win**	Criação de zonas de recreio associadas à reconversão.
5	Selar as fissuras no betão	Injetar calda de cimento nas fissuras do betão	Infraestruturas cinzentas	Low-regret*	-

\* Baixo arrependimento, \*\* Sempre vantajosa

Quadro 5. Avaliação das medidas de adaptação: análise multicritério.

1. ID	2. Opção de adaptação	Critério (Prioridade)								12. Média final (1 a 5)	13. Número de ordem
		5. Eficácia (1 a 5)	6. Eficiência (1 a 5)	7. Equidade (1 a 5)	8. Flexibilidade (1 a 5)	9. Legitimidade (1 a 5)	10. Urgência (1 a 5)	11. Sinergias (1 a 5)			
1	Pintar a ponte de branco	3.00	2.00	3.00	1.00	5.00	2.00	4.00	2.86	5	
2	Alterar as juntas de dilatação	5.00	5.00	3.00	2.00	5.00	2.00	3.00	3.57	1	
3	Proteção da fundação	5.00	4.00	3.00	4.00	2.00	1.00	3.00	3.14	4	
4	Reconverter as margens do rio	3.00	3.00	5.00	5.00	1.00	1.00	5.00	3.29	3	
5	Selar as fissuras no betão	4.00	4.00	3.00	4.00	5.00	2.00	3.00	3.57	1	

As medidas de adaptação identificadas oferecem, do ponto de vista prático, resultados através da minimização dos riscos associados à sua implementação, ou por outras palavras, através de melhores rácios custo-eficácia face às incertezas. As infraestruturas “cinzentas” correspondem a intervenções físicas de engenharia com o objetivo de tornar as pontes melhores preparados para lidar com eventos extremos. As infraestruturas “verdes” (ex. zonas de recreio) contribuem para o aumento da resiliência dos ecossistemas e utilizam as funções dos ecossistemas para alcançar soluções de adaptação mais facilmente implementáveis e de melhor custo-eficácia que as infraestruturas “cinzentas”.

Em termos de medidas de adaptação, observa-se que a reconversão das margens do rio é uma solução de infraestrutura verde com maximização de proveitos, ao nível do aumento da capacidade de vazão do rio e ao nível da criação de zonas de recreio para a população. No entanto, através da análise multicritério simplificada, observa-se que a alteração das juntas de dilatação e a selagem de fissuras são as medidas de adaptação mais expectáveis em função da variável climática associada à temperatura.

## CONCLUSÕES

Este artigo sintetiza um roteiro para adaptação climática de pontes de betão armado e apresenta um plano de adaptação com base na realidade da ponte sobre o Rio Angueira. A análise das variáveis climáticas e dos índices permitiu concluir que o aumento da temperatura (e ondas de calor associadas) é a variável climática mais significativa. Para o cenário mais desfavorável (RCP8.5) prevê-se (2071-2100) um aumento médio da temperatura máxima de 5,4 °C (e um aumento máximo de 25 ondas de calor por ano). Desta forma, para o cenário mais desfavorável, os impactos mais expectáveis na ponte são a fissuração do betão e insuficiência das juntas de dilatação. Assim, em termos de medidas de adaptação, prevê-se que possa haver necessidade de selagem das fissuras no betão e substituição das juntas de dilatação.

Neste trabalho, a metodologia foi implementada através da avaliação dos níveis de risco em função eventos definidos como perceções qualitativas de vulnerabilidade de pontes. Contudo, no futuro deverá implementar-se uma metodologia robusta, tendo em conta as propriedades mecânicas da estrutura e de forma a aumentar o rigor da adaptação.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia através do financiamento UIDB/04625/2020 da unidade de investigação CERIS (DOI: 10.54499/UIDB/04625/2020).

## REFERÊNCIAS

- [1] E. Figueiredo and J. Brownjohn, “Three decades of statistical pattern recognition paradigm for SHM of bridges,” *Struct Health Monit*, vol. 21, no. 6, pp. 3018–3054, 2022, doi: 10.1177/14759217221075241.
- [2] European Commission, “Adapting infrastructure to climate change. An EU strategy on adaptation to climate change,” European Commission, Brussels, 16.4.2013 SWD(2013) 137 final, 2013. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52013SC0137&from=en>
- [3] NP EN 1990, *Eurocódigo – Bases para o projeto de estruturas*. 2009.
- [4] GCA, “Adapt Now: A global call for leadership on climate resilience,” 2019.
- [5] A. Athanasopoulou *et al.*, “Thermal design of structures and the changing climate,” EUR 30302 EN, Publications Office of the European Union, JRC Technical Report, JRC121351, 2020. doi: 10.2760/128894.
- [6] IPCC, “Climate Change 2013: The Physical Science Basis- Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.” 2013. [Online]. Available: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/>
- [7] E. Figueiredo *et al.*, “A Roadmap for an Integrated Assessment Approach to the Adaptation of Concrete Bridges to Climate Change,” *Journal of Bridge Engineering*, vol. 28, no. 6, p. 3123002, Jun. 2023, doi: 10.1061/JBENF2.BEENG-5735.
- [8] L. Dias, T. Capela Lourenço, and V. Karadzic, “ClimAdaPT.Local – Manual Avaliação de Vulnerabilidades Atuais.” Lisboa, ISBN: 978-989-99084-8-2., 2016.