



RESILIÊNCIA DAS OBRAS PORTUÁRIAS E MARÍTIMAS ÀS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS: UMA ABORDAGEM METODOLÓGICA EXPLORATÓRIA

RAFAEL FILIPE NUNES RODRIGUES

Agosto de 2025

**RESILIÊNCIA DAS OBRAS PORTUÁRIAS E MARÍTIMAS ÀS
ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS: UMA ABORDAGEM METODOLÓGICA
EXPLORATÓRIA**

**Resilience of Port and Maritime Structures to Climate Change:
An Exploratory Methodological Approach**

Rafael Filipe Nunes Rodrigues

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Geotécnica e Geoambiente**

Orientador: Professor Hugo Guedes Lopes (ISEP & APDL)

Coorientador: Professor Helder I. Chaminé (ISEP)

Júri

Presidente

Helder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé, Professor Coordenador com Agregação, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Vogais

Tiago André Martins de Azevedo Abreu, Professor Coordenador, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Hugo Guedes Lopes, Professor Adjunto Convidado, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto e Diretor de Desenvolvimento e Sustentabilidade na APDL – Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo

[página propositadamente em branco]

Resumo

A presente dissertação avalia a resiliência de estruturas portuárias e marítimas perante as alterações climáticas, com foco na degradação provocada por cloretos em elementos de betão e de aço. O estudo contempla oito tipos de betão e seis tipos de aço, analisados à luz de três cenários climáticos (*Representative Concentration Pathways (RCP) 2.6, 4.5 e 8.5*), com base em parâmetros como o coeficiente de difusão, o recobrimento nominal, a concentração superficial de cloretos e a perda de espessura por corrosão. Para avaliar o desempenho estrutural, foram calculados os momentos de dimensionamento, os esforços normais e transversos e os respetivos rácios de solicitação. As simulações incidiram sobre estruturas típicas de infraestruturas portuárias, como quebra-mares, estacas-pranchas metálicas, pilares tubulares, passadiços e defensas metálicas. Os resultados revelam que materiais avançados, como o betão com inibidores de corrosão, o betão de enchimento e o betão projetado, bem como os aços inoxidáveis, mantêm níveis seguros de desempenho até 100 anos. Em contraste, materiais convencionais, como o aço carbono estrutural, os aços galvanizados e os aços de alta resistência, evidenciam falência estrutural prematura. A dissertação sublinha ainda a importância da seleção criteriosa de materiais, do reforço preventivo e da implementação de sistemas de monitorização para garantir a durabilidade em cenários climáticos adversos.

Palavras-chave: Estruturas portuárias, alterações climáticas, corrosão, betão, aço, durabilidade.

[página propositadamente em branco]

Abstract

This dissertation evaluates the resilience of port and maritime structures in the face of climate change, with a focus on the degradation caused by chlorides in concrete and steel elements. The study includes eight types of concrete and six types of steel, analyzed in the light of three climate scenarios (Representative Concentration Pathways (RCP) 2.6, 4.5, and 8.5), based on parameters such as the diffusion coefficient, nominal coating, surface concentration of chlorides, and loss of thickness due to corrosion. To assess structural performance, design moments, normal and transverse forces, and the respective stress ratios were calculated. The simulations focused on typical port infrastructure structures, such as breakwaters, steel sheet piles, tubular pillars, gangways, and metal fenders. The results show that advanced materials, such as concrete with corrosion inhibitors, filler concrete, and shotcrete, as well as stainless steels, maintain safe levels of performance for up to 100 years. In contrast, conventional materials such as structural carbon steel, galvanized steel, and high-strength steels show premature structural failure. The dissertation also emphasizes the importance of carefully selecting materials, providing preventive reinforcement, and implementing monitoring systems to ensure durability in adverse climatic conditions.

Keywords: Port structures, climate change, corrosion, concrete, steel, durability.

[página propositadamente em branco]

Agradecimentos

Gostaria de expressar o meu sincero agradecimento ao meu orientador, Professor Hugo Lopes (APDL & ISEP), pelo acompanhamento dedicado, pela orientação técnica rigorosa e pelo incentivo constante ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho de estágio.

Agradeço a uma pessoa muito especial, Beatriz Seca, que nunca me deixou desistir, mesmo nos momentos mais difíceis.

Aos colegas da minha turma, que partilharam comigo tantos desafios, conquistas e aprendizagens, deixo uma palavra de apreço e amizade.

Por fim, agradeço a todos os professores que me acompanharam ao longo da licenciatura e do mestrado em engenharia geotécnica e geoambiente, pelo conhecimento transmitido, pela exigência formativa e pela inspiração que me proporcionaram.

A todos, o meu sincero *obrigado*.

[página propositadamente em branco]

Índice

1. Introdução.....	3
1.1. Objetivos	3
1.2. Metodologias	4
2. Enquadramento Geral	9
2.1. Contextualização	9
2.1.1. Conceito e funções dos Portos Marítimos	9
2.1.2. Principais tipos de estruturas e obras portuárias e marítimas	9
2.1.3. Materiais.....	11
2.1.4. Importância Histórica	13
2.1.5. Evolução dos portos marítimos	14
2.2. Alterações climáticas	16
2.2.1. Caracterização e fundamentação.....	16
2.2.2. Principais impactos das alterações climáticas nos grandes portos mundiais	18
2.2.3. Impactos diretos e indiretos das alterações climáticas nos portos	22
2.2.4. Modelo metodológico de adaptação climática aplicado às infraestruturas.	23
2.3. Resiliência das obras portuárias e marítimas	26
2.3.1. Resiliência e instrumentação.....	26
2.3.2. Aumento da resiliência dos portos.....	27
2.3.3. Resiliência das infraestruturas portuárias e as alterações climáticas.....	28
2.3.4. Estratégias e referências técnicas para a resiliência climática em portos marítimos	30
3. Porto de Leixões	35
3.1. Enquadramento Histórico	35
3.1.1. Porto de Leixões	35
3.1.2. Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo (APDL).....	39
3.2. Caracterização do Porto de Leixões	40

3.2.1.	Principais obras Porto de Leixões	41
3.2.2.	Navios e as principais características	42
3.2.3.	Situação atual do Porto de Leixões	43
3.3.	Impacto na envolvente portuária	44
3.3.1.	Impactos do porto de Leixões na população residente	45
3.3.2.	Previsão do número de habitantes no local de estudo	45
3.3.3.	Previsão do número de edifícios no local de estudo	47
3.4.	Património Geológico.....	50
3.5.	Enquadramento do Local.....	51
3.5.1.	Enquadramento Geográfico	51
3.5.2.	Enquadramento Geológico	52
3.5.3.	Enquadramento Geomorfológico	55
3.5.4.	Enquadramento Geotécnico	56
3.5.5.	Enquadramento Tectonossísmico	58
3.5.6.	Enquadramento Hidrogeológico	59
3.5.7.	Enquadramento Hidrodinâmico e Marés.....	61
4.	Uma Análise de Cenários.....	65
4.1.	Análise de Cenários	65
4.1.1.	Caracterização climática em Portugal	65
4.1.2.	Fenómenos Climáticos – Temperatura	68
4.1.3.	Fenómenos Climáticos - Precipitação e Vento.....	71
4.1.4.	Fenómenos Climáticos Extremos – Temperatura Máxima	73
4.1.5.	Fenómenos Climáticos Extremos – Temperatura mínima.....	75
4.1.6.	Fenómenos Climáticos Extremos – Precipitação	77
4.1.7.	Fenómenos Climáticos Extremos – Vento	79
4.2.	Monitorização.....	81
4.2.1.	Importância da monitorização	81
4.2.2.	Caracterização da monitorização	82
4.2.3.	Implementação dos métodos de monitorização	84
4.2.4.	Instrumentos de monitorização	86

5. Modelação Aplicada ao Porto de Leixões	91
5.1. Cálculo modelação RCP do Betão	91
5.2. Cálculo modelação RCP do Aço	109
5.3. Conclusões de Cálculo	138
5.4. Melhoria da Resiliência do porto de Leixões às Alterações Climáticas	140
6. Considerações Finais.....	145
7. Referências Bibliográficas	151

[página propositadamente em branco]

Lista de Figuras

Figura 1 - Fluxo de trabalho desenvolvido para a metodologia de adaptação a impactos derivados das alterações climáticas em sistemas de infraestruturas portuárias, tendo por base o enquadramento de adaptação do IPCC (adaptado de Fernandez-Pérez et al., 2024)	24
Figura 2 - Espaço de solução para infraestruturas portuárias com base na evolução temporal do risco climático. As linhas vermelhas e azuis representam a variação do risco para dois cenários diferentes (RCP 4.5 e 8.5) (retirado de Fernandez-Pérez et al., 2024).	25
Figura 3 - Mapa de demonstração da Costa do Mar desde a Villa de Matozinhos, até a Barra da Cidade do Porto (...)" Por Jozé Gomes da Cruz, Piloto das Naus de Guerra. 1775; Cópia de 1906. Arquivo APDL. (APDL).	36
Figura 4 - Construção do Porto de Leixões (1884-1892). Rochedos de Leixões e extremidades dos dois molhes. Foto: Emílio Biel. (APDL).	37
Figura 5 – Planta Porto de Leixões 2019 (Adaptado da APDL).	38
Figura 6 - Características principais de um navio (Adaptado (ShibataFenderTeam AG, 2019)).	41
Figura 7 – Número de residentes projetados por distritos e municípios no final do período de 2071 a 2100, sob RCP4.5 (CENSOS 2021) (Note-se que os intervalos da escala de cores não são uniformes, sendo divididos por quantis (0%, 1-20%, 21-40%, 41-60%, 61-80% e 81-100%)).	46
Figura 8 - Número de residentes projetados por distritos e municípios no final do período de 2071 a 2100, sob RCP8.5 (CENSOS 2021) (Note-se que os intervalos da escala de cores não são uniformes, sendo divididos por quantis (0%, 1-20%, 21-40%, 41-60%, 61-80% e 81-100%)) (Mourão et al., 2024).	47
Figura 9 - Número de edifícios projetados por distritos e municípios no final do período de 2071 a 2100, sob RCP4.5 (CENSOS 2021) (Note-se que os intervalos da escala de cores não são uniformes, sendo divididos por quantis (0%, 1-20%, 21-40%, 41-60%, 61-80% e 81-100%)).	48
Figura 10 - Número de edifícios projetados por distritos e municípios no final do período de 2071 a 2100, sob RCP8.5 (CENSOS 2021) (Note-se que os intervalos da escala de cores	

não são uniformes, sendo divididos por quantis (0%, 1-20%, 21-40%, 41-60%, 61-80% e 81-100%)) (Mourão et al., 2024).....	49
Figura 11 – Localização do Porto de Leixões (Retirado APDL).....	51
Figura 12 - Geologia encontrada na área <i>onshore</i> do Porto de Leixões (extracto da carta geológica de Portugal – Folha do Porto (1957); Retirado de Pacheco, 2013).	53
Figura 13 – Planta adaptada da campanha de prospeção geofísica (retirado de CONSULMAR, 2019).	54
Figura 14 - Enquadramento geomorfológico do Porto de Leixões (retirado de nemus, 2018).....	55
Figura 15 – Planta adaptada dos trabalhos de prospeção geológica-geotécnica Argonovia (retirada de Argonovia, 2019).	57
Figura 16 - Intensidade macrossísmica do território português (Retirado de Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil (ANEPC), 2014).	58
Figura 17 - Características das unidades hidrogeológicas (retirado de Nemus, 2018).....	60
Figura 18 - Os setores de subida do nível do mar e erosão costeira (Luís et al., 2024).....	66
Figura 19 - Alterações futuras projetadas na temperatura mínima e máxima diária em Portugal Continental, considerando o período 1971-2000 como referência. As diferentes linhas de cima para baixo representam as médias de todos os meses, DJF, MAM, JJA e SON, respetivamente. As diferentes colunas representam os períodos futuros considerando diferentes cenários de emissão de GEE (Adaptado Soares et al., 2024). ...	70
Figura 20 - Alterações futuras projetadas na precipitação total e na velocidade média diária do vento a 10 m, acumuladas em Portugal continental, apresentadas como variação percentual, considerando o período 1971-2000 como referência (ver imagem anterior) (Adaptado de Soares et al., 2024).....	74
Figura 21 - (a) Número médio anual de dias por ano em que a temperatura máxima diária excede os 25°C (A) e 35°C (B) (dias de verão) em Portugal Continental, para o período histórico (1971-2000) e para os períodos futuros considerando diferentes cenários de emissão de GEE. (b) Alterações projectadas para o futuro no número médio de dias de verão, considerando o período 1971-2000 como referência. (c) Dispersão de vários modelos nas alterações futuras projectadas projetadas no número médio de dias de verão, considerando o período 1971-2000 como referência (Adaptado Soares et al., 2024).....	74

Figura 22 - (a) Número médio anual de dias por ano em que a temperatura mínima diária é inferior a 0°C (C) e 7°C (D) (dias frios) em Portugal continental, para o período histórico (1971-2000) e para os períodos futuros considerando diferentes cenários de emissão de GEE. (b) Alterações projetadas para o futuro no número médio de dias frios, considerando o período 1971-2000 como referência. (c) Dispersão de vários modelos nas alterações futuras projetadas no número médio de dias de frio, considerando o período 1971-2000 como referência (Adaptado Soares et al., 2024).....	76
Figura 23 - (a) Número médio anual de dias com precipitação superior a 1 mm (E) e 20 mm (F) para o período histórico (1971-2000) e para os períodos futuros considerando diferentes cenários de emissões de GEE. (b) Alterações futuras (b) Alterações futuras projetadas no número médio com precipitação superior a 1 mm e de dias com precipitação superior a 20 mm em Portugal continental, considerando o período 1971-2000 como referência. (c) Dispersão multi-modelo nas alterações futuras projetadas para o futuro no número médio de dias com precipitação superior a 1 mm e com precipitação superior a 20 mm em Portugal continental, considerando o período 1971-2000 como referência (Adaptado Soares et al., 2024).....	78
Figura 24 - (a) velocidade máxima diária do vento a 10 m (G) e máximo de rajada de vento máxima diária (F) para o período histórico (1971-2000) e para os períodos futuros considerando diferentes cenários de emissões de GEE. (b) Alterações futuras projetadas na velocidade máxima diária do vento a 10 m e máximo de rajada de vento máxima diária sobre Portugal continental, considerando o período 1971-2000 como referência. (c) Dispersão multimodelo das alterações projetadas para o futuro na velocidade máxima diária do vento a 10 m e no máximo da rajada de vento máxima diária sobre Portugal continental, considerando o período 1971-2000 como referência. Portugal continental, considerando o período 1971-2000 como referência (Adaptado Soares et al., 2024).....	80
Figura 25 - Variação do Coeficiente de Difusão (D) ao longo de 100 anos.....	96
Figura 26 - Concentração de cloretos por tipo de betão e RCP.	105
Figura 27 – Matriz de Risco (posição de Ccr face ao intervalo de C(x,t)).	106
Figura 28 - Variação de ti em função da difusividade nos Cenários RCP por tipo de betão.	108
Figura 29 – Evolução da profundidade crítica de cloretos ao longo de um período de 100 anos (por cada RCP).....	109

Figura 30 – Perda de espessura por corrosão em diferentes tipos de aço em cada cenário RCP.	112
Figura 31 – Desempenho normalizado à corrosão dos aços em diferentes cenários climáticos.....	115
Figura 32 – Evolução da área efetiva por tipo de aço em diferentes cenários RCP.	120

Lista de Quadros

Quadro 1 – Principais tipos de obras portuárias e marítimas.....	10
Quadro 2 – Materiais usados em estruturas/infraestruturas portuárias (Adaptado de Herrero & Ametller, 2019).....	12
Quadro 3 – Os 10 maiores portos mundiais (Adaptado WSC).....	14
Quadro 4 - Evolução dos portos ao longo dos anos.....	15
Quadro 5 - Comparação entre o Quinto (AR5) e Sexto Relatórios de Avaliação (AR6) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (Adaptado de Qin et al., 2013; Abdulla et al., 2014; IPCC, 2014; Pathak et al., 2022; Calvin et al., 2023; IPCC, 2023).....	16
Quadro 6 - Os principais impactos das alterações climáticas nos grandes portos mundiais (Members of Working Group 178, 2020)	19
Quadro 7 - Variedade de efeitos diretos e indiretos decorrentes das mudanças nos padrões climáticos.....	22
Quadro 8 – Medidas aplicadas à resiliência operacional e infraestrutural em obras portuárias segundo as ROM (Herrero & Ametller, 2019; ShibataFenderTeam AG, 2019).....	27
Quadro 9 - Componentes da resiliência em infraestruturas portuárias e marítimas (Adaptado de SARIL).....	28
Quadro 10 – Dimensões do Porto de Leixões e respetivos elementos (Adaptado APDL).	39
Quadro 11 – Principais obras geotécnicas e os respetivos anos de realização (Porto de Leixões, 2013).	40
Quadro 12 – Padronizações dos elementos de cálculo (adaptado de (ShibataFenderTeamAG, 2019))	42
Quadro 13 – Tipos de navios e respetivas características (Adaptado de (ShibataFenderTeam AG, 2019)).	43
Quadro 14 – Situação atual do Porto de Leixões (Adaptado Transporte e Negócios).....	44
Quadro 15 - Cenários RCP (<i>Representative Concentration Pathways</i>)	45

Quadro 16 - Número de residentes e edifícios projetados por distritos e municípios no final do período de 2041 a 2100 (Edifícios (E) e residentes (R)) (Mourão et al., 2024).....	50
Quadro 17 - Níveis característicos de maré (m) no local segundo (CONSULMAR, 2019).....	62
Quadro 18 - Principais riscos climáticos em Portugal (APA; ANEPC; CCIAM) (Seixas et al., 2023).....	67
Quadro 19 - Adaptação e monitorização de eventos climáticos em Portugal (Seixas et al., 2023).....	68
Quadro 20 - Coeficiente de difusão (D) por cada cenário RCP.	94
Quadro 21 - A concentração superficial de cloretos (Cs) e cenários de exposição marinha (adaptada de Vera et al., 2024).	97
Quadro 22 - Relação entre concentração superficial de cloretos (Cs), limite crítico de iniciação da corrosão (Ccr) e teor de cimento típico em diferentes cenários de exposição marinha (APEB, 2022).	98
Quadro 23 - Recobrimento nominal mínimo recomendado por classe de exposição (EN 206), de acordo com o tipo de ambiente a que a estrutura de betão está sujeita (adaptado APEB, 2022; Monteiro et al., 2010).	99
Quadro 24 – Cálculo relativo à penetração dos cloretos no betão no cenário RCP 2.6....	101
Quadro 25 - Cálculo relativo à penetração dos cloretos no betão no cenário RCP 4.5.....	103
Quadro 26 - Cálculo relativo à penetração dos cloretos no betão no cenário RCP 8.5.....	104
Quadro 27 - Estimativa de ti (anos) e avaliação qualitativa da durabilidade dos betões por cenário climático RCP, com base na difusividade dos cloretos (m ² /s).....	107
Quadro 28 - Propriedades mecânicas e parâmetros típicos de corrosão dos principais tipos de aço utilizados em ambientes marítimos sob diferentes cenários RCP.....	111
Quadro 29 - Desempenho à Corrosão dos Aços em Diferentes Cenários RCP.	114
Quadro 30 - Área típica segundo o tipo de perfil.....	115
Quadro 31 - Área efetiva dos perfis metálicos por tipo de aço e cenário climático RCP.	119
Quadro 32 – Fator de ajuste dos tipos de ações integradas nos cenários dos fenómenos climáticos extremos.	121

Quadro 33 - Tensão de cedência do aço segundo o tipo de perfil e respetivo coeficiente de segurança.....	122
Quadro 34 – Valores da largura e altura efetiva inicial.....	124
Quadro 35 - Características geométricas e fórmula da área resistente ao esforço transverso (A_v) por tipo de aço.....	126
Quadro 36 -Variação estimada das ações climáticas e coeficientes parciais de segurança segundo os cenários RCP.	128
Quadro 37 - Tipo de ação e respetivo valor característico g_k (kN/m ²).....	129
Quadro 38 - Valores de q_k deduzidos segundo as ROM.....	130
Quadro 39 – Valores típicos usados para a largura de influência (b) e vão livre (L) (adaptado de Peixoto, 2014).	130
Quadro 40 – Análise estrutural tendo em conta o respetivo intervalo de variação temporal (100 anos).	135
Quadro 41- O quadro apresenta os intervalos de rácios estruturais (N/M/V).	136

[página propositadamente em branco]

Lista de Equações

Equação 1 - Equação de Arrhenius.....	94
Equação 2 - Lei de Fick aplicada à penetração de cloretos no betão.	99
Equação 3 – Equação de Fick usada para estimar o tempo de iniciação da corrosão (<i>t_i</i>).106	
Equação 4 - Cálculo da Perda de Espessura por Corrosão.	111
Equação 5 – Cálculo do desempenho normalizado com base no ano de corrosão.....	114
Equação 6 - Cálculo da área efetiva da secção metálica após corrosão.	116
Equação 7 - Cálculo da tensão resistente efetiva (σ_{eff}) de um elemento estrutural metálico afetado por corrosão.	122
Equação 8 – Cálculo da resistência de cálculo à compressão.	123
Equação 9 – Cálculo do momento resistente de cálculo.	124
Equação 10 -Módulo plástico da secção.	125
Equação 11 – Cálculo da resistência ao esforço transversal de cálculo.	125
Equação 12 – Cálculo do momento característico devido às ações permanentes.....	131
Equação 13 - Momento fletor máximo característico de uma viga isostática com carga uniformemente distribuída.	132
Equação 14 - Equação do esforço normal de cálculo.....	132
Equação 15 - Esforço Transverso de Cálculo em apoio da viga isostática com carga uniformemente distribuída.	133
Equação 16 – Rácio esforço Normal.....	134
Equação 17 – Rácio do momento fletor.....	134
Equação 18 – Rácio do esforço transversal.....	134

[página propositadamente em branco]

Acrónimos e Símbolos

Lista de Acrónimos e Símbolos

APDL	Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo.
SIG	Sistemas de Informação Geográfica.
TEU	<i>Twenty-foot Equivalent Unit.</i>
VTs	<i>Vessel Traffic Service</i>
AIS	<i>Automatic Identification System</i>
LOA	<i>Length of Overall.</i>
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto.
SARIL	<i>Sustainability and Resilience for Infrastructure and Logistics networks.</i>
CO ₂	Dióxido de carbono.
RCP	<i>Representative Concentration Pathways.</i>
IVC	Inundação Vinculada ao Clima.
SPT	<i>Standard Penetration Test.</i>
RQD	<i>Rock Quality Designation.</i>
SNIRH	Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos.
AR5	Quinto Relatório de Avaliação Climática.
AR6	Sexto Relatório de Avaliação Climática.
GEE	Gases com Efeito Estufa.
CCS	<i>Carbon Capture and Storage.</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
SSP	<i>Shared Socioeconomic Pathways.</i>
CDR	<i>Carbon Dioxide Removal.</i>
BECCS	<i>Bioenergy with Carbon Capture and Storage.</i>
DACCS	<i>Direct Air Carbon Capture and Storage.</i>
RFC	<i>Reasons for Concern.</i>
CBA	<i>Cost–Benefit Analysis.</i>
MCA	<i>Multi-Criteria Analysis.</i>
ROM	Recomendações para as Obras Marítimas.
SHM	<i>Structural Health Monitoring.</i>
PIANC	<i>World Association for Waterborne Transport Infrastructure.</i>

[página propositadamente em branco]

Capítulo I

Introdução

[página propositadamente em branco]

1. Introdução

1.1. Objetivos

O principal objetivo da presente dissertação consiste em avaliar a resiliência de estruturas portuárias e marítimas face às alterações climáticas, com especial enfoque na degradação induzida por cloretos em materiais estruturais, nomeadamente o betão armado e o aço.

No seguimento desta introdução, o **Capítulo 2** apresenta o enquadramento geral do tema, abordando os principais tipos de estruturas portuárias, materiais utilizados, variações de maré e o conceito de resiliência em contexto costeiro, o **Capítulo 3** centra-se no Porto de Leixões, explorando a sua evolução, contexto geológico e demográfico, bem como a caracterização geotécnica e sísmica do local de estudo, o **Capítulo 4** avalia os cenários climáticos projetados para Portugal, incluindo fenómenos extremos, e discute a importância da monitorização e instrumentação em infraestruturas portuárias, o **Capítulo 5** constitui o caso de estudo, onde se aplica a modelação dos cenários climáticos ao Porto de Leixões, com base em cálculos de durabilidade do betão e do aço, e avalia-se ainda o impacto das alterações climáticas na resiliência da infraestrutura analisada, o **Capítulo 6** indica as respetivas considerações finais, e por fim o **Capítulo 7** representa as referências bibliográficas e webgrafia.

Pretende-se assim compreender de que forma os diferentes cenários climáticos, denominados (RCP 2.6, 4.5 e 8.5), influenciam a durabilidade das soluções construtivas típicas em ambiente marítimo, recorrendo a uma abordagem quantitativa suportada em cálculos estruturais.

Com vista à concretização do objetivo central, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Identificar e caracterizar os principais mecanismos de degradação de estruturas expostas a ambientes marítimos agressivos, com ênfase na corrosão induzida por cloretos;
- Avaliar o desempenho de diferentes tipos de betão (8 composições) e de aço (6 categorias), aplicados a elementos estruturais portuários típicos;
- Estimar a penetração de cloretos e o tempo de início da corrosão com base em coeficientes de difusão, recobrimentos nominais e classes de exposição;
- Calcular a perda de área resistente e os rácios estruturais de compressão, flexão e esforço transversal ao longo de 100 anos;
- Analisar comparativamente os resultados para cada material sob diferentes cenários RCP, destacando os elementos mais críticos e os materiais mais resilientes;
- Propor diretrizes para dimensionamento, escolha de materiais e estratégias de monitorização e manutenção preventivas orientadas para a adaptação climática.

1.2. Metodologias

A metodologia adotada baseia-se numa abordagem analítica e comparativa, integrando modelos teóricos de degradação dos materiais com simulações estruturais aplicadas a elementos representativos de estruturas portuárias e marítimas. O desenvolvimento do estudo foi estruturado em cinco fases principais:

- Revisão bibliográfica e normativa, com levantamento das principais normas (Eurocódigos 3, EN206), orientações internacionais e estudos científicos relacionados com corrosão, durabilidade e resiliência de materiais em ambiente marítimo.
- Seleção dos materiais analisados, incluindo oito tipos de betão com diferentes composições (desde betões convencionais a geopoliméricos e betão de ultra performance) e seis tipos de aço (aço carbono, inoxidável, galvanizado, de alta resistência, entre outros).
- Definição de condições de exposição a cenários climáticos, com base nos cenários RCP 2.6, 4.5 e 8.5, aplicando valores estimados de variação climática às ações ambientais (ondas, vento, temperatura, etc.) e aos parâmetros de difusão de cloretos.
- Modelação da degradação ao longo do tempo, com recurso a equações de penetração de cloretos (com base na função erro inversa), estimativa do tempo de início da corrosão, cálculo da espessura perdida por corrosão e determinação da área resistente residual.

- Avaliação estrutural, através do cálculo do momento resistente, esforço normal e esforço transversal para cada material, e comparação com os valores solicitantes para obtenção dos rácios de dimensionamento. As simulações consideraram estruturas reais como quebra-mares, cais acostáveis, estacas-prancha metálicas, defensas e pilares tubulares.
- Avaliação da resiliência estrutural face ao impacto ambiental, considerando não apenas a perda de desempenho estrutural, mas também a robustez, redutibilidade e capacidade de recuperação dos elementos analisados. Esta permite inferir a adaptabilidade dos materiais a contextos de agressividade crescente, promovendo decisões baseadas em critérios de ciclo de vida e risco climático e respetivas medidas de monitorização necessárias.

[página propositadamente em branco]

Capítulo II

Enquadramento Geral

[página propositadamente em branco]

2. Enquadramento Geral

2.1. Contextualização

2.1.1. Conceito e funções dos Portos Marítimos

Um porto é uma infraestrutura estratégica localizada na interface entre o meio terrestre e o meio aquático, concebida para permitir a movimentação segura e eficiente de navios, cargas e passageiros.

Funciona como ponto de transição logística entre o transporte marítimo e os modos terrestres (rodoviário, ferroviário ou fluvial), onde é essencial para o comércio internacional, o abastecimento regional e a atividade económica de zonas costeiras.

Os portos são compostos por um conjunto de infraestruturas físicas e operacionais, a sua função principal é permitir a acostagem de embarcações, o carregamento e descarregamento de mercadorias (como contentores, granéis ou carga geral) e, em alguns casos, a receção de passageiros ou o apoio à pesca e à atividade industrial.

Além da componente física, um porto integra sistemas logísticos e administrativos que garantem o controlo aduaneiro, a gestão ambiental, a segurança marítima e a eficiência operacional.

2.1.2. Principais tipos de estruturas e obras portuárias e marítimas

A geotecnia desempenha um papel fundamental nas obras portuárias, ao proporcionar uma análise detalhada das condições do solo e da rocha, essencial para a conceção, dimensionamento e execução destas infraestruturas. Entre as suas contribuições destacam-se o estudo da estabilidade de taludes, a interação solo-estrutura, o controlo de drenagem para

redução das pressões hidrostáticas, a seleção adequada de materiais, a monitorização geotécnica e o acompanhamento das fases construtivas.

As obras portuárias e marítimas englobam uma variedade de estruturas e intervenções destinadas à proteção costeira, acessibilidade e operação de portos, bem como à estabilização de áreas sujeitas à ação marítima e fluvial, conforme exemplificado no Quadro 1.

Quadro 1 – Principais tipos de obras portuárias e marítimas.

PRINCIPAIS TIPOS DE OBRAS PORTUÁRIAS E MARÍTIMAS		
TIPO DE OBRA	EXEMPLOS	FUNÇÃO PRINCIPAL
PROTEÇÃO COSTEIRA	• Quebra-mares, molhes. • Obras longitudinais aderentes, alimentação artificial.	• Redução da erosão e dissipação da energia das ondas.
ESTRUTURAS DE ACOSTAGEM	• Cais, elementos acessórios.	• Permitir a atracagem segura de embarcações.
OBRAS FLUTUANTES	• Pontões de acostagem flutuante, balsas, docas móveis ou plataformas de apoio logístico, passadiços articulados.	• Facilitar operações portuárias em áreas instáveis como a superfície da água.
OBRA DE DRAGAGEM	• Dragagens.	• Manutenção da profundidade adequada para navegação.

O projeto e a construção destas estruturas têm em consideração diversos parâmetros oceanográficos e geotécnicos, nomeadamente a altura e o período das ondas, o comprimento de onda, a amplitude das marés, os rumos dominantes e a batimetria local.

Devido à complexidade das condições marítimas reais, o dimensionamento rigoroso destas estruturas requer, frequentemente, a realização de ensaios em modelos físicos, de modo a garantir a sua eficácia e estabilidade.

As principais estruturas portuárias e costeiras podem ser divididas em:

- Proteção costeira: Quebra-mares, molhes e esporões, estes protegem a agitação marítima e a erosão;
- Acostagem e amarração: Muros-cais, defensas e boias, que permitem a atracação e fixação dos navios de forma segura;
- Acessibilidades: Canais navegáveis, acessos rodoviários e ferroviários estes garantem a ligação ao *hinterland* (região geográfica situada para além da zona costeira de um porto);

- Operação e armazenamento: Pavimentos, terraplenos e áreas logísticas tornam mais simples as operações de carga, descarga e armazenamento temporário;
- Infraestruturas técnicas: Redes de energia, água, telecomunicações e sistemas de incêndio asseguram a segurança e o bom funcionamento do porto.

Estas estruturas funcionam em conjunto de modo a garantir as operações portuárias eficientes e seguras.

2.1.3. Materiais

A seleção adequada dos materiais de construção constitui um dos pilares fundamentais para o desenvolvimento de infraestruturas costeiras e portuárias eficientes e duradouras. Face às condições particularmente exigentes do ambiente marinho, a escolha criteriosa dos materiais impacta diretamente a segurança estrutural, a longevidade das obras, os custos de manutenção e o seu desempenho operacional.

O ambiente costeiro e portuário impõe exigências severas, nomeadamente a exposição constante à água do mar e à agitação marítima, a corrosão induzida por cloretos, o desgaste por abrasão abrasiva resultante da movimentação de sedimentos e tráfego marítimo/terrestre, bem como o ataque biológico por organismos marinhos.

De acordo com as Recomendações para as Obras Marítimas (ROM), é essencial que as propriedades dos materiais sejam consideradas em todas as fases do projeto, devendo ser definidas com valores representativos e controladas através de especificações técnicas rigorosas (Herrero & Ametller, 2019).

Entre os materiais mais utilizados destacam-se o betão, o aço, os materiais pétreos, em aplicações específicas, a borracha, a espuma, os plásticos e a madeira, conforme sintetizado no Quadro 2.

Quadro 2 – Materiais usados em estruturas/infraestruturas portuárias (Adaptado de Herrero & Ametller, 2019).

MATERIAL	PROPRIEDADES RELEVANTES	APLICAÇÕES TÍPICAS	DESAFIOS NO AMBIENTE MARINHO	MEDIDAS DE PROTEÇÃO E MELHORIAS
BETÃO	Baixa permeabilidade, resistência a sulfatos.	Muros-cais, pavimentos, estruturas.	Corrosão, fissuração, cloretos.	Recobrimentos, cimento resistente, adições.
AÇO	Alta resistência, ductilidade.	Cais, equipamentos, defensas.	Corrosão, fadiga.	Revestimentos, proteção catódica, aço inoxidável.
MATERIAIS DE PEDREIRA	Resistência ao desgaste, estabilidade.	Fundações, reaterros, pavimentos.	Abrasão, instabilidade.	Ensaio de resistência, melhoria com cal/cimento.
BORRACHA/ESPUMA	Deformação, absorção de energia.	Defensas portuárias (fenders).	Degradação por UV, envelhecimento.	Materiais de baixa fricção, fixação química.
PLÁSTICOS	Resistência à água, leveza.	Tubagens, flutuadores, geossintéticos.	Degradação por UV, fragilidade.	Plásticos de alta densidade, proteção UV.
MADEIRA	Baixo custo, trabalhabilidade.	Estruturas provisórias, aplicações.	Ataque biológico, degradação.	Tratamento adequado.
LINHAS DE AMARRAÇÃO	Resistência, elasticidade.	Amarração de navios.	Degradação por UV, desgaste.	Fibras sintéticas, inspeção regular.

Com base na descrição anterior, compreende-se que a durabilidade do betão em ambientes marinhos constitui uma preocupação central, sobretudo devido ao risco de corrosão das armaduras, abrasão e ação mecânica. Para mitigar este fenómeno, é recomendada a adoção de diversas medidas preventivas, tais como: recobrimentos adequados das armaduras, utilização de betões com baixa permeabilidade e reduzida fissurabilidade, aplicação de cimentos resistentes a sulfatos e incorporação de adições minerais que limitem a penetração de iões cloreto.

Nos pavimentos portuários, é comum a aplicação de diferentes tipos de betão, cujas especificações devem contemplar, entre outros aspetos, a granulometria adequada dos agregados. Adicionalmente, o uso de betão reforçado com fibras (sejam de aço ou sintéticas) tem-se revelado eficaz no aumento da resistência à fissuração e ao desgaste superficial, especialmente em zonas sujeitas a elevadas cargas dinâmicas, como as provocadas por contentores. Segundo as ROM a elevada resistência mecânica e ductilidade deste tipo de betão tornam-no particularmente adequado para estruturas expostas a solicitações intensas.

No caso das defensas portuárias, estas são frequentemente fabricadas em borracha ou espuma, materiais que oferecem as propriedades de deformabilidade e recuperação elástica exigidas para a absorção de impactos. As faces de contacto das defensas são habitualmente revestidas com placas de baixo atrito, produzidas em *UHMW-PE* (*'Ultra High Molecular Weight Polyethylene'*) ou *HD-PE* (*'High Density Polyethylene'*), cuja baixa fricção contribui para minimizar as forças de cisalhamento e corte durante o contacto entre a embarcação e a infraestrutura (ShibataFenderTeam AG, 2019).

Adicionalmente, existem materiais com funções secundárias que, embora não estruturais, desempenham papéis relevantes em diversas aplicações portuárias e costeiras (Herrero & Ametller, 2019):

- Plásticos, reconhecidos pela sua boa resistência à água do mar, são amplamente utilizados em componentes como tubagens, flutuadores e geossintéticos, contribuindo a durabilidade e versatilidade das soluções construtivas;
- Madeira, apesar da sua vulnerabilidade ao ataque de organismos marinhos, pode ser empregue em estruturas provisórias ou em contextos específicos onde sejam aplicadas medidas adequadas de proteção;
- Cabos de Amarração, fabricados com fibras naturais (como sisal ou cânhamo) ou sintéticas (como poliéster ou polipropileno), devem apresentar elevada resistência e elasticidade para garantir a segurança e estabilidade dos navios atracados.

A seleção dos materiais para infraestruturas costeiras e portuárias exige uma análise integrada das condições ambientais, das exigências estruturais e operacionais, da disponibilidade local e dos custos associados ao ciclo de vida da infraestrutura. Entre os critérios prioritários destacam-se a durabilidade face às alterações climáticas e a resiliência à degradação em ambiente marinho e portuário (Fernández-Pérez et al., 2024).

2.1.4. Importância Histórica

Desde os primórdios da humanidade, o meio marítimo tem sido utilizado como via de mobilidade, tendo o povo português assumido um papel pioneiro e resiliente nesta atividade.

Inicialmente recorriam-se a pequenas embarcações, adequadas para atravessar margens fluviais e transportar cargas reduzidas. Com o aumento das necessidades de transporte, surgiram embarcações maiores, como as canoas, que marcaram um ponto de viragem na evolução naval. Esta progressiva sofisticação levou, naturalmente, à exigência de portos comerciais cada vez

mais amplos e estruturados, capazes de assegurar uma receção eficiente de mercadorias, onde asseguram cerca de 80% do transporte mundial.

Atualmente, os portos marítimos são infraestruturas essenciais ao comércio global, desempenhando um papel estratégico e enfrentando uma necessidade constante de modernização e adaptação. A introdução e padronização dos contentores representaram uma revolução no transporte marítimo, tornando a movimentação de cargas significativamente mais eficiente.

A nível global, os maiores portos marítimos concentram-se, maioritariamente, no continente asiático, como se pode observar no Quadro 3. A movimentação de carga contentorizada é medida em *Twenty-foot Equivalent Unit (TEU)*.

Quadro 3 – Os 10 maiores portos mundiais (Adaptado WSC).

POSIÇÃO	PORTO	VOLUME EM 2023 (MILHÕES DE TEUS)
1º	Xangai, China	49,16
2º	Singapura	39,01
3º	Ningbo-Zhoushan, China	35,30
4º	Shenzhen, China	29,88
5º	Qingdao, China	28,77
6º	Guangzhou Harbor, China	25,41
7º	Busan, Coreia do Sul	23,04
8º	Tianjin, China	22,19
9º	Hong Kong, RAE da China	14,40
10º	Rotterdam, Países Baixos	13,45

2.1.5. Evolução dos portos marítimos

A evolução dos portos ao longo do tempo tem sido marcada por profundas transformações, impulsionada por exigências económicas, avanços tecnológicos e preocupações ambientais.

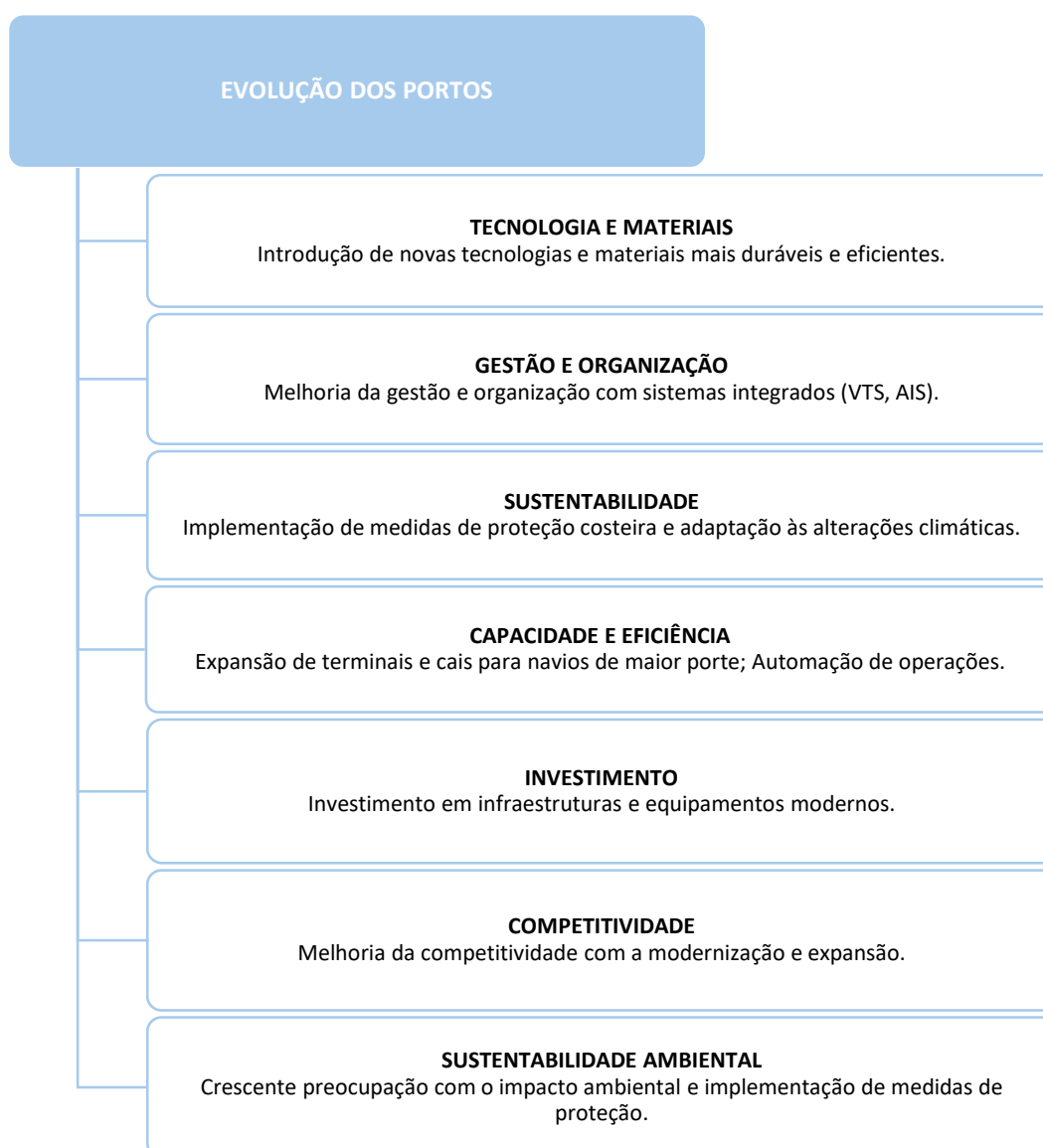
A modernização dos portos trouxe consigo a introdução de novos materiais e tecnologias, resultando no aumento da durabilidade das infraestruturas e na construção de estruturas mais robustas. Paralelamente, a melhoria na gestão e organização portuária possibilitou a implementação de sistemas mais integrados e eficientes, como os *Vessel Traffic Service (VTS)* e os *Automatic Identification System (AIS)*. As crescentes preocupações com a sustentabilidade e os efeitos das alterações climáticas conduziram à adoção de medidas de mitigação do impacto

ambiental, incluindo a implementação de sistemas de proteção costeira, como os quebra-mares, e à constante adaptação das infraestruturas às novas realidades climáticas.

O aumento da capacidade e da eficiência operacional tornou também necessária a adaptação dos portos para receber navios de maior porte, levando à modernização e expansão dos terminais, bem como à construção de novos cais e à ampliação dos já existentes.

A automação e a introdução de equipamentos avançados nas operações portuárias, especialmente nas atividades de carga e descarga de contentores, contribuíram significativamente para o aumento da eficiência e redução dos tempos de espera (Castro, 2018). O Quadro 4 apresenta os principais aspetos que caracterizam a evolução dos portos ao longo dos anos.

Quadro 4 - Evolução dos portos ao longo dos anos.



2.2. Alterações climáticas

2.2.1. Caracterização e fundamentação

Face à aceleração das alterações climáticas, os portos em todo o mundo enfrentam riscos substanciais associados à subida do nível do mar, à intensificação de fenómenos meteorológicos extremos e ao aumento das temperaturas (Fernández-Pérez et al., 2024). Estas ameaças comprometem a integridade das infraestruturas portuárias e perturbam as cadeias de abastecimento, com impactos diretos nas indústrias, meios de subsistência e economias nacionais. Por este motivo, o Quinto (AR5) e o Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do IPCC representam marcos fundamentais na compreensão científica das alterações climáticas e na definição de estratégias globais de mitigação e adaptação. Ambos os relatórios reconhecem inequivocamente o papel predominante das atividades humanas, sobretudo através das emissões de gases com efeito de estufa (GEE), no aquecimento global, mas o AR6 apresenta avanços significativos em profundidade, detalhe e urgência da ação, Quadro 5.

Quadro 5 - Comparação entre o Quinto (AR5) e Sexto Relatórios de Avaliação (AR6) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (Adaptado de Qin et al., 2013; Abdulla et al., 2014; IPCC, 2014; Pathak et al., 2022; Calvin et al., 2023; IPCC, 2023).

	AR5 (2013-2014)	AR6 (2021-2024)
BASE CIENTÍFICA E EVIDÊNCIAS	Confirma a influência humana no aquecimento global com elevada confiança.	Reforça inequivocamente a causa humana e atualiza os dados (aumento de 1,1°C).
PROJEÇÕES CLIMÁTICAS	Cenários RCPs (2,6 a 8,5), aumento de temperatura de 0,3°C a 4,8°C até o século XXI.	Introduziu SSPs com RCPs, maior probabilidade de ultrapassar 1,5°C e 2°C.
MITIGAÇÃO E REDUÇÃO DE EMISSÕES	Propõe CCS, eficiência energética e descarbonização.	Exige reduções rápidas e CDR (BECCS, DACCS); integra com políticas económicas.
ADAPTAÇÃO E IMPACTOS CLIMÁTICOS	Estratégias regionais e baseadas em ecossistemas.	Expansão da análise com foco em eventos extremos compostos e desenvolvimento resiliente ao clima.
AValiação de Riscos e Incertezas	Introduz RFCs e riscos crescentes com o aumento de temperatura.	Aprofunda RFCs; destaca riscos compostos e interações entre fatores.
Integração Mitigação e Adaptação	Defende abordagens complementares e co-benefícios.	Enfatiza integração com o desenvolvimento sustentável.
Eventos Extremos e Sustentabilidade	Reconhece aumento de extremos; ligação geral ao desenvolvimento.	Destaca eventos extremos compostos e a urgência de um futuro sustentável.

O AR5, publicado entre 2013 e 2014, confirmou com elevada confiança a influência humana como principal motor do aquecimento observado desde meados do século XX. As observações científicas confirmam o aumento das concentrações atmosféricas de gases com efeito de estufa (GEE), a elevação das temperaturas médias globais da superfície, a subida do nível médio do mar e a intensificação da acidificação oceânica. Estes resultados são corroborados por uma análise abrangente de dados observacionais e por simulações com modelos climáticos avançados

Utilizando os cenários RCP, que variam desde o RCP 2.6 (cenário de baixas emissões) até ao RCP 8.5 (cenário de elevadas emissões). Desta forma, estimou um possível aumento da temperatura global entre 0,3°C e 4,8°C até ao final do século XXI, em relação ao período de referência 1986-2005, dependendo das trajetórias de emissões de GEE. Adicionalmente, foram também antecipadas a continuação da elevação do nível do mar e do processo de acidificação dos oceanos, com consequências potencialmente graves, abrangentes e, nalguns casos, irreversíveis para os sistemas humanos e ecológicos.

Por este motivo, enfatizou a necessidade de reduções sustentadas de GEE para limitar o aquecimento a menos de 2°C face aos níveis pré-industriais, apontando como estratégias principais a descarbonização da produção de energia elétrica, a melhoria da eficiência energética e o uso de tecnologias como a *Carbon Capture and Storage (CCS)*.

Por sua vez, o AR6, publicado entre 2021 e 2023, atualiza e reforça essas conclusões com evidência mais robusta e detalhada. Regista um aumento real de 1,1°C na temperatura média global entre 2011–2020 em relação a 1850–1900 e documenta impactos generalizados já observáveis em todos os continentes. Introduce os *Shared Socioeconomic Pathways (SSPs)*, que, em combinação com os RCPs, permitem analisar uma gama mais ampla de futuros climáticos, incluindo trajetórias de neutralidade carbónica até meados do século.

As projeções indicam um aumento contínuo da temperatura global em todos os cenários, sendo provável que o aquecimento ultrapasse os limites de 1,5°C e 2°C ao longo do século XXI. A nível de mitigação, o AR6 acentua a urgência de reduções rápidas e profundas nas emissões, com soluções baseadas na remoção de CO₂ como *BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage)*, *DACCS (Direct Air Carbon Capture and Storage)* e florestamento. Destaca ainda a importância da integração das políticas climáticas com medidas macroeconómicas, o que pode proporcionar benefícios adicionais, como a promoção de uma recuperação económica sustentável, o fortalecimento de redes de proteção social e o alargamento do acesso a financiamento, tecnologias e capacitação.

Quanto à adaptação, o AR5 salienta a relevância de estratégias ajustadas às vulnerabilidades regionais, promovendo abordagens baseadas em ecossistemas. O AR6 aprofunda a abordagem introduzida no AR5, enfatizando a necessidade de estratégias regionais específicas, com destaque para os eventos extremos compostos, como ondas de calor e precipitação intensa, cuja frequência e intensidade aumentaram em muitas regiões. Além disso, enfatiza o conceito de desenvolvimento resiliente ao clima, uma integração entre mitigação e adaptação, com o objetivo de apoiar o desenvolvimento sustentável. Alerta ainda para a redução rápida da “janela de oportunidade” para garantir um futuro habitável e sustentável.

Por fim, o AR6 reforça a análise dos riscos e incertezas com métricas de confiança mais rigorosas e uma atualização das *Reasons for Concern (RFCs)*, cinco categorias de risco agregadas que relacionam o aumento da temperatura global com a amplificação dos impactos. Sublinha que os riscos climáticos graves resultam da interação complexa entre aquecimento, vulnerabilidade, exposição, capacidade de adaptação e os efeitos em cascata que, em conjunto, determinam a gravidade, irreversibilidade e resposta possível aos impactos.

2.2.2. Principais impactos das alterações climáticas nos grandes portos mundiais

Segundo Adele Cadario (Cadario, 2024), responsável pelo programa de Infraestruturas e soluções baseadas na natureza no *Global Center on Adaptation*, fenómenos como o aumento do nível do mar podem danificar significativamente as docas e armazéns, enquanto eventos extremos, como o furacão Harvey em Houston, evidenciam o potencial para interrupções operacionais prolongadas. Exemplos como o tufão Hagibis e o ciclone Amphan ilustram a elevada vulnerabilidade dos portos localizados em regiões costeiras de baixa altitude (Cadario, 2024).

O Quadro 6 sintetiza os principais impactos das alterações climáticas nos grandes portos à escala global.

Quadro 6 - Os principais impactos das alterações climáticas nos grandes portos mundiais (Members of Working Group 178, 2020)

ESTUDO DE CASO	PORTO	IMPACTOS DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS
1	Porto de Roterdão	Risco de inundações devido à subida do nível do mar; Potenciais prejuízos económicos significativos.
2	Porto de Long Beach	Risco de inundações em infraestruturas do cais, rede de transportes e instalações críticas; Danos em componentes elétricos; aumento da vulnerabilidade do quebra-mar.
3	Autoridade Portuária de Nova Iorque e Nova Jérsei	Danos em edifícios e equipamentos elétricos; Problemas de abastecimento de combustível e perda de energia; Aumento do risco de inundações.
4	Autoridade Portuária de Londres	Alterações na navegação devido a nível do mar e precipitação; Riscos para equipamentos de navegação e infraestrutura operacional; aumento da proliferação de algas.
5	Porto de Providence	Inundações extensivas com furacões; Impactos nas infraestruturas de transporte e serviços públicos essenciais.
6	Harwich Haven Authority	Risco de inundação em equipamentos de radar, rádio e edifícios; Perda de energia; Aumento de incidentes devido a embarcações de recreio e condições meteorológicas adversas.
7	Infraestrutura Marítima nas Ilhas Exteriores de Tuvalu	Risco extremo para a segurança pública; Inundação de instalações e ligações costeiras; Maiores necessidades de manutenção devido a ondas e ciclones.
8	Base Naval de Norfolk, EUA	Sistemas críticos vulneráveis com subida do nível do mar; Aumento do risco de danos às infraestruturas e redução do desempenho da missão.
9	Porto de Avatiu, Rarotonga	Aumento da intensidade de ciclones; Risco de inundações e dependência de infraestrutura rodoviária; impacto na economia e no turismo.
10	Port Botany e Port Kembla, Austrália	Risco de galgamento e danos em quebra-mares; Degradação de infraestruturas devido a temperaturas extremas e tempestades; impacto nas operações portuárias.
11	Infraestruturas de Transportes Costeiros nas Caraíbas	Risco elevado de inundações em ativos de transporte; Impacto variável em diferentes portos (Jamaica e Santa Lúcia); Aumento da procura de energia devido ao calor.
12	Quebra-mar de San Pedro, Los Angeles	Aumento da frequência de ruptura do quebra-mar devido ao galgamento por ondas.
13	Terminal Muelles El Bosque, Cartagena	Impactos na circulação interna do porto, navegação e atracação; Danos no armazenamento de mercadorias; impactos ambientais e sociais.
14	Canal Albert, Bélgica	Níveis de água mais baixos devido às secas, comprometendo a navegabilidade.
15	MOWE IT – Sistema de Transportes Europeu	Vulnerabilidade a choques meteorológicos extremos; impactos na navegação interior devido a níveis baixos de água.
16	Porto de Manzanillo	Aumento da precipitação intensa causando inundações, danos à infraestrutura e aumento da sedimentação portuária.

A adaptação das infraestruturas portuárias às alterações climáticas tornou-se uma necessidade urgente, não só para salvaguardar os ativos físicos, mas também para evitar impactos socioeconómicos significativos, como a perda de postos de trabalho e o aumento da inflação resultante de atrasos nas cadeias logísticas. Em resposta a este desafio, diversos portos de referência internacional já estão a implementar investimentos em infraestruturas resilientes ao clima. O Porto de Roterdão, por exemplo, procedeu à elevação dos seus cais e à construção de barreiras de proteção contra tempestades intensas. Nos Estados Unidos, o Porto de Long Beach está a reforçar os seus sistemas de proteção contra inundações, enquanto o Porto de Yokohama, no Japão, recorre a sistemas avançados de alerta precoce para responder de forma eficaz a eventos meteorológicos extremos.

A resiliência portuária exige uma visão integrada das operações, que vá além da gestão das embarcações. O aumento das temperaturas pode afetar significativamente as operações terrestres, reduzindo a eficiência de equipamentos de carga e comprometendo a integridade de superfícies pavimentadas, o que pode causar falhas mecânicas ou tornar vias de transporte, como estradas e linhas ferroviárias, intransitáveis (Fisk, 2022).

A chave para uma adaptação bem-sucedida reside na aplicação de tecnologias fiáveis e economicamente sustentáveis, complementadas por consultoria especializada que apoie os operadores na adoção de novas soluções e na transição para formas de trabalho mais eficientes. A realização de avaliações rigorosas das operações e dos equipamentos permite aos portos tomar decisões informadas e desenvolver estratégias robustas de mitigação e adaptação, aumentando assim a sua resiliência face às alterações climáticas.

O desenvolvimento resiliente ao clima, que articula ações de mitigação com medidas de adaptação, é fundamental para a redução dos riscos climáticos. A monitorização contínua e precisa dos ativos e da infraestrutura portuária possibilita avaliações detalhadas de vulnerabilidade, facilitando intervenções de manutenção, reabilitação e planeamento da gestão do risco. Num cenário de crescente frequência e severidade dos fenómenos extremos, bem como de maior pressão regulatória sobre os recursos e operações portuárias, torna-se essencial adotar uma abordagem holística de monitorização e manutenção. Esta abordagem permite uma adaptação ágil às condições em evolução e contribui para a construção de estratégias eficazes de gestão de riscos a longo prazo.

De acordo com o relatório do *Environmental and Energy Study Institute (EESI)*, os diversos portos norte-americanos, como os de Los Angeles, Long Beach, Baltimore e Miami, tem desenvolvido estratégias de mitigação e adaptação que incluem a construção de infraestruturas robustas,

como muros elevados e quebra-mares reforçados, bem como implementação de aplicações baseadas na natureza, como a restauração de zonas húmidas, recifes artificiais e dunas. Estas medidas têm o intuito de atenuar os efeitos de eventos extremos e minimizar os impactos operacionais e logísticos resultantes de inundações ou interrupções nos acessos portuários (Bertrand & Williams, 2022).

Estes exemplos mostram claramente que os grandes portos mundiais não apenas já sentem os efeitos das alterações climáticas, como também estão a implementar medidas concretas e rigorosas para responder a riscos crescentes e complexos, em muitos casos alinhando-se com os cenários climáticos mais severos (RCP 8.5), que representam o limite superior dos impactos projetados (Bertrand & Williams, 2022).

As projeções mais recentes revelam que, sem a devida adaptação, os danos anuais causados por tempestades em portos poderão ascender a 25 mil milhões de dólares até 2100, enquanto as perdas globais associadas a inundações costeiras poderão ultrapassar os 27 biliões de dólares por ano, que significa cerca de 2,8% do PIB (Produto interno Bruto) mundial e a percentagem de ativos económicos expostos a eventos de inundação poderá atingir entre 12% e 20% do PIB global (Asariotis, 2023).

A importância de integrar avaliações de risco de elevada qualidade, baseadas na melhor ciência disponível, nos processos de planeamento de infraestrutura portuária, bem como de adotar abordagens baseadas nos ecossistemas, evitar o sobredimensionamento de soluções estruturais e garantir o financiamento acessível para adaptação, sobretudo em países em desenvolvimento (Asariotis, 2023).

As ferramentas como as normas ISO 14090 e 14091, as diretrizes da *World Association for Waterborne Transport Infrastructure (PIANC)* e as orientações da legislação climática europeia são apontadas como instrumentos-chave para apoiar esta transição (Asariotis, 2023)

2.2.3. Impactos diretos e indiretos das alterações climáticas nos portos

A intensificação das preocupações relacionadas com as alterações climáticas exige uma análise aprofundada dos seus impactos sobre infraestruturas críticas, como os portos. Enquanto elementos centrais no comércio global, estas estruturas revelam-se particularmente vulneráveis a diversos efeitos diretos e indiretos resultantes da alteração dos padrões climáticos (Quadro 7).

Quadro 7 - Variedade de efeitos diretos e indiretos decorrentes das mudanças nos padrões climáticos.

IMPACTOS CLIMÁTICOS NOS PORTOS		
CATEGORIA	IMPACTOS	DESCRIÇÃO
DIRETOS	• Aumento das temperaturas.	• Fissuras, deterioração de áreas pavimentadas, tensão em estruturas metálicas.
	• Subida do nível do mar.	• Inundações de áreas portuárias e erosão costeira.
	• Alterações na agitação marítima.	• Danos aos quebra-mares, erosão ou deslocamento de estruturas.
	• Mudanças na pluviosidade.	• Alteração nas cargas de sedimentos, afetando a navegabilidade.
	• Variações em salinidade e humidade.	• Corrosão de estruturas metálicas e degradação de materiais.
INDIRETOS	• Restrição do acesso rodoviário.	• Interrupção do transporte devido ao mau estado das estradas.
	• Interrupção das atividades portuárias.	• Paralisação de operações devido a danos causados por inundações ou erosão.
	• Aumento dos custos de manutenção.	• Reparos frequentes e necessidade de adaptação às novas condições climáticas.

Compreender em profundidade os impactos das alterações climáticas é essencial para a definição de estratégias de adaptação eficazes e para assegurar a resiliência do setor portuário a longo prazo. Os impactos diretos resultam da modificação de variáveis climáticas fundamentais, como a subida do nível do mar, o aumento da temperatura, a intensificação da pluviosidade e a alteração dos regimes de agitação marítima.

O aumento das temperaturas pode acelerar a deterioração de pavimentos e induzir tensões adicionais em estruturas metálicas. Por sua vez, a alteração nas características das ondas pode comprometer a integridade de quebra-mares, originando inundações nas instalações portuárias e a interrupção das operações. Variações na pluviosidade e na dinâmica ondulatória influenciam também os volumes de sedimentos nos canais de navegação, com implicações diretas na necessidade de dragagens e na manutenção da navegabilidade.

Já os impactos indiretos manifestam-se como consequência dos efeitos diretos. Um exemplo relevante é a paralisação das atividades portuárias motivada por danos estruturais causados por inundações ou processos de erosão costeira, o que compromete a funcionalidade operacional e logística dos portos.

2.2.4. Modelo metodológico de adaptação climática aplicado às infraestruturas

A Figura 1 apresenta um modelo de adaptação climática proposto por Fernandez-Pérez et al. (2024), estruturado em quatro fases sequenciais e interdependentes. A primeira etapa consiste na avaliação dos riscos representativos, com base em dados físicos, socioeconómicos e climáticos, determinando os perigos compostos e a respetiva exposição sistémica do porto

Segue-se a seleção de medidas de adaptação, em que identificam-se as necessidades, limites e potencial de seleção de medidas de adaptação, calculando a lacuna entre o risco atual e o risco admissível.

A terceira fase incide na otimização dessas medidas, com base em critérios temporais, multicritério e de custo-benefício. É realizado também o planeamento estratégico da adaptação, através da seleção de cenários e definição de ações a implementar.

O modelo é caracterizado pelo dinamismo que apresenta, permitindo reavaliações sucessivas conforme as condições que evoluem.

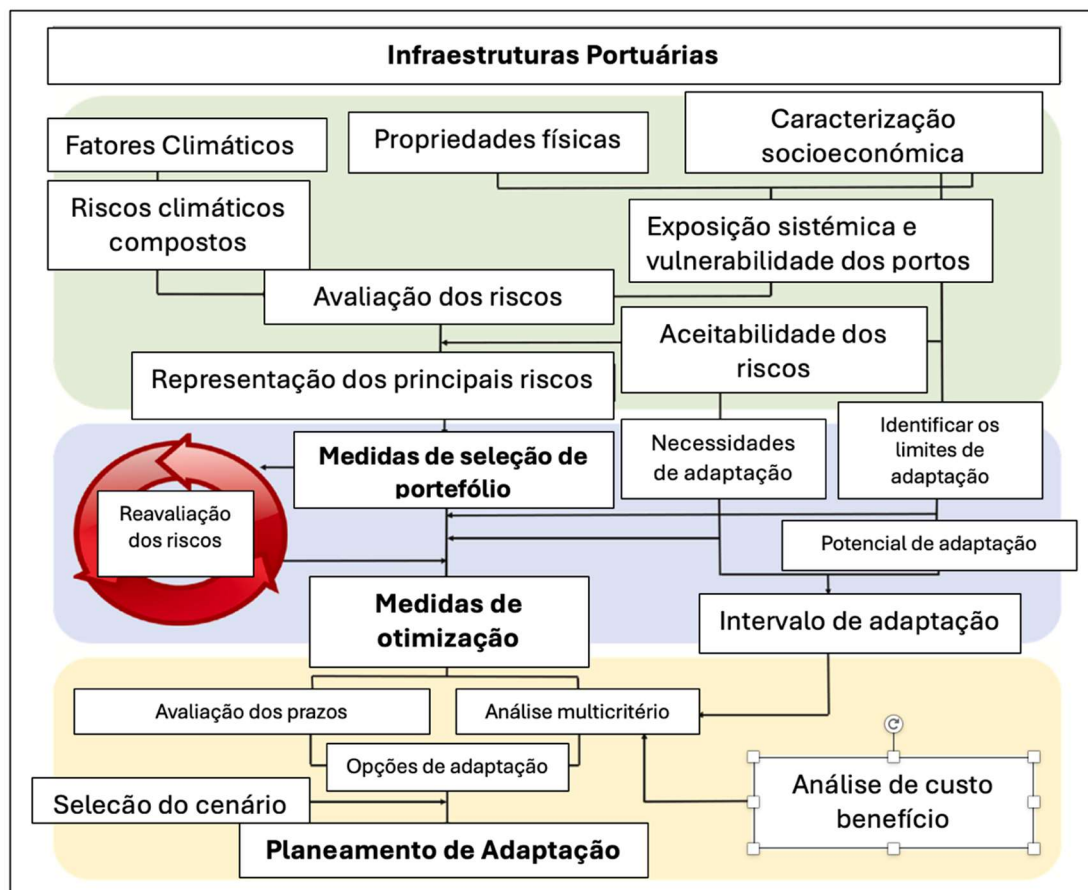


Figura 1 - Fluxo de trabalho desenvolvido para a metodologia de adaptação a impactos derivados das alterações climáticas em sistemas de infraestruturas portuárias, tendo por base o enquadramento de adaptação do IPCC (adaptado de Fernandez-Pérez et al., 2024)

A Figura 2 representa o conceito de “espaço solução” (*solution space*) no contexto da adaptação das infraestruturas portuárias às alterações climáticas. Através da evolução temporal do risco climático para os dois cenários de emissões mais severos, é possível observar que o risco tende a aumentar ao longo do tempo, em que obtém maiores valores no cenário de maiores emissões (RCP 8.5).

A área abaixo do limiar de risco aceitável constitui a zona segura de operação; à medida que este limite é ultrapassado, o espaço para a adaptação torna-se cada vez mais reduzido.

O gráfico mostra assim a necessidade da ação antecipada, planeamento flexível e consideração de cenários climáticos desfavoráveis na definição de estratégias de resiliência portuária.

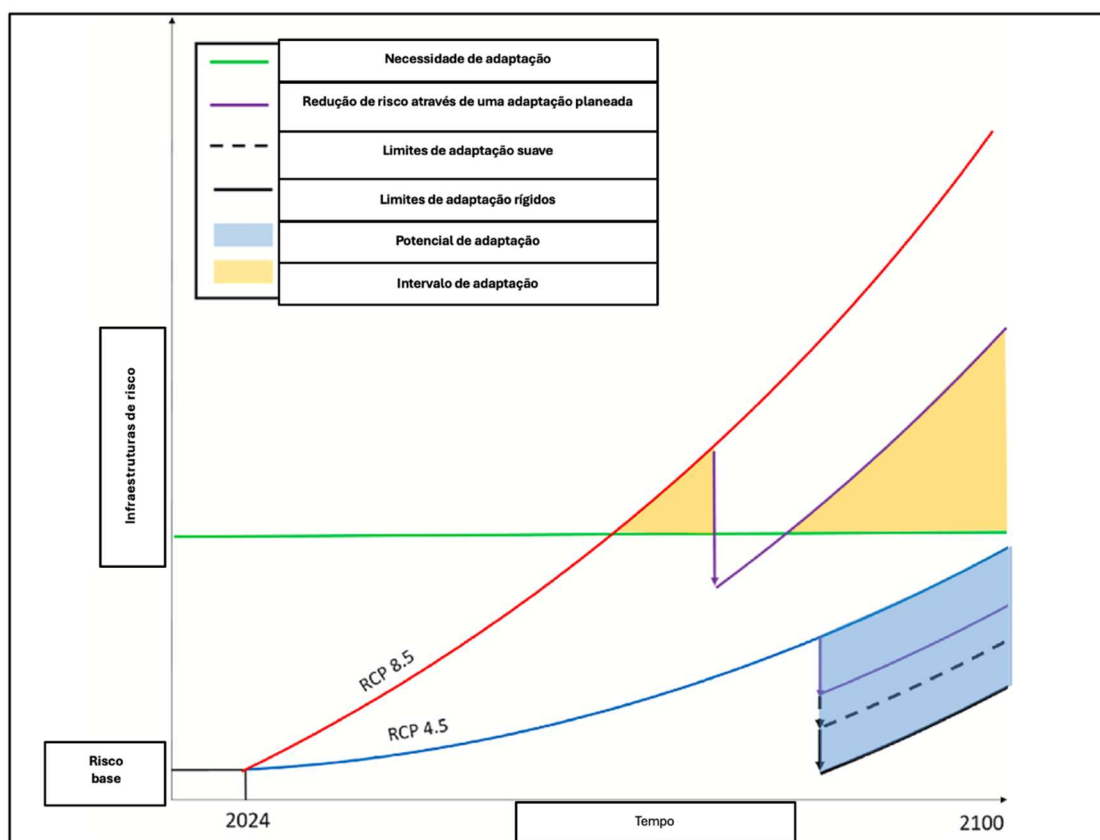


Figura 2 - Espaço de solução para infraestruturas portuárias com base na evolução temporal do risco climático. As linhas vermelhas e azuis representam a variação do risco para dois cenários diferentes (RCP 4.5 e 8.5) (retirado de Fernandez-Pérez et al., 2024).

Após a análise da Figura 1 referente à metodologia e ao esquema conceptual do espaço de solução (Figura 2), importa destacar o contributo do modelo proposto por Fernandez-Pérez et al. (2024) enquanto estudo de referência para o presente trabalho.

Este modelo constitui uma abordagem progressiva para a adaptação de infraestruturas portuárias aos impactos das alterações climáticas, integrando avaliação de risco, definição de necessidades, limites e potencial de adaptação, bem como a seleção e otimização de medidas através de critérios técnicos, económicos e temporais.

A sua aplicação prática ao porto de Llanes, situado na região das Astúrias, Espanha, demonstra a viabilidade da metodologia mesmo em contextos portuários de pequena escala, reforçando a sua adaptabilidade. No contexto da presente dissertação, este modelo servirá de apoio conceptual e técnico à análise desenvolvida para o caso de estudo em Portugal (Porto de

Leixões), permitindo estruturar a avaliação climática com base na evolução temporal dos riscos e apoiar a definição de cenários críticos sob diferentes trajetórias RCP.

A clareza sequencial e a compatibilidade com dados locais tornam este enquadramento uma ferramenta metodológica valiosa para orientar decisões de engenharia em contextos de vulnerabilidade costeira crescente.

A consolidação de abordagens metodológicas para a resiliência climática em portos exige não apenas enquadramento conceptual, mas também aplicabilidade prática e compatibilidade com as exigências da engenharia de infraestruturas críticas.

Neste sentido, o contributo de IDB Invest & IDOM (2021) representa uma referência sólida no plano internacional, ao reconhecer que a ausência de planeamento climático específico para infraestruturas portuárias resulta, inevitavelmente, em vulnerabilidades estruturais e económicas acumuladas, sobretudo em contextos com escassez de recursos técnicos e financeiros (IDB Invest & IDOM, 2021).

Mais do que propor uma sequência operacional de etapas, o documento sustenta a necessidade de integrar cenários climáticos (como os RCPs) nas decisões de investimento e gestão portuária, defendendo o RCP 8.5 como linha de base racional para decisões robustas em horizontes de longo prazo (IDB Invest & IDOM, 2021)

Esta opção metodológica alinha-se com a abordagem a ter em conta nesta dissertação, que parte do princípio de que a subestimação do risco conduz à obsolescência técnica das soluções antes do final do seu ciclo de vida projetado o (IDB Invest & IDOM, 2021).

2.3. Resiliência das obras portuárias e marítimas

2.3.1. Resiliência e instrumentação

Assegurar a resiliência operacional e infraestrutural das obras portuárias, conforme evidenciado no Quadro 8, requer uma abordagem multifacetada que integre a instrumentação estrutural, a compreensão do ambiente marítimo, a durabilidade dos materiais e a análise de potenciais falhas.

Quadro 8 – Medidas aplicadas à resiliência operacional e infraestrutural em obras portuárias segundo as ROM (Herrero & Ametller, 2019; ShibataFenderTeam AG, 2019).

MEDIDA	DESCRIÇÃO
MONITORIZAÇÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA	Monitorização contínua de ondas e correntes; construção de quebra-mares para proteção.
SISTEMAS DE DEFESA	Proteção de estruturas e navios; inspeções regulares e monitorização de desempenho.
MATERIAIS E DURABILIDADE	Uso de materiais duráveis (betão e aço) para resistir ao ambiente marinho.
INSTRUMENTAÇÃO PARA MONITORIZAÇÃO	Sensores para deteção precoce de anomalias (deformação, vibrações, pressão).
ANÁLISE DE MODOS DE FALHA	Identificação de causas de falha (colapso, perda de funcionalidade, suspensão temporária).
INSPEÇÕES REGULARES	Inspeções visuais, ensaios não destrutivos e levantamentos topográficos para detetar danos.
MONITORIZAÇÃO DA CORROSÃO	Deteção precoce de corrosão e aplicação de revestimentos ou proteção catódica.
PAVIMENTOS	Gestão de conservação para garantir funcionalidade e operatividade do pavimento.
ADAPTAÇÃO A EVENTOS EXTREMOS	Reforço de estruturas, sistemas de drenagem e barreiras contra inundações para resistir a climas extremos.

Destaca-se a importância da monitorização contínua da agitação marítima, essencial para a proteção das estruturas e a manutenção da operacionalidade portuária. A instrumentação dedicada à monitorização da saúde estrutural, incluindo sensores de deformação, acelerómetros e sensores de pressão, permite a deteção precoce de anomalias, facilitando intervenções preventivas.

A resiliência a longo prazo das infraestruturas portuárias assenta numa estratégia que alia a monitorização contínua, a manutenção proativa e a adaptação às condições ambientais e aos riscos emergentes.

2.3.2. Aumento da resiliência dos portos

A crescente preocupação com os impactos das alterações climáticas, aliada à necessidade de garantir a continuidade operacional das infraestruturas portuárias, tem reforçado a importância da resiliência nestes sistemas complexos.

O Erro! A origem da referência não foi encontrada. demonstra diversos parâmetros descritivos essenciais para a resiliência e gestão das estruturas portuárias e costeiras dos portos, evidenciando as respetivas medidas adotadas e os benefícios associados.

Aumentar a resiliência das obras portuárias traz múltiplas vantagens, desde a mitigação da erosão costeira e a adaptação às alterações climáticas até à salvaguarda da segurança das infraestruturas e dos seus utilizadores. A implementação de medidas resilientes não só contribui para a criação de condições de abrigo essenciais para diversas atividades económicas, como também reforça a estabilidade dinâmica e durabilidade das estruturas, resultando numa redução dos custos de manutenção a longo prazo.

Elementos como a seleção e o dimensionamento adequados dos materiais, a adoção de estratégias de durabilidade e de proteção contra a corrosão, a eficiência da drenagem e a estabilização do solo são determinantes. Acrescem ainda a importância de soluções de pavimentação adequadas, a elaboração de planos de manutenção e monitorização, bem como a consideração das acessibilidades e da proteção costeira.

Assim, a incorporação destes fatores no planeamento de infraestruturas portuárias revela-se fundamental para assegurar a sua funcionalidade e segurança a longo prazo, um objetivo cada vez mais relevante face aos desafios contemporâneos (Governo Portugal, 2020).

2.3.3. Resiliência das infraestruturas portuárias e as alterações climáticas

No âmbito do projeto SARIL (*Sustainability and Resilience for Infrastructure and Logistics Networks*), a capacidade das obras portuárias e marítimas de enfrentar os impactos das alterações climáticas configura-se como um elemento fulcral. O projeto visa desenvolver metodologias e ferramentas capazes de avaliar e fortalecer a resiliência das redes logísticas, promovendo a sustentabilidade e a capacidade de resposta a diferentes tipos de disrupções, incluindo eventos extremos.

A resiliência é compreendida como a aptidão de um sistema resistir, recuperar e se adaptar a eventos disruptivos, minimizando os impactos negativos e assegurando a continuidade das suas operações. Esta abordagem contempla quatro dimensões fundamentais: preparação, robustez, recuperação e adaptação (Quadro 9).

Quadro 9 - Componentes da resiliência em infraestruturas portuárias e marítimas (Adaptado de SARIL)

COMPONENTE	DESCRIÇÃO	EXEMPLOS NO CONTEXTO PORTUÁRIO E MARÍTIMO
PREPARAÇÃO	Envolve a planificação e implementação de medidas preventivas e a alocação de recursos para mitigar o impacto de futuras disrupções.	- Reforço de estruturas costeiras. - Sistemas de alerta precoce para eventos climáticos extremos. - Planos de contingência detalhados.
ROBUSTEZ	Refere-se à capacidade intrínseca da infraestrutura de resistir aos efeitos de um evento disruptivo sem falhar catastroficamente.	- Uso de materiais resistentes à corrosão e à água salgada. - Design de estruturas para suportar cargas extremas de tempestades.
CAPACIDADE DE RECUPERAÇÃO	Diz respeito à velocidade e eficácia com que a infraestrutura pode retornar ao seu estado operacional normal após uma disrupção.	- Planos de restauro rápidos. - Recursos de emergência disponíveis. - Soluções temporárias para manter a operacionalidade.
CAPACIDADE ADAPTATIVA	Envolve a habilidade de aprender com eventos passados e ajustar estratégias e processos para melhorar a resiliência futura.	- Revisão contínua dos planos de gestão de riscos - Incorporação de novas informações sobre alterações climáticas. - Adoção de soluções inovadoras.

No contexto das infraestruturas portuárias e marítimas, a resiliência às alterações climáticas alude à destreza destas instalações, incluindo portos, terminais, cais, quebra-mares e canais de navegação, para se manterem operacionais, absorverem impactos, recuperarem e se adaptarem aos efeitos adversos resultantes das mudanças climáticas (Number et al., 2024).

As alterações climáticas representam uma ameaça complexa à integridade e funcionamento destas infraestruturas, manifestando-se através de fenómenos como a elevação do nível do mar, com potencial para causar inundações, erosão costeira e danos estruturais; a intensificação e maior frequência de tempestades, que podem comprometer severamente cais, quebra-mares e outras estruturas; ondas de calor, capazes de afetar o desempenho de equipamentos e a saúde dos trabalhadores; modificações nos regimes de precipitação e secas, com influência na gestão hídrica e na navegabilidade; e de eventos climáticos extremos (Number et al., 2024).

A integração dos impactos climáticos em todas as fases da resiliência e o uso estratégico de informações de monitorização são fundamentais para garantir a operacionalidade e sustentabilidade dessas infraestruturas vitais a longo prazo.

A gestão da resiliência deve adotar uma abordagem integrada que incorpore tanto estratégias de mitigação, centradas na redução das causas e efeitos das alterações climáticas, como

estratégias de adaptação, focadas no ajuste das infraestruturas e sistemas de gestão aos impactos inevitáveis.

As infraestruturas como portos, marinas e estaleiros estão particularmente expostas a riscos climáticos, sejam eles extremos ou de evolução gradual. De salientar a crescente pressão para promover a resiliência climática no setor marítimo, refletida nos relatórios mais recentes do IPCC e nos compromissos assumidos na COP26 (26ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas), alertando que o tempo para uma ação eficaz está rapidamente a esgotar-se (Fisk, 2022).

Planeamentos resilientes podem ser desenvolvidos com base em dados públicos, diretrizes setoriais e estudos governamentais, sem exigir investimentos avultados ou prazos extensos. O foco atual incide fortemente na transição energética e na mitigação de riscos, numa conjuntura em que a descarbonização surge como prioridade estratégica.

2.3.4. Estratégias e referências técnicas para a resiliência climática em portos marítimos

O *Port Resilience Framework* enfatiza a importância da resiliência dos sistemas portuários face às incertezas globais e à recuperação perante perturbações climáticas, operacionais e sociais, como evidenciado durante a pandemia de COVID-19, que realçou a necessidade de uma abordagem holística da resiliência. Neste contexto, a integração da resiliência no planeamento estratégico portuário revela-se crucial para garantir a continuidade dos serviços a longo prazo, exigindo a harmonização entre regulamentações e metas de sustentabilidade. Assim, a resiliência é promovida num motor de transformação, que conecta pessoas, protege o ambiente e impulsiona a prosperidade económica (Button et al., 2022).

A construção de portos resilientes às alterações climáticas requer uma abordagem estruturada que combine o compromisso da gestão de topo, o desenvolvimento de competências técnicas especializadas e uma avaliação sistemática dos riscos. A capacitação técnica possibilita a realização de estudos aprofundados sobre os riscos climáticos, servindo de base para decisões informadas sobre estratégias de mitigação e adaptação.

A implementação de um modelo de "redundância regional" surge como uma solução eficaz para acelerar a recuperação de portos danificados, viabilizando o uso partilhado de recursos e infraestruturas. A avaliação rigorosa dos riscos, tanto a curto como a longo prazo, é imprescindível para sustentar medidas de adaptação eficazes (Becker et al., 2018).

No domínio técnico, a gestão adaptativa emerge como uma abordagem pertinente para lidar com as incertezas inerentes às alterações climáticas, permitindo a tomada de decisões iterativas com base em feedback e revisões contínuas. As opções de adaptação devem privilegiar soluções de "Low-regret" e "win-win", que reduzam os riscos climáticos ao mesmo tempo que geram benefícios operacionais. De igual modo, torna-se crucial evitar soluções que comprometam futuras iniciativas de adaptação (Becker et al., 2018).

As implementações de novas ferramentas de avaliação da vulnerabilidade portuária em múltiplos portos permitem otimizar os processos de tomada de decisão, baseados em critérios objetivos que orientam a priorização de investimentos em resiliência. Tais investimentos devem equilibrar os interesses públicos e privados, promovendo infraestruturas mais robustas e sustentáveis. No campo da engenharia, é prioritário reforçar a integridade estrutural das instalações portuárias, considerando projeções climáticas como a subida do nível do mar e o aumento da frequência de tempestades severas. É igualmente indispensável a aquisição de equipamentos e softwares de análise que ponderem a sua vida útil face a cenários climáticos futuros (Becker et al., 2018).

A eficácia do planeamento e da gestão destas infraestruturas é determinante para assegurar a continuidade das operações portuárias perante eventos climáticos extremos.

A *World Association for Waterborne Transport Infrastructure (PIANC)* encontra-se a desenvolver, através do Grupo de Trabalho 259, um guia técnico internacional para a resiliência climática das infraestruturas portuárias. Este surge da necessidade de orientar autoridades portuárias, projetistas e investidores na integração sistemática do risco climático em todas as fases dos projetos portuários, desde a sua conceção até à operação (PIANC, 2024).

O modelo proposto organiza-se em cinco fases:

- Análise de riscos;
- Análise preliminar;
- Testes de stress climático;
- Gestão do risco;
- Monitorização contínua.

Dá especial ênfase ao envolvimento de stakeholders, à recolha de dados climáticos e à definição de métricas de desempenho resiliente, promovendo o uso de soluções baseadas na natureza como complemento às infraestruturas convencionais (PIANC, 2024)

Esta iniciativa, alinhada com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 9 e 13), reforça a importância de normalizar boas práticas de adaptação climática em portos a nível internacional, sendo particularmente relevante para o contexto português e para portos como o de Leixões, onde decisões estruturais de longo prazo exigem base técnica robusta face a cenários climáticos futuros (PIANC, 2024).

Outra iniciativa, alinhada no mesmo contexto, segue uma orientação estratégica definida pela ESPO (2022) que constitui um reforço inequívoco da necessidade de internalizar a variável climática nos processos de planeamento e operação portuária, não como componente acessória, mas como determinante técnico-estrutural (Dorland et al., 2024).

O reconhecimento da resiliência como função sistémica e não meramente física impõe uma revisão da lógica tradicional de projeto baseada em condições históricas, substituindo-a por abordagens prospetivas ancoradas em cenários climáticos (RCP's) e dados regionais de projeção hidrometeorológica (Dorland et al., 2024).

Do ponto de vista técnico, a resiliência climática implica que o dimensionamento, reforço ou substituição de infraestruturas portuárias incorpore critérios de robustez sob incerteza, flexibilidade adaptativa e escalabilidade de soluções, com base em envelopes de risco definidos por análise probabilística. A avaliação funcional das infraestruturas deve ser conduzida com recurso a modelação hidrodinâmica e geotécnica (Dorland et al., 2024).

A proposta da ESPO integra ainda um princípio técnico essencial onde a resiliência efetiva não resulta exclusivamente da robustez estrutural, mas da capacidade de absorção, adaptação e recuperação operacional do sistema portuário como um todo, daí a importância de adotar uma abordagem multicritério, onde medidas estruturais (*hard measures*) sejam articuladas com soluções baseadas na natureza e respostas organizacionais, segundo hierarquias de custo-efetividade definidas por análise *CBA* (*Cost–Benefit Analysis*) ou *MCA* (*Multi-Criteria Analysis*) (Dorland et al., 2024).

No contexto português, e concretamente no Porto de Leixões, esta abordagem fornece o referencial técnico adequado para suportar decisões estruturais de longo prazo.

Capítulo III

Porto de Leixões

[página propositadamente em branco]

3. Porto de Leixões

3.1. Enquadramento Histórico

3.1.1. Porto de Leixões

Segundo o Arquivo Histórico da APDL (Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo), “Os Leixões” – um conjunto de rochedos situados na foz do rio Leça – constituíam já um porto de abrigo natural, graças à sua configuração em semicírculo que protegia uma costa frequentemente fustigada por tempestades e nevoeiros. Esta condição adversa levou à designação da zona como “Costa Negra” (Pinto, 1737).

No 1º milénio a.C., nas imediações da foz do Leça, surgiu o Castro de Guifões, um importante povoado da Idade do Ferro, que possuía uma estrutura portuária rudimentar, utilizada para a receção de produtos provenientes de regiões distantes, através de rotas marítimas (APDL).

A partir do século I a.C., o Castro de Guifões foi colonizado pelos romanos, integrando-se na vasta rede económica e comercial do Império Romano. Através do porto do Leça, que se tornou uma importante interface portuária e comercial regional, chegavam ao povoado produções agrícolas, conservas de peixe, cerâmicas e outros bens (APDL). A presença romana promoveu também um povoamento mais disperso, estendendo-se pelo território que corresponde atualmente à área de Matosinhos-Leça (APDL).

O topónimo Matosinhos surge em documentos do século X como *Matesinus* (Figura 3), sendo que, no final do século XIX, esta zona viria a converter-se numa imponente estrutura portuária artificial (APDL).

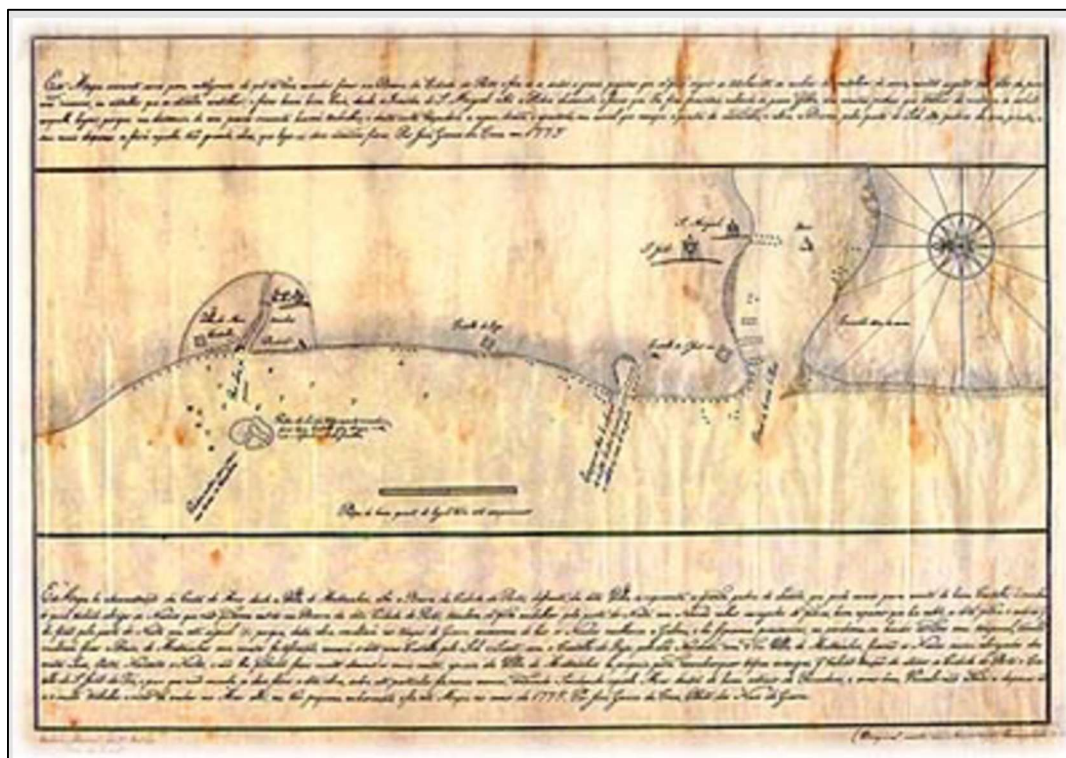


Figura 3 - Mapa de demonstração da Costa do Mar desde a Villa de Matozinhos, athe a Barra da Cidade do Porto (...)" Por Jozé Gomes da Cruz, Piloto das Naus de Guerra. 1775; Cópia de 1906. Arquivo APDL. (APDL).

A ideia de construir o Porto de Leixões remonta ao século XVI, motivada pelos perigos associados à barra do Douro. Ao longo do século XVIII, foram apresentados diversos projetos, mas encontraram resistência por parte da burguesia portuense. No entanto, o naufrágio de 1852 veio evidenciar a urgência da obra, tornando a sua concretização inevitável. Após 31 anos, foi tomada a decisão política de prosseguir com a construção do porto, com um projeto da autoria de Nogueira Soares (APDL). As obras iniciaram-se com a edificação de dois molhes, utilizando granito extraído da região do Porto e recorrendo a guindastes a vapor, conhecidos como os “titãs” (Figura 4).



Figura 4 - Construção do Porto de Leixões (1884-1892). Rochedos de Leixões e extremidades dos dois molhes. Foto: Emílio Biel. (APDL).

Nos anos seguintes, Leixões continuou a desenvolver-se ferverosamente, com a construção dos elementos estruturais e infraestruturas que acompanharam as transformações socioeconómicas da região. Este crescimento contribuiu para a perda de protagonismo do Douro como porto comercial, tendo desaparecido devido ao assoreamento do seu estuário e às condições difíceis causadas também pelos caudais do rio no período de inverno. (APDL).

Ao longo do tempo, é visível a profunda transformação na “fisionomia” do Porto de Leixões, refletindo a crescente importância do transporte marítimo para a sobrevivência da economia global. Na Figura 5 apresenta-se a configuração atual do porto, com a representação dos seus edifícios e setores, com exceção da intervenção realizada em 2024, correspondente ao prolongamento do quebra-mar e à expansão da zona exterior do porto (Lopes & Brògueira-Dias, 2021; Pinto, 2024).

O Quadro 10 abaixo apresentado, permite consultar as dimensões das principais estruturas do Porto de Leixões, com o apoio da planta correspondente.

Quadro 10 – Dimensões do Porto de Leixões e respetivos elementos (Adaptado APDL).

DIMENSÕES DO PORTO DE LEIXÕES			
ELEMENTOS	COMPRIMENTO DO CAIS (M)	PROFUNDIDADE (m)	ÁREA (ha)
TERMINAL DE CONTENTORES NORTE	360 m	-10 m	-
TERMINAL DE CONTENTORES SUL	540 m	-12 m	-
TCGL	670 m (carga geral e granéis sólidos) 400 m (carga agroalimentar)	-11 m	-
TERMINAL MULTIUSOS	310 m	-10 m	8 ha (área de armazenagem)
NOVA PONTE MOVEL	-	-12.0 m C.D.	-
PLATAFORMA LOGÍSTICA - POLO 1	-	-	30,2 ha (total) 11,6 ha (construção)
PLATAFORMA LOGÍSTICA - POLO 2	-	-	30 ha (total) 8,4 ha (construção)
TERMINAL DE PETROLEIROS	400	-14 a -16 m	-

3.1.2. Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo (APDL)

A APDL, criada em 1913, surgiu como Junta Autónoma das Obras Marítimas do Porto do Douro e Leixões num período em que se iniciava a transformação do Porto de Leixões num porto comercial. Sob a sua responsabilidade, deu-se início à construção do cais acostável no molhe sul, bem como à posterior expansão do porto, incluindo obras em terra no estuário do Leça, com a construção da doca nº 1 (APDL).

Atualmente, a APDL corresponde à Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo, sendo o organismo responsável pela gestão e coordenação das atividades portuárias nestes três portos.

3.2. Caracterização do Porto de Leixões

3.2.1. Principais obras Porto de leixões

Ao longo do tempo, o Porto de Leixões enfrentou diversos processos de expansão, destacando-se a ampliação do terminal de contentores, que implicou a construção de novos acessos e de um novo cais (Lopes & Brògueira-Dia, 2021). Obras como a construção do novo terminal de cruzeiros foram também executadas e, em 2021, o prolongamento do quebra-mar (ainda em curso). No Quadro 11, encontram-se listadas as principais intervenções realizadas no porto.

Quadro 11 – Principais obras geotécnicas e os respetivos anos de realização (Porto de Leixões, 2013).

OBRAS GEOTÉCNICAS	ANO(S) DE REALIZAÇÃO
MOLHES NORTE E SUL DO PORTO DE LEIXÕES	1884 - 1892
GARE MARÍTIMA DE PASSAGEIROS	1957 - 1958
PONTE MÓVEL	1957 - 1964
TERMINAL DE PETROLEIROS	1966 - 1970
TERMINAL DE CONTENTORES NORTE	1974 - 1979
DOCA Nº 4	1974 - 1984
MARINA DE RECREIO DE LEIXÕES	1991 - 1992
REMODELAÇÃO DA GARE MARÍTIMA	1993 - 1994
NOVA PONTE MÓVEL	2006 - 2007
TERMINAL MULTIUSOS DO PORTO DE LEIXÕES	2007 - 2008
OBRAS MARÍTIMAS DO TERMINAL DE CRUZEIROS	2009 - 2011
PROLONGAMENTO DO QUEBRA-MAR	2021 (em curso)

3.2.2. Navios e as principais características

As principais características de um navio Figura 6 são determinadas por dimensões fundamentais, como o *Length Overall* (LOA), a largura máxima (boca) e a distância vertical máxima entre a quilha e a linha de água (calado), sendo este último indicativo da profundidade mínima necessária para que a embarcação possa flutuar em segurança. Para além das dimensões físicas, parâmetros como a capacidade de carga, a velocidade e a manobrabilidade constituem fatores cruciais para o desempenho e a operação do navio.

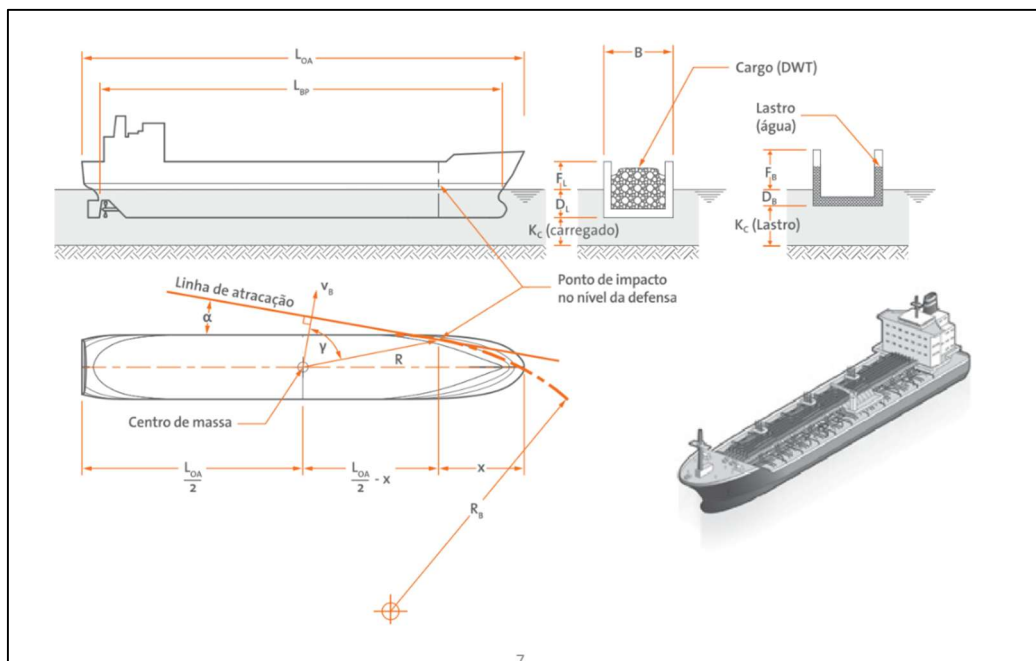


Figura 6 - Características principais de um navio (Adaptado (ShibataFenderTeam AG, 2019)).

A padronização referida, ilustrada no Quadro 12 e na Figura 6, trouxe benefícios significativos, nomeadamente ao nível da eficiência operacional, segurança, interoperabilidade entre modos de transporte e redução substancial de custos. Com a crescente adoção do transporte contentorizado, os navios evoluíram, aumentando progressivamente a sua capacidade e dando origem a diferentes gerações de navios.

Esta evolução traduziu-se num aumento contínuo do comprimento total, da capacidade de carga dos navios e, conseqüentemente, do calado das embarcações. Tais alterações impõem exigências crescentes à infraestrutura portuária, obrigando à realização de intervenções de manutenção frequentes, como o aprofundamento das bacias de rotação, a fim de garantir a operacionalidade e as competitividades dos portos (Castro, 2018).

Quadro 12 – Padronizações dos elementos de cálculo (adaptado de (ShibataFenderTeamAG, 2019))

CATEGORIAIS	SÍMBOLO	DEFINIÇÃO
EXTENSÃO GERAL	L_{OA}	Comprimento máximo do navio.
EXTENSÃO ENTRE PERPENDICULARES	L_{BA}	Distância entre o pivô do leme e a proa na linha d'água.
BOCA (LARGURA)	B	Largura do navio no centro.
CALADO CARREGADO	B_L	Calado máximo operacional.
CALADO EM LASTRO	D_B	Calado mínimo sem carga. Aproximado por $DB \approx 2 + 0.02 LOA$.
CALADO DE ESCANTILHÃO	D_L	Calado máximo permitido.
BORDO LIVRE CARREGADO	F_L	Bordo livre no meio do navio com calado DL.
BORDO LIVRE DO LASTRO	F_B	Bordo livre no meio do navio com calado DB.
ESPAÇO ABAIXO DA QUILHA	K_C	Profundidade da água sob a quilha.
CURVA DA PROA	R_B	Raio da proa ao nível da defesa.
DISTÂNCIA PARA IMPACTO DA PROA	x	Depende do perfil e do ângulo de atracação (ex.: $x = 0,25 LOA$).
IMPACTO AO CENTRO DA MASSA	R	Centro da massa do navio, geralmente $LOA/2$.

O Quadro 13 permite entender de forma sintetizada os diversos tipos de navios, bem como as suas características e carga transportada correspondente.

Quadro 13 – Tipos de navios e respetivas características (Adaptado de (ShibataFenderTeam AG, 2019)).

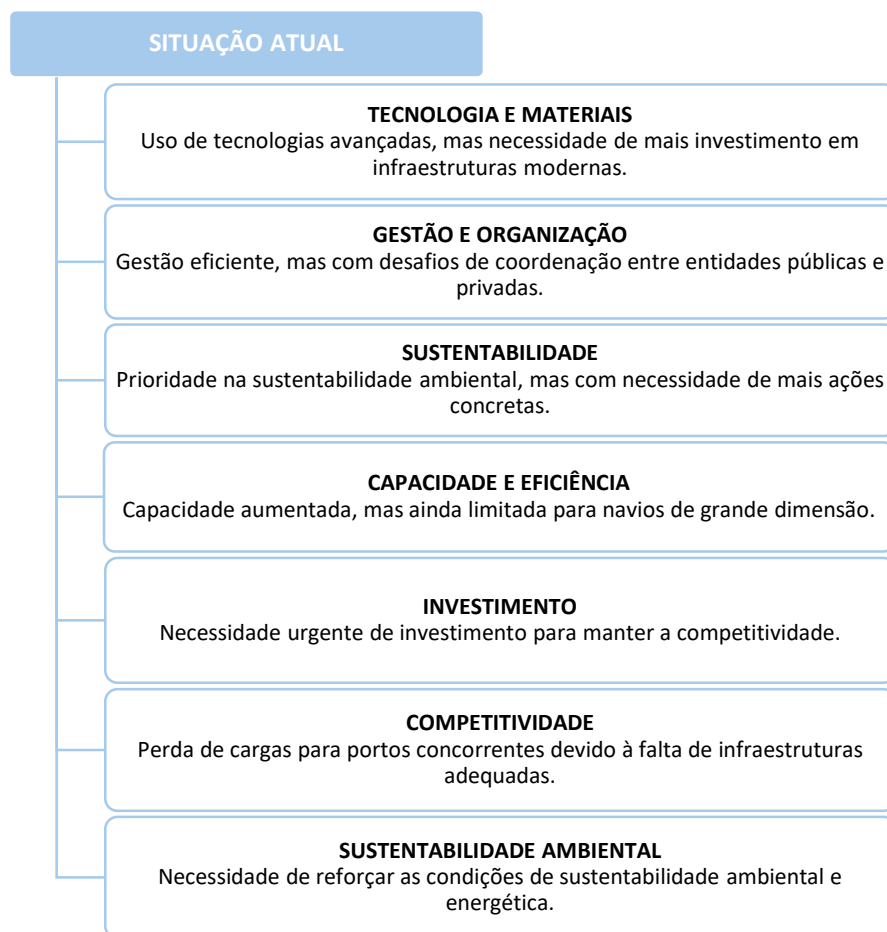
TIPO DE NAVIO E RESPETIVAS CARATERÍSTICAS		
TIPO DE NAVIO	CARACTERÍSTICAS DO NAVIO	EXEMPLOS DE CARGAS
NAVIOS-TANQUE	Casco reforçado, compartimentos estanques, sistemas de bombeamento e ventilação especializados.	Petróleo bruto, derivados de petróleo, produtos químicos.
GRANELEIROS	Porões grandes e profundos, escotilhas amplas, calado elevado, muitas vezes sem gruas próprias.	Minérios, carvão, grãos.
NAVIOS PORTA-CONTENTORES	Estrutura modular com células para contentores, convés plano, elevado bordo livre, velocidade elevada.	Mercadorias diversas.
NAVIOS DE PASSAGEIROS/CRUZEIROS	Acomodações confortáveis, infraestruturas de lazer, grande comprimento e boca.	Passageiros em viagens turísticas.
NAVIOS RO-RO	Rampas móveis, decks internos com múltiplos níveis, sistemas para carga roll-on/roll-off, calado médio.	Carros, camiões, máquinas pesadas, trailers.
CARGA GERAL	Versáteis, com porões de carga ajustáveis, gruas e sistemas de estiva próprios.	Carga geral embalada, como caixas, barris e sacos.

3.2.3. Situação atual do Porto de Leixões

A situação atual do Porto de Leixões reflete tanto os avanços alcançados como os desafios ainda por superar. O autor destaca que *"os números não enganam..."* e que *"as estatísticas provam que Leixões estagnou, num tempo em que há todas as condições para crescer..."* (Dias, 2025).

Esta estagnação e consequente perda de competitividade evidenciam a urgência de melhorias, sobretudo no que diz respeito ao investimento em infraestruturas capazes de receber navios de maior porte. A ausência desses investimentos tem levado à perda de cargas para portos concorrentes, como o Porto de Vigo (Dias, 2025).

A recente legislação, Decreto-Lei n.º 92/2024, permite o alargamento dos prazos das concessões portuárias, o que surge como uma oportunidade estratégica para atrair investimento privado e impulsionar a revitalização do porto. No entanto, é essencial que o Governo, a APDL e a comunidade portuária atuem em conjunto na concretização do plano estratégico de investimentos. A sustentabilidade ambiental e energética deve ser uma prioridade, orientando os esforços para a redução das emissões de CO₂ (Dias, 2025). O Quadro 14 resume os principais pontos abordados.



Quadro 14 – Situação atual do Porto de Leixões (Adaptado Transporte e Negócios).

3.3. Impacto na envolvente portuária

3.3.1. Impactos do porto de leixões na população residente

O Porto de Leixões desempenha um papel de grande relevância na economia portuguesa, afirmando-se como um motor de criação de emprego e geração de riqueza. Com uma contribuição estimada de cerca de 7% para o total do emprego nacional, o porto destaca-se pela sua capacidade de dinamizar o mercado de trabalho, tanto de forma direta como indireta. Paralelamente, representa aproximadamente 6% do Produto Interno Bruto (PIB) de Portugal, evidenciando a sua importância no conjunto das atividades económicas do país.

No contexto da indústria local, o Porto de Leixões assume uma função estratégica, servindo como plataforma essencial para a importação de matérias-primas e exportação de produtos acabados. Esta dimensão logística é crucial para a competitividade das empresas da região, que dependem da eficiência portuária para manter as suas cadeias produtivas e de distribuição.

A nível regional, este tem uma influência determinante no desenvolvimento económico, ao fomentar a atividade industrial e reforçar os laços comerciais com mercados internacionais, através da Via de Cintura Portuária, à qual compete a gestão do tráfego entre os diferentes terminais, contribuindo para a fluidez e eficácia das operações logísticas.

Assim, o Porto de Leixões revela-se um elemento estratégico no panorama económico nacional, dado o seu impacto direto em termos de emprego e PIB, bem como a sua função estruturante no apoio à indústria, à economia regional e à modernização das infraestruturas de transporte.

3.3.2. Previsão do número de habitantes no local de estudo

Os cenários RCP (*Representative Concentration Pathways*) representam diferentes trajetórias possíveis para as emissões de gases com efeito de estufa até ao final do século, refletindo distintos níveis de esforço na mitigação das alterações climáticas. Esta diversidade de cenários está ilustrada no Quadro 15 (Mourão et al., 2024).

Quadro 15 - Cenários RCP (*Representative Concentration Pathways*)

CENÁRIO RCP	DESCRIÇÃO	EMISSIONES ATÉ 2100	OBJETIVO
RCP2.6	Mitigação forte	Emissões reduzidas, limita aumento da temperatura a 1,5°C	Atingir a neutralidade de carbono
RCP4.5	Cenário intermediário	Emissões moderadas, aumento da temperatura entre 2°C e 3°C	Redução gradual das emissões
RCP8.5	Altas emissões	Emissões altas, aumento da temperatura superior a 4°C	Aumento significativo nas concentrações de gases de efeito estufa

De acordo com os dados dos CENSOS 2021, o número total de residentes em áreas projetadas para ficarem sob influência da Inundação Vinculada ao Clima (IVC) é de 45.330 e 45.606 até 2070, nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, respetivamente (Mourão et al., 2024).

Até ao ano 2100, esses valores aumentam para 52.772 no cenário RCP 4.5 e 60.463 no cenário RCP 8.5. Entre os distritos analisados, destacam-se como mais vulneráveis os distritos de Faro, Setúbal e Aveiro, conforme evidenciado (Figura 7 e Figura 8) (Mourão et al., 2024).

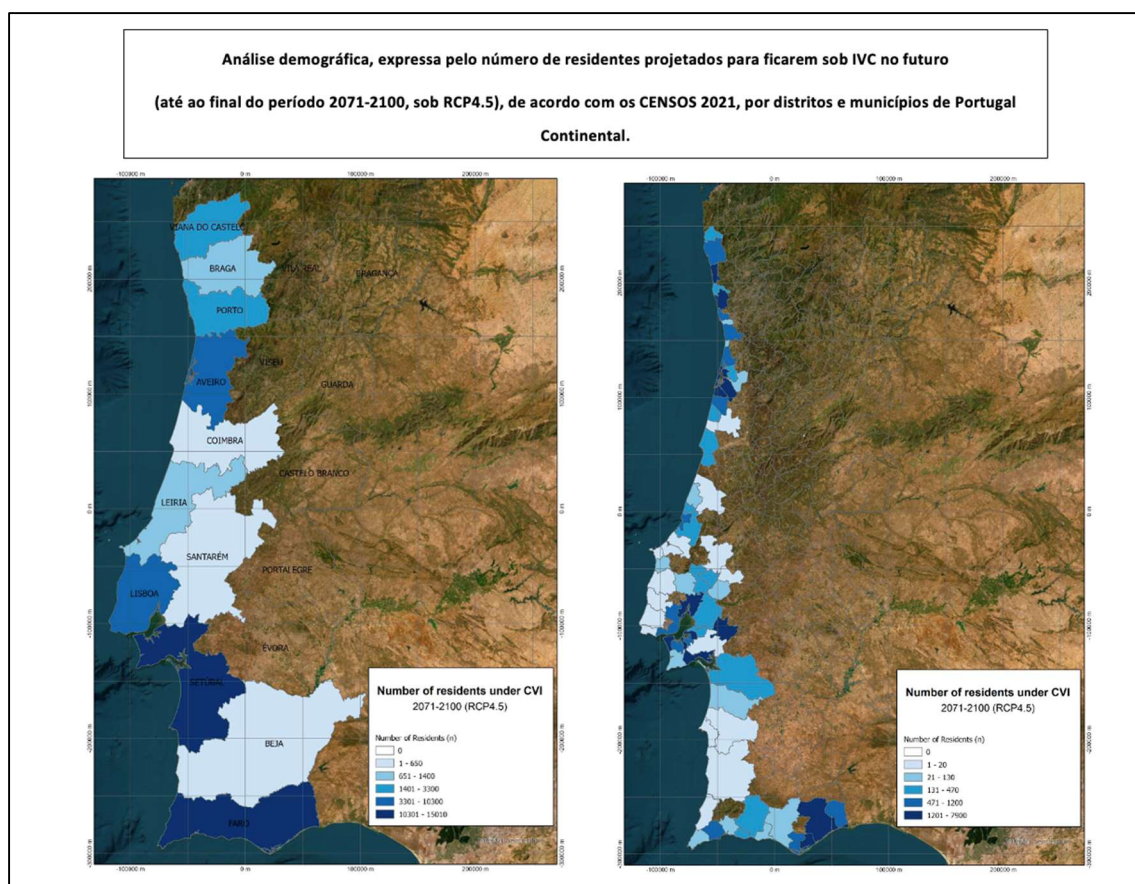


Figura 7 – Número de residentes projetados por distritos e municípios no final do período de 2071 a 2100, sob RCP4.5 (CENSOS 2021) (Note-se que os intervalos da escala de cores não são uniformes, sendo divididos por quantis (0%, 1-20%, 21-40%, 41-60%, 61-80% e 81-100%))

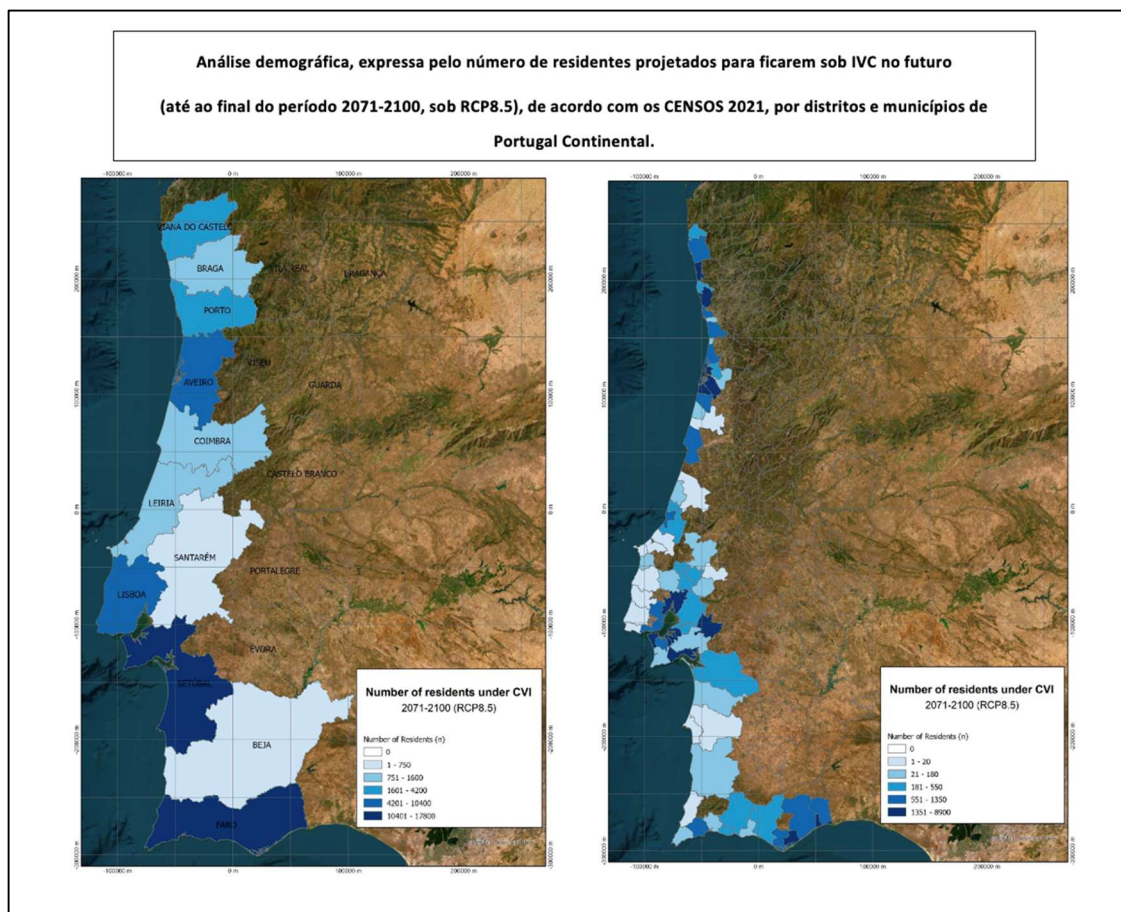


Figura 8 - Número de residentes projetados por distritos e municípios no final do período de 2071 a 2100, sob RCP8.5 (CENSOS 2021) (Note-se que os intervalos da escala de cores não são uniformes, sendo divididos por quantis (0%, 1-20%, 21-40%, 41-60%, 61-80% e 81-100%)) (Mourão et al., 2024).

3.3.3. Previsão do número de edifícios no local de estudo

Face à crescente ocupação populacional das zonas costeiras, torna-se essencial avaliar, à luz dos cenários climáticos projetados, o número total de edifícios potencialmente vulneráveis. De acordo com Mourão e colaboradores (2024), até 2070 estima-se que 17.584 e 17.854 edifícios nas áreas costeiras portuguesas fiquem expostos a riscos associados à subida do nível do mar, nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, respectivamente. Até ao final do século XXI, esses números deverão aumentar para 20.288 e 23.210 edifícios, respetivamente (Figura 9 e Figura 10).

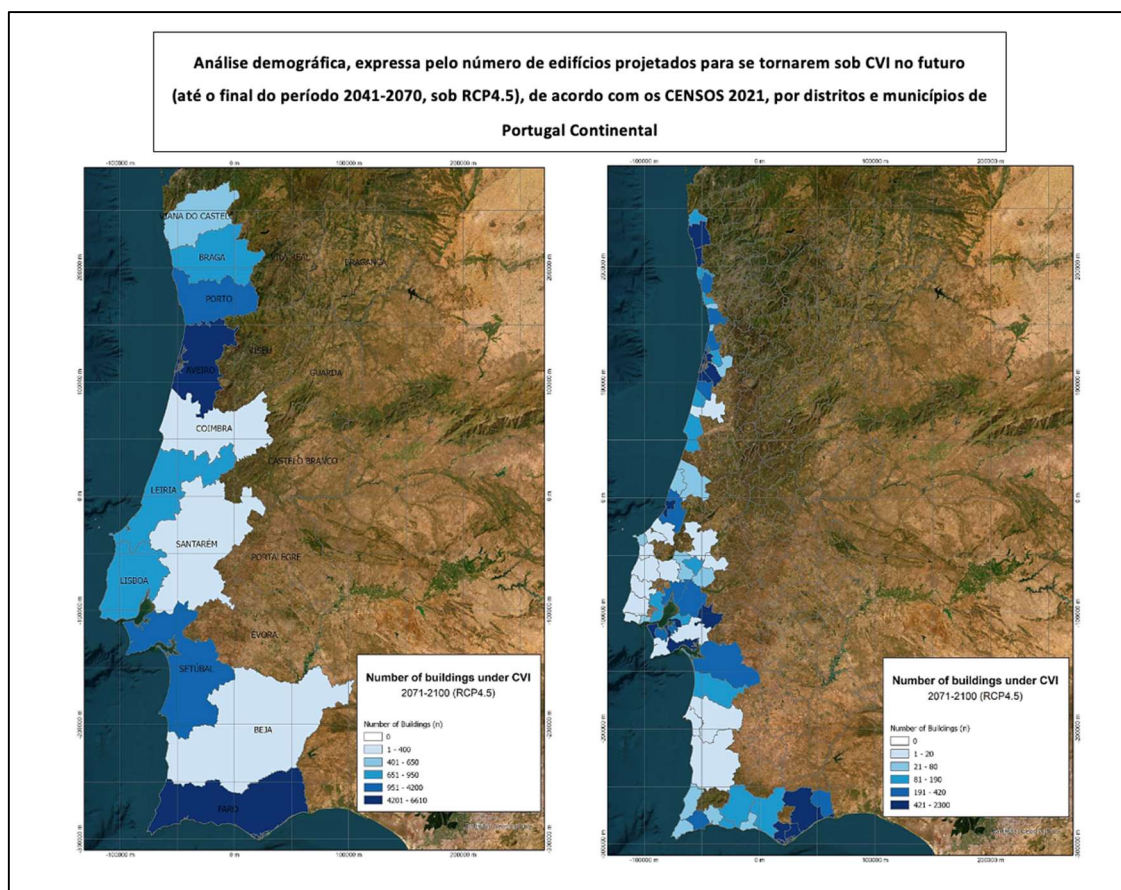


Figura 9 - Número de edifícios projetados por distritos e municípios no final do período de 2071 a 2100, sob RCP4.5 (CENSOS 2021) (Note-se que os intervalos da escala de cores não são uniformes, sendo divididos por quantis (0%, 1-20%, 21-40%, 41-60%, 61-80% e 81-100%))

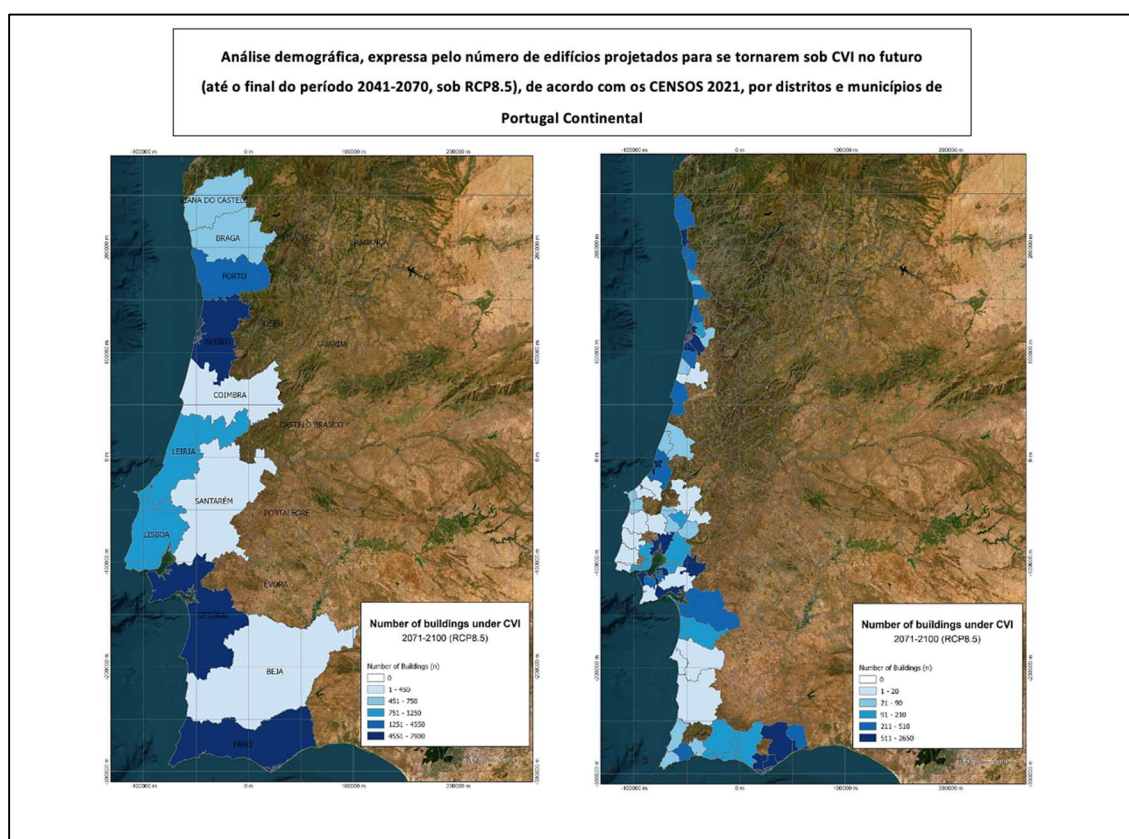


Figura 10 - Número de edifícios projetados por distritos e municípios no final do período de 2071 a 2100, sob RCP8.5 (CENSOS 2021) (Note-se que os intervalos da escala de cores não são uniformes, sendo divididos por quantis (0%, 1-20%, 21-40%, 41-60%, 61-80% e 81-100%)) (Mourão et al., 2024).

A cidade de Matosinhos, que pertence á área metropolitana do porto (local considerado no estudo), conforme destacado na análise, apresenta um aumento considerável no número de edifícios e residentes afetados nos cenários mais severos, destacando a urgência de implementar medidas de adaptação urbana e ações preventivas para mitigar os impactos das alterações climáticas (Quadro 16).

Quadro 16 - Número de residentes e edifícios projetados por distritos e municípios no final do período de 2041 a 2100 (Edifícios (E) e residentes (R)) (Mourão et al., 2024).

DISTRITO	2041-2070 (RCP4.5) (E)	2041-2070 (RCP4.5) (R)	2041-2070 (RCP8.5) (E)	2041-2070 (RCP8.5) (R)	2071-2100 (RCP4.5) (E)	2071-2100 (RCP4.5) (R)	2071-2100 (RCP8.5) (E)	2071-2100 (RCP8.5) (R)
VIANA DO CASTELO	487	1157	480	1121	625	1509	721	1698
BRAGA	527	1038	516	1024	662	1390	738	1588
PORTO	732	2263	674	2053	1054	3281	1338	4196
AVEIRO	4297	9359	4288	9381	4672	10285	4796	10394
COIMBRA	191	495	238	564	266	640	335	756
LEIRIA	640	641	781	750	949	909	1240	1163
SANTARÉM	334	529	338	519	382	584	448	677
LISBOA	746	3461	751	3494	901	4264	1159	5476
SETÚBAL	3691	12950	3801	13205	4161	14886	4578	16769
BEJA	10	14	11	15	13	15	19	21
FARO	5929	13423	5976	13480	6603	15009	7838	17725
TOTAL ZONAS COSTEIRAS	17584	45330	17854	45606	20288	52772	23210	60463

3.4. Património Geológico

A região do Porto apresenta um património geológico relevante, destacando-se o Complexo Metamórfico da Foz do Douro, visível nos afloramentos rochosos da faixa costeira a sul do Castelo do Queijo, e os afloramentos do Granito do Porto. No entanto, na área de intervenção direta do Porto de Leixões, não se encontra registada qualquer estrutura ou unidade geológica classificada como património geológico, quer a nível nacional, quer municipal.

Importa referir que o Porto de Leixões, infraestrutura portuária com origem no século XIX, está inserido numa zona altamente artificializada. As intervenções previstas para o prolongamento do quebra-mar decorrerão em meio aquático, afetando apenas a cobertura sedimentar superficial não consolidada no fundo marinho. Esta camada, por não possuir características de relevância geológica, não é considerada património geológico.

Embora não esteja classificada como geossítio, a praia de Matosinhos assume importância do ponto de vista cultural e turístico, situando-se na continuidade do geossítio do Complexo Metamórfico da Foz do Douro (Mourão et al., 2024). À medida que se avança para sul, na direção do Castelo do Queijo, surgem afloramentos rochosos que justificaram a classificação dos afloramentos emersos como Património Natural Municipal.

3.5. Enquadramento do Local

3.5.1. Enquadramento Geográfico

O Porto de Leixões (Figura 11) localiza-se no concelho de Matosinhos, nas imediações da cidade do Porto, com coordenadas geográficas de 41º 11' N e 8º 42' W. Do ponto de vista tectónico, insere-se na placa euroasiática, delimitada a sul pela falha Açores-Gibraltar. Esta região não é considerada de elevada tectonossismicidade no contexto nacional (Ribeiro et al., 2007).

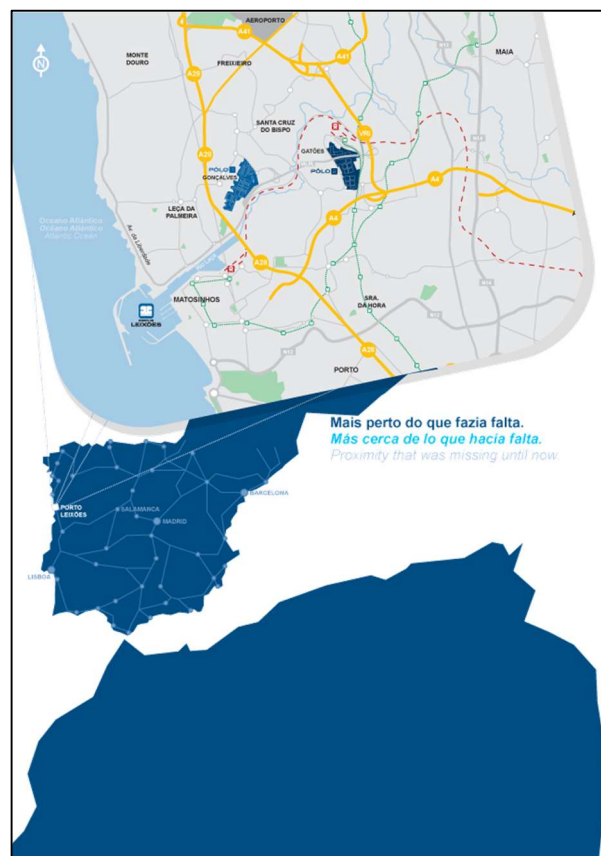


Figura 11 – Localização do Porto de Leixões (Retirado APDL).

Mais especificamente, o porto situa-se a cerca de 4 km a norte da foz do Rio Douro, entre municípios de Matosinhos (a sul) e Leça da Palmeira (a norte). A infraestrutura portuária inclui um cais com cerca de 5 km de extensão, 55 hectares de terraplenos e 120 hectares de área molhada. O canal de entrada, delimitado pelas cabeças dos molhes de abrigo, possui uma largura de 220 metros, alargando para 500 metros a 240 metros da entrada, estreitando-se novamente até 113 metros na entrada principal da doca nº 1 (Nemus, 2018).

A área de intervenção caracteriza-se por uma geologia e tectónica complexas, refletindo a evolução do Maciço Hespérico (a unidade geológica mais antiga de Portugal) e da Zona Centro Ibérica. Esta última é dominada por um substrato constituído essencialmente pelo complexo xisto-grauváquico ante-ordovícico (pormenores em Chaminé et al., 2003; Afonso et al., 2004). Na região do Porto de Leixões, predominam rochas metassedimentares, com destaque para os micaxistos, coexistindo com diversos tipos de rochas graníticas formadas durante o Paleozóico (Nemus, 2018).

No que concerne à fraturação, observam-se descontinuidades predominantemente orientadas segundo o quadrante NW-SE, com algumas também no sentido NE-SW. As fraturas verticais e subverticais são as mais frequentes, constituindo as principais descontinuidades da zona (Nemus, 2018).

As formações mais antigas do Maciço Hespérico encontram-se discordantemente sobrepostas a depósitos quaternários de origem fluvial, associados à rede de drenagem, e marinhos, moldados pela ação de agentes erosivos responsáveis pela modelação da faixa costeira (e.g., Araújo et al., 2004; Nemus, 2018).

3.5.2. Enquadramento Geológico

Do ponto de vista geológico, o Porto de Leixões assenta sobre um substrato rochoso composto por granitos e xistos pertencentes ao Maciço Antigo, o qual se encontra coberto por uma camada sedimentar recente, de origem fluvial e marinha. Os sedimentos aluvionares apresentam uma granulometria variável, predominando os lodos e areias finas no interior do porto, e as areias mais grossas nas imediações da barra. Esta distribuição é condicionada tanto pelo transporte fluvial do rio Leça como pela dinâmica sedimentar associada à deriva litoral da praia de Matosinhos. A espessura da cobertura sedimentar é geralmente reduzida, oscilando entre 1 e 1,5 metros, embora possa atingir espessuras de até 6 metros em zonas pontuais. No exterior do porto, esta camada apresenta uma variação mais acentuada, situando-se entre 4 e 10,5 metros de espessura (Nemus, 2018).

O substrato rochoso é composto maioritariamente por rochas granitóides, comumente conhecidos como “granito do Porto” (Figura 12), as rochas metassedimentares do paleozoico inferior (Chaminé et al., 2003).

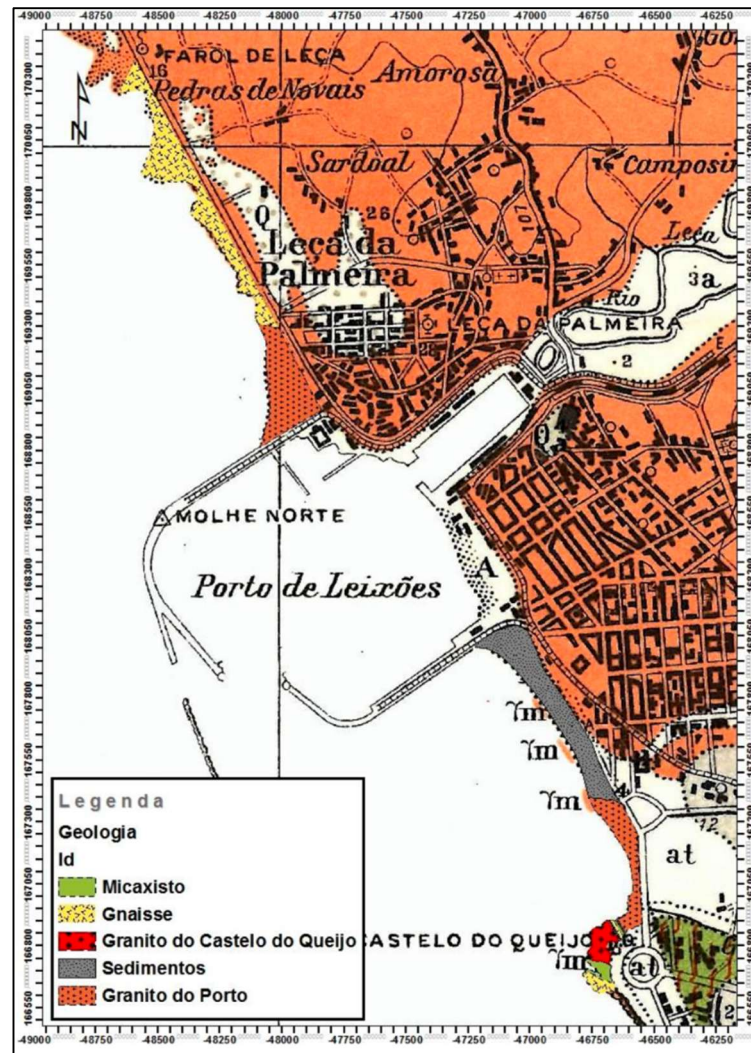


Figura 12 - Geologia encontrada na área *onshore* do Porto de Leixões (extracto da carta geológica de Portugal – Folha do Porto (1957); Retirado de Pacheco, 2013).

Os granitos próximos à superfície apresentam-se decompostos em saibros, adquirindo uma textura gnáissica à medida que a profundidade aumenta e a rocha se torna menos decomposta. Os xistos, por sua vez, decompõem-se em areias finas e argilas micáceas nos primeiros metros, evoluindo para rochas mais consolidadas em profundidade.

Campanhas de prospeção geotécnica e geofísica (Figura 13), permitiram identificar a presença de aluviões e zonas de rocha altamente decomposta (W5). Abaixo de -12 m (ZHL), o maciço rochoso

revela um grau de alteração menor, onde predominam rochas de baixa qualidade e grande fracturação, em conformidade com as classificações W2-3 e F4-5 (Argonvia, 2009).

Na foz do rio Leça, os depósitos espessos de areias e argilas são remanescentes de processos de transgressão e regressão marinha, com o fundo rochoso atingindo até -27 m (ZHL) em algumas áreas. Este contexto geológico influencia diretamente as intervenções no porto, exigindo ajustes conforme a litologia e o grau de alteração dos materiais encontrados (Argonvia, 2009).

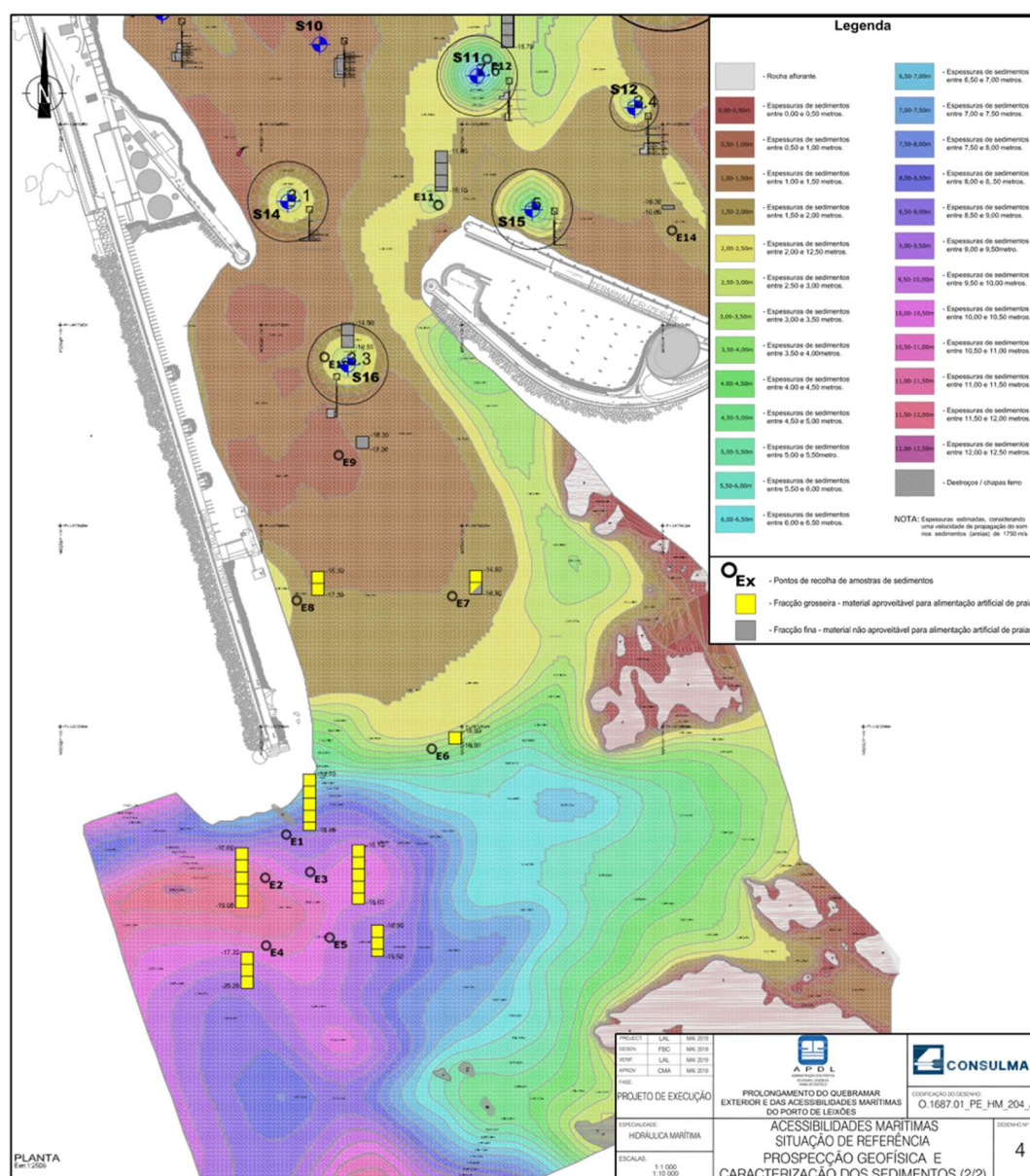


Figura 13 – Planta adaptada da campanha de prospeção geofísica (retirado de CONSULMAR, 2019).

3.5.3. Enquadramento Geomorfológico

O Porto de Leixões está localizado na unidade geomorfológica da Planície Litoral Minho-Douro, uma região caracterizada por uma plataforma de abrasão fóssil talhada em rocha, com um sistema praia-duna estreito e a presença pontual de terraços sedimentares. Esta faixa costeira apresenta altitudes geralmente inferiores a 50 metros, com um relevo predominantemente aplanado.

O setor costeiro onde se encontra a área portuária é praticamente retilíneo (Figura 14), com uma orientação dominante NNW-SSE. A linha de costa é composta por uma faixa rochosa de baixa altitude, intercalada com pequenas praias de areias médias a grosseiras, por vezes com cascalho, encaixadas entre afloramentos graníticos característicos da região (Nemus, 2018).

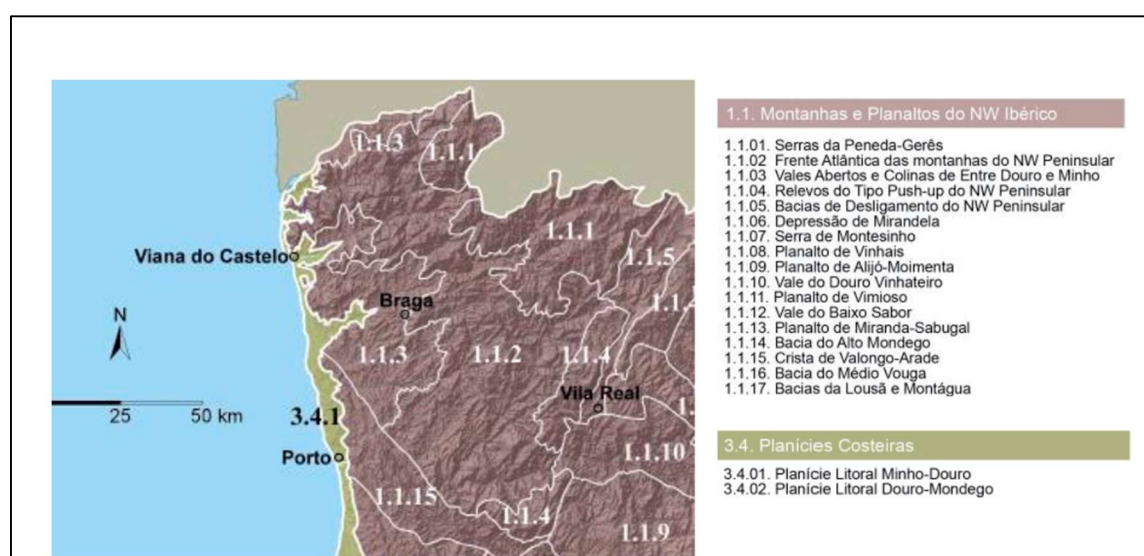


Figura 14 - Enquadramento geomorfológico do Porto de Leixões (retirado de nemus, 2018).

A fisiografia da zona costeira é moldada pelo contexto geológico e sedimentar, pela dinâmica dos agentes oceanográficos e pela presença da infraestrutura do Porto de Leixões (Nemus, 2018).

Ao norte do porto, localiza-se a praia de Leça da Palmeira, uma praia arenosa com forma de cunha, cuja largura aumenta progressivamente em direção ao molhe norte. Esse crescimento resulta da retenção de sedimentos transportados pelas correntes de deriva litoral, que predominam no sentido norte-sul (Nemus, 2018). Por sua vez, ao sul do porto, entre o molhe sul e o Castelo do Queijo, situa-se a praia de Matosinhos, também com morfologia em cunha. Esta apresenta-se mais larga no extremo norte e afunila gradualmente para o sul, onde são visíveis afloramentos rochosos. Ao contrário da praia a norte, a praia de Matosinhos é composta por areias de granulometria mais fina (Nemus, 2018).

3.5.4. Enquadramento Geotécnico

No âmbito dos trabalhos de prospeção geológica-geotécnica conduzidos pela Argonvia em 2019, foram efetuadas 16 sondagens com profundidades variáveis entre 1,5 m (nas áreas do Posto B e do Terminal de Petroleiros) e 12,5 m (na área do atual Terminal Multiusos). Estas sondagens possibilitaram caracterizar a cobertura sedimentar presente no interior do porto, a qual assenta sobre um substrato rochoso composto por xisto-grauváquico e granito. Embora parte desses materiais tenha sido posteriormente removida por dragagens, as suas propriedades geotécnicas continuam a ser consideradas representativas para a área de intervenção.

A definição dos horizontes geotécnicos baseou-se na litologia, nos resultados dos ensaios *SPT* (*Standard Penetration Test*), na resistência à compressão simples e em parâmetros de caracterização do maciço rochoso, tais como o grau de alteração, o nível de fracturação e o *RQD* (*Rock Quality Designation*) (Figura 15). A extrapolação espacial dos horizontes foi realizada com base nas espessuras identificadas nas sondagens (Argonvia, 2019).

A cobertura sedimentar da área é composta principalmente por aluviões silto-argilosas e lodosas no interior do porto, enquanto nas zonas externas e de entrada portuária prevalecem materiais de natureza arenosa.

O substrato rochoso, constituído por xistos e granitos, apresenta-se consolidado e compacto em profundidade. No entanto, a camada superior encontra-se descomprimida devido à ação prolongada das águas, com uma espessura variando entre 30 cm e 3,5 m.

O grau de alteração do substrato varia entre medianamente alterado (W3) e pouco alterado (W2), sendo a fracturação classificada entre fraturas próximas (F4) e muito próximas (F5). Estas descontinuidades apresentam características como oxidação, rugosidade e ligeira ondulação. Os valores de *RQD* (*Rock Quality Designation*) observados são, em geral, inferiores a 50%, indicando uma qualidade geotécnica reduzida do maciço. Os índices de recuperação variam entre 53% e 100% nos granitos e entre 29% e 100% nas rochas xistosas, refletindo a heterogeneidade do estado de conservação do substrato rochoso (Argonvia, 2019).

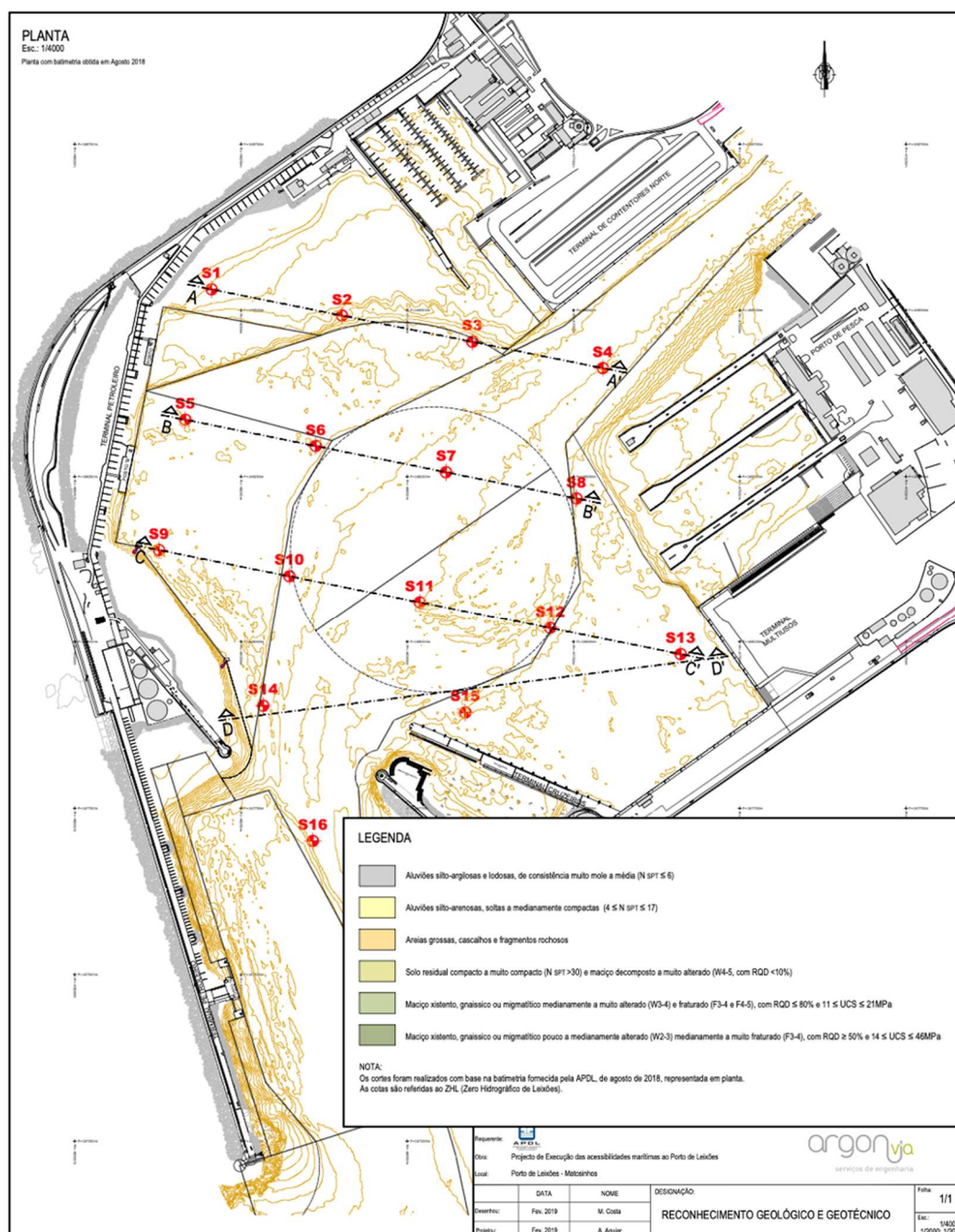


Figura 15 – Planta adaptada dos trabalhos de prospeção geológica-geotécnica Argonovia (retirada de Argonovia, 2019).

3.5.5. Enquadramento Tectonossísmico

O território português encontra-se inserido numa região com histórico significativo de atividade sísmica, situando-se na zona de transição entre as placas tectónicas Africana e Euroasiática. Embora a maioria da sismicidade em Portugal esteja associada ao contexto geotectónico global, parte desta atividade está igualmente relacionada com o movimento de falhas ativas que atravessam o Maciço Hespérico (Ribeiro et al., 2007).

Segundo a Carta de Intensidades Máximas Históricas do Instituto de Meteorologia (Figura 15), a zona onde se localiza o projeto regista uma intensidade sísmica máxima de grau VI na Escala de Mercalli Modificada (1956). Este nível de intensidade é classificado como bastante forte, sendo perceptível por toda a população e podendo causar danos materiais significativos (Nemus, 2018).

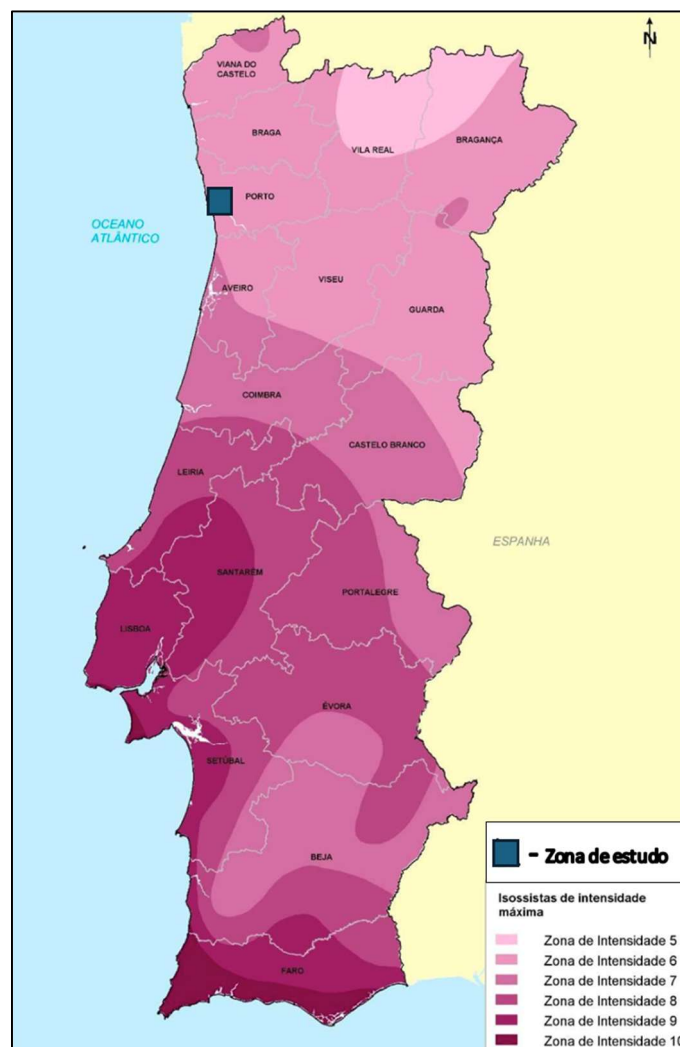


Figura 16 - Intensidade macrossísmica do território português (Retirado de Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil (ANEPC), 2014).

Na região onde se insere o projeto foram identificadas várias falhas ativas prováveis, com destaque para a falha de Porto-Coimbra-Tomar, cujo extremo norte se localiza a sul do Porto de Leixões (na região da Foz do Douro; Chaminé et al., 2003). Esta megaestrutura crustal encontra-se catalogada na base de dados de falhas ativas quaternárias da Península Ibérica, apresentando uma extensão superior a 150 km e uma orientação predominante NNW-SSE. A sua cinemática permanece indeterminada, não se conhecendo ainda com precisão o tipo de movimento que lhe está associado (Chaminé et al., 2003). Para além desta estrutura de grande relevância, foram também identificadas outras falhas potenciais na região, com orientações NNE–SSW e N–S, cuja atividade e tipo de movimentação permanecem igualmente não caracterizados.

3.5.6. Enquadramento Hidrogeológico

O contexto hidrogeológico da área em estudo é essencial para compreender a dinâmica das águas subterrâneas e a sua interação com os demais componentes do ambiente físico. A geologia local exerce influência direta sobre as condições hidrogeológicas, uma vez que determina a ocorrência, distribuição e comportamento das águas subterrâneas.

As litologias presentes controlam a porosidade e a permeabilidade dos materiais, os quais condicionam o fluxo subterrâneo e a capacidade de armazenamento de água. Nas formações sedimentares, a granulometria e o grau de cimentação das rochas são determinantes para a mobilidade da água, enquanto nas cristalinas, a circulação depende do grau de fracturação.

A área do projeto está integrada na zona de influência da massa de água subterrânea do Maciço Antigo Indiferenciado da Bacia do Leça, sustentada por rochas metassedimentares e granitoides. Estas unidades geológicas formam um meio de escoamento fissurado, com produtividade relativamente baixa, uma condição típica da região Norte de Portugal Continental (e.g. Afonso et al., 2004, 2020).

As principais características hidrogeológicas destas unidades encontram-se sintetizadas nos parâmetros apresentados na Figura 17.

Grupos Hidrogeológicos Regionais	Unidades Hidrogeológicas	CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS										
		Ligação à rede hidrográfica			Tipo de escoamento		Horizonte de alteração				Captações mais produtivas	
		tem	não tem	pode ter	meio poroso	meio fissurado	espessura baixa	espessura alta	argiloso	arenoso	poços, minas, nascentes	furos
Depósitos de cobertura	Areias de dunas e praia; aluviões	x			x		n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	x	
	Depósitos e terraços flúvio-marinhos	x			x		n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	x	
Rochas metassedimentares	Quartzo-filitos, micaxistos e xistos negros			x		x	x	x		x		x
	Quartzitos e xistos andosíferos		x	x		x	x			x		x
	Xistos, grauvaques e metaconglomerados			x		x		x	x			x
Rochas graníticas	Granito de grão médio a grosseiro de duas micas, com megacristais de feldspato K			x		x		x		x	x	
	Granito de grão médio a fino essencialmente biotítico			x		x		x		x	x	
	Gnaisses e migmatitos			x		x	x	x		x	x	

n. a. = não aplicável

n.a. = não aplicável

Figura 17 - Características das unidades hidrogeológicas (retirado de Nemus, 2018).

Na região em estudo, os recursos hídricos subterrâneos são escassos e mal distribuídos, devido à predominância de rochas cristalinas compactas e fissuradas com baixa permeabilidade, o que representa um desafio ao seu aproveitamento (Afonso et al., 2004, 2019, 2020). Em áreas onde há maior grau de alteração e fracturação, observa-se uma melhoria na capacidade hidrogeológica, embora com produtividades limitadas, que normalmente não superam os 3 L/s por captação tubular unitária (Nemus, 2018).

A alteração superficial controla o fluxo na parte superior do maciço, funcionando como um reservatório, enquanto as discontinuidades funcionam como vias preferenciais de circulação das águas em profundidade (Nemus, 2018). Estas formações cristalinas possibilitam a formação de sistemas aquíferos que dependem das características geomecânicas das rochas, exibindo um carácter descontínuo e parâmetros hidráulicos, como transmissividade e armazenamento, que variam em pequenas escalas. No entanto, a baixa produtividade, aliada às limitações estruturais, justifica a ausência de captações subterrâneas registadas no concelho de Matosinhos no Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH).

A recarga da massa de água subterrânea do Maciço Antigo Indiferenciado da Bacia do Leça ocorre sobretudo por infiltração direta da precipitação e por interações com cursos de água, facilitadas pela presença de falhas e fraturas com ligação hidráulica. A taxa de recarga estimada varia entre 5% e 10% da precipitação média anual (Nemus, 2018).

A descarga natural desta massa de água verifica-se preferencialmente para linhas de água e nascentes, localizadas em fundo de vale e em exsurgências nas bases das vertentes. Devido à ausência de pressões significativas e à estabilidade nas características hidroquímicas e hidrodinâmicas, esta massa de água foi classificada como estando em bom estado químico e quantitativo, em conformidade com os critérios da Diretiva Quadro da Água (Nemus, 2018).

Estudos realizados na região do Porto revelaram caudais variáveis e uma permeabilidade média moderada, com valores de transmissividade e coeficiente de armazenamento oscilando dentro de intervalos típicos para rochas fraturadas (e.g., Afonso et al., 2004, 2019, 2020). Análises físico-químicas de furos instalados no Porto de Leixões em 2010 indicaram problemas pontuais de mineralização e concentrações elevadas de cloretos, atribuídas à proximidade com o mar (Nemus, 2018).

De igual modo, a vulnerabilidade à poluição dessas formações depende essencialmente do grau de fracturação e alteração das rochas, sendo geralmente baixa, embora possa variar localmente, dependendo das condições geológicas específicas do material-rocha.

3.5.7. Enquadramento Hidrodinâmico e Marés

Com base na caracterização hidrodinâmica disponibilizada pela CONSULMAR (2019), foram determinados os principais níveis característicos de maré para o local em estudo.

Estes valores, apresentados no Quadro 17, incluem os extremos de preia-mar e baixa-mar, bem como os valores médios e os correspondentes aos regimes de águas-vivas e águas-mortas (Dado que o zero hidrográfico de leixões (ZHL) foi fixado em relação a níveis médios adotados há vários anos, existe uma diferença sistemática de cerca de +10 centímetros entre as alturas de águas e as alturas de maré previstas (Arquivo APDL)).

Quadro 17 - Níveis característicos de maré (m) no local segundo (CONSULMAR, 2019).

PARÂMETRO	NÍVEL DE MARÉ (m)
PREIA-MAR MÁXIMA	3,62
PREIA-MAR ÁGUAS-VIVAS	3,15
PREIA-MAR MÉDIA	2,74
PREIA-MAR ÁGUAS MORTAS	2,34
NÍVEL MÉDIO DO MAR	1,67
BAIXA-MAR ÁGUAS MORTAS	1,01
BAIXA-MAR MÉDIA	0,61
BAIXA-MAR ÁGUAS-VIVAS	0,21
BAIXA-MAR MÍNIMA	-0,23

A identificação precisa destes níveis é fundamental para a definição dos limites de atuação das estruturas portuárias, para a calibração de modelos hidrodinâmicos e para a avaliação dos efeitos das marés na penetração de cloretos e na durabilidade dos materiais em ambientes marítimos.

Capítulo IV

Uma Análise de Cenários

[página propositadamente em branco]

4. Uma Análise de Cenários

4.1. Análise de Cenários

4.1.1. Caracterização climática em Portugal

O Roteiro Nacional para a Adaptação 2100 (RNA 2100), instrumento estratégico central face aos desafios climáticos do século XXI em Portugal, tem como principal objetivo avaliar a vulnerabilidade do território nacional às alterações climáticas e promover medidas de adaptação eficazes.

Em consonância com a Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas (ENAA 2020) e o Programa Nacional da Política de Ordenamento do Território (PNPOT), o RNA 2100 adota uma abordagem integrada e multidisciplinar, assente em projeções climáticas, análise de custos associados à inação e orientações para políticas públicas.

As projeções climáticas desenvolvidas com base nos modelos EURO-CORDEX apontam para um aumento substancial da temperatura média anual, sobretudo no Nordeste e durante o verão, comum a todos os cenários de emissões (RCP 2.6 a RCP 8.5). Prevê-se igualmente uma redução da precipitação e maior irregularidade na sua distribuição. Destacam-se ainda riscos como o aumento da frequência e intensidade de incêndios florestais, com a possibilidade de triplicação dos dias de perigo extremo em algumas regiões, e a elevação do nível médio do mar, com consequências significativas na erosão costeira, Figura 18.

A incorporação destas projeções nos Planos Diretores Municipais (PDM) revela-se essencial para uma adaptação eficaz, exigindo a superação de constrangimentos técnicos e lacunas de informação a nível local.

A sua concretização depende de uma forte vontade política, do reforço do investimento e da promoção de uma gestão territorial orientada para a resiliência, com vista a preparar o país para os impactos das alterações climáticas.

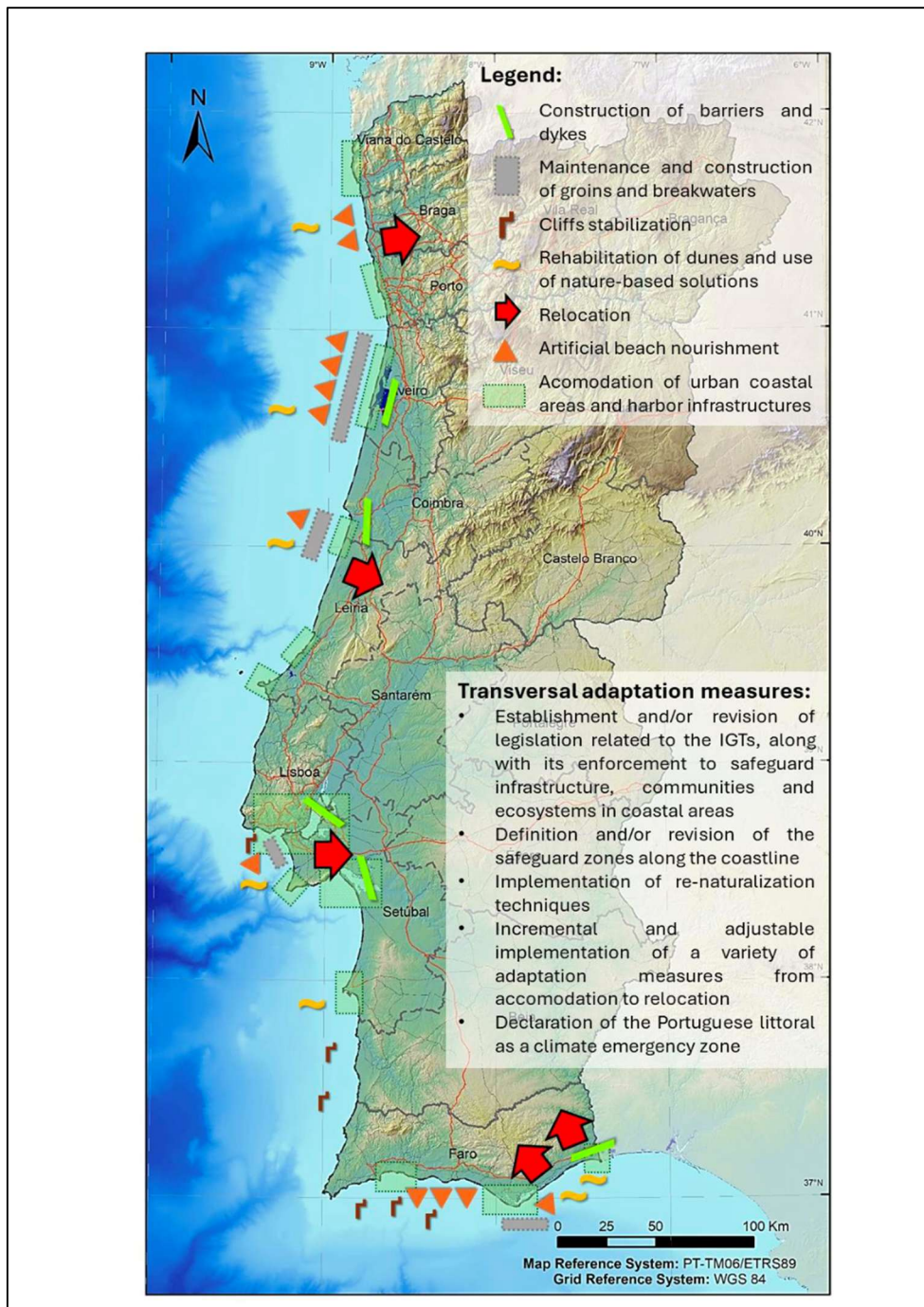


Figura 18 - Os setores de subida do nível do mar e erosão costeira (Luís et al., 2024).

As projeções climáticas para Portugal até ao final do século XXI, apresentadas no Quadro 18, apontam para um agravamento progressivo das condições climáticas, redução da precipitação, aumento das temperaturas médias e intensificação de fenómenos extremos. Estes fatores conjugados aumentam significativamente a vulnerabilidade do território à desertificação. O aumento térmico e a maior frequência de secas prolongadas intensificam ainda o risco de incêndios rurais, com repercussões socioeconómicas crescentes.

Quadro 18 - Principais riscos climáticos em Portugal (APA; ANEPC; CCIAM) (Seixas et al., 2023).

TIPOLOGIA	AGUDOS	CRÓNICOS
TEMPERATURA	• Ondas de calor; • Incêndios florestais.	• Variação da temperatura; • 'Stress' térmico.
VENTO	• Tempestades; • Ciclones.	
ÁGUA	• Variabilidade pluviométrica ou hidrológica; • Secas; • Chuva excessiva; • Inundações.	• Acidificação dos oceanos; • Intrusão salina; • Escassez de água; • Subida do nível do mar.
MASSA SÓLIDA	• Movimentos de massa em encostas.	• Degradação e desertificação dos solos; • Erosão dos solos.

A erosão costeira e o avanço do mar constituem ameaças relevantes, com projeções a indicarem uma subida do nível médio do mar entre 0,65m e 0,85m até 2100. A diminuição da precipitação anual, associada a uma maior variabilidade pluviométrica, deverá comprometer a recarga dos aquíferos, agravar os períodos de seca e acelerar a perda de biodiversidade.

O conceito de adaptação climática tem vindo a evoluir, deixando de se centrar unicamente na vulnerabilidade para integrar uma perspetiva de risco, que contemple a exposição, o perigo e a capacidade de resposta. O objetivo passa por mitigar os impactos negativos e fomentar um desenvolvimento mais sustentável e resiliente. O Quadro 19 ilustra os mecanismos implementados em Portugal para a adaptação e monitorização de eventos climáticos.

Quadro 19 - Adaptação e monitorização de eventos climáticos em Portugal (Seixas et al., 2023).

TIPO DE RESPOSTA	DESCRIÇÃO
PREVENIR OS EFEITOS DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS	Medidas para reduzir a exposição aos riscos climáticos, incluindo identificação e mapeamento de riscos, atualização do conhecimento e estratégias para restringir usos em áreas vulneráveis.
ACOMODAR OS EFEITOS DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS	Ações para compatibilizar a ocupação de territórios vulneráveis, como melhoria de normas de construção, redes de drenagem, telhados verdes e arborização urbana.
PROTEGER CONTRA OS IMPACTOS DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS	Medidas para manter áreas vulneráveis habitáveis, incluindo construção de diques, muros de proteção, bacias de retenção e obras de defesa costeira.
REMOVER TERRITÓRIOS EM PERIGO	Relocação de populações, infraestruturas e atividades económicas em áreas de alto risco quando não há capacidade financeira ou estrutural para mitigar os impactos.
RESPONDER E RECUPERAR RAPIDAMENTE	Ações para reforçar a capacidade de resposta e recuperação em emergências climáticas, incluindo planeamento, capacitação e aquisição de recursos para desastres.

O Plano Nacional Energia e Clima 2030 (PNEC 2030) orienta a transição energética em Portugal, promovendo a descarbonização, a eficiência e a segurança energética, bem como a aposta na inovação. O atual contexto geopolítico acentua a urgência destas medidas, impulsionadas pela Lei de Bases do Clima.

O país destaca-se na Europa pela aposta em energias renováveis, inovação e independência energética, garantindo um crescimento sustentável.

4.1.2. Fenómenos Climáticos – Temperatura

As projeções climáticas para Portugal Continental indicam um aumento generalizado da temperatura máxima diária ao longo do século XXI. A Figura 19 representa estas alterações futuras, considerando médias anuais e sazonais (DJF, MAM, JJA, SON – A sigla DJF refere-se aos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, correspondendo ao inverno meteorológico, a sigla MAM diz respeito aos meses de março, abril e maio, representando a primavera, a JJA corresponde aos meses de junho, julho e agosto, sendo utilizado para designar o verão, por fim, a sigla SON abrange os meses de setembro, outubro e novembro, associando-se ao outono.) para os períodos de 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100, sob os cenários de emissão RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5 (Matos Soares et al., 2024; Dias et al., 2024).

A variação projetada da temperatura máxima diária média anual para Portugal (NUTS I) oscila entre 1.12°C (RCP2.6) e 1.32°C (RCP8.5) em 2011-2040, aumentando para 1.47°C (RCP2.6) a 2.77°C

(RCP8.5) em 2041-2070, e atingindo entre 1.35°C (RCP2.6) a 4.68°C (RCP8.5) no período de 2071-2100 (Soares et al., 2024).

No que concerne a temperatura mínima diária (Figura 19), as projeções seguem um padrão semelhante, prevendo aumentos entre 1.10°C (RCP2.6) e 1.27°C (RCP8.5) em 2011-2040, subindo para 1.41°C (RCP2.6) a 2.52°C (RCP8.5) em 2041-2070, e atingindo 1.37°C (RCP2.6) a 4.24°C (RCP8.5) em 2071-2100 (Soares et al., 2024).

Estes valores resultam da média de múltiplos modelos climáticos regionais (RCMs) do projeto EURO-CORDEX, sendo a incerteza representada pelo desvio padrão das anomalias entre modelos. Em suma, as projeções indicam um aumento expressivo das temperaturas máximas e mínimas, com a magnitude das alterações dependente do cenário de emissões de GEE e do período temporal analisado (Soares et al., 2024).

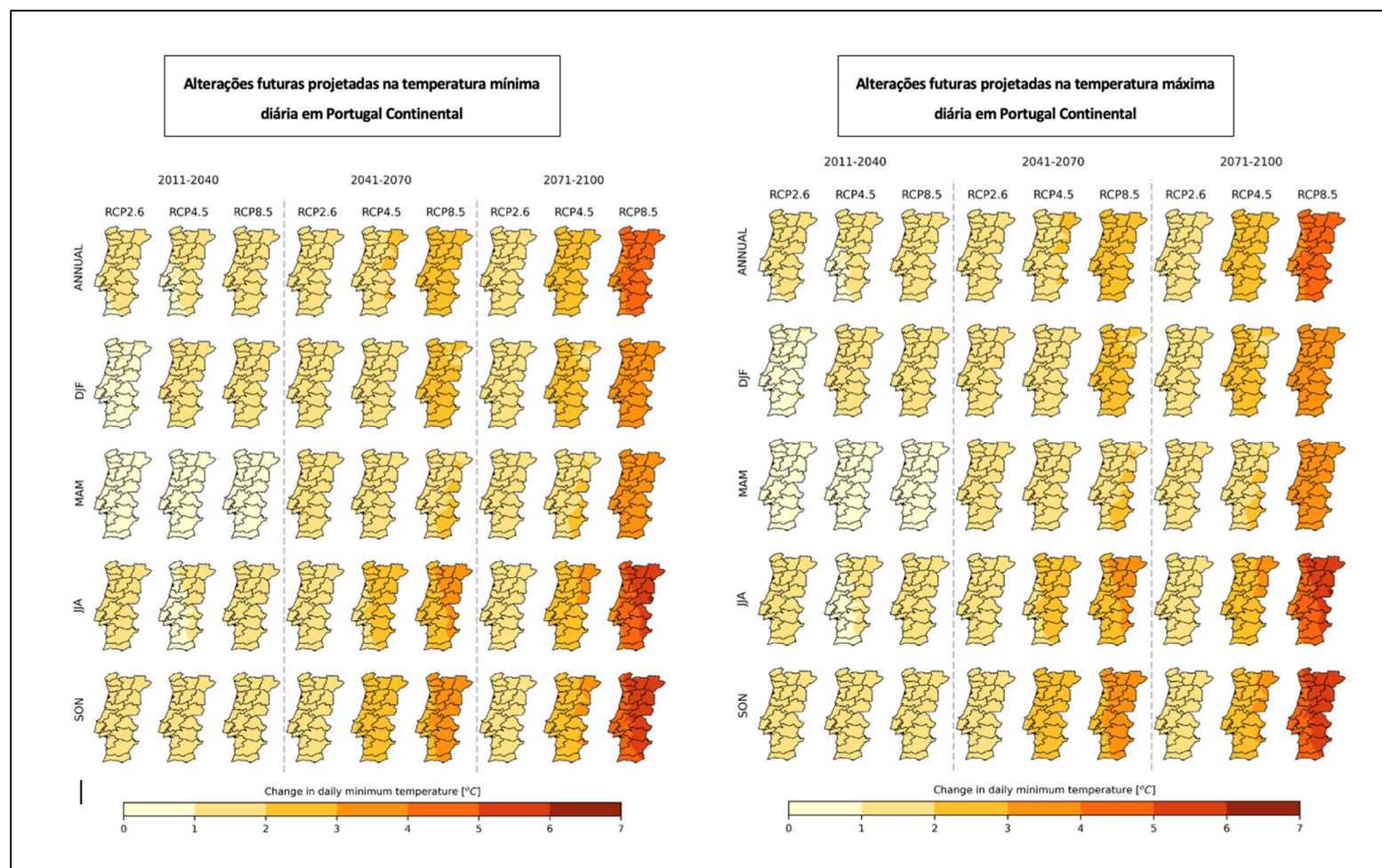


Figura 19 - Alterações futuras projetadas na temperatura mínima e máxima diária em Portugal Continental, considerando o período 1971-2000 como referência. As diferentes linhas de cima para baixo representam as médias de todos os meses, DJF, MAM, JJA e SON, respetivamente. As diferentes colunas representam os períodos futuros considerando diferentes cenários de emissão de GEE (Adaptado Soares et al., 2024).

4.1.3. Fenómenos Climáticos - Precipitação e Vento

No que respeita à precipitação total acumulada, as projeções ilustradas na Figura 20, apontam para uma diminuição generalizada em Portugal Continental ao longo do século XXI. No período de 2011-2040, as variações projetadas são relativamente modestas e semelhantes entre os três cenários de emissão (RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5), variando geralmente entre -10% e +5% (Soares et al., 2024).

Para 2041-2070, os cenários RCP4.5 e RCP8.5 indicam uma amplificação das condições de seca, com alterações negativas a nível nacional, podendo atingir -20% e -30%, respetivamente (Matos Soares et al., 2024; Dias et al., 2024). No final do século XXI (2071-2100), os valores no RCP4.5 tendem a estabilizar-se entre -20% e -5%, enquanto o RCP8.5 aponta para uma redução mais severa, podendo atingir -40% no sudoeste de Portugal (Soares et al., 2024).

As projeções sazonais revelam características distintas ao longo do ano, prevendo-se invernos (DJF) mais húmidos sob RCP2.6 após 2041 (até +30%) e sob RCP4.5 antes de 2040 (até +20% no norte). Na primavera (MAM), projeta-se um aumento da precipitação no norte de Portugal entre 2011 e 2040, seguido de diminuições acentuadas até -30% (RCP4.5) e -40% (RCP8.5) no final do século. As estações de verão (JJA) e outono (SON) são marcadas por diminuições consistentes para todos os períodos e cenários, podendo a diminuição da precipitação exceder -50% no verão, sob o cenário RCP8.5 (Soares et al., 2024).

Quanto à velocidade média diária do vento a 10 metros (Figura 20), os modelos EURO-CORDEX indicam variações pouco expressivas ao longo de todas as estações. As alterações mais relevantes ocorrem no inverno e outono sob o cenário RCP8.5, com reduções até -0.6 m/s no final do século (Soares et al., 2024).

Em síntese, as projeções climáticas para Portugal Continental indicam uma tendência clara de diminuição da precipitação total acumulada e alterações marginais na velocidade média do vento, cuja magnitude dependerá do cenário de emissões e do período temporal considerado (Soares et al., 2024).

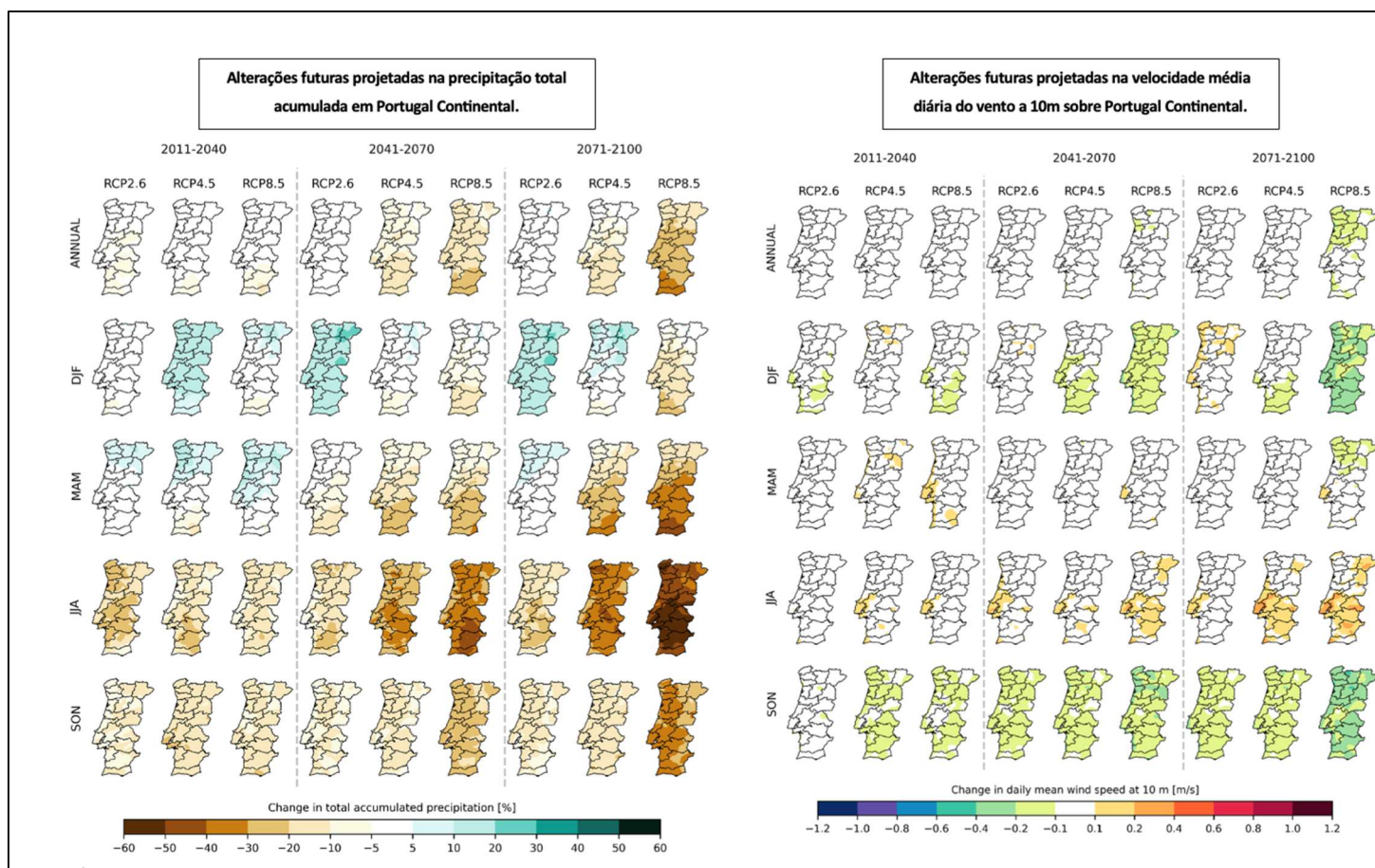


Figura 20 - Alterações futuras projetadas na precipitação total e na velocidade média diária do vento a 10 m acumulada em Portugal continental, apresentadas como variação percentual, considerando o período 1971-2000 como referência (considerar imagem anterior) (Adaptado de Soares et al., 2024).

4.1.4. Fenómenos Climáticos Extremos – Temperatura Máxima

As projeções climáticas para Portugal Continental apontam para alterações significativas no número médio anual de dias em que a temperatura máxima diária ultrapassa os 25°C e os 35°C (Figura 21), tendo como referência o período histórico de 1971-2000. Estas projeções, baseadas em múltiplos modelos climáticos regionais (RCMs), consideram diferentes cenários de emissão de GEE (Soares et al., 2024).

No que respeita aos dias de verão (temperatura máxima superior a 25°C), o clima histórico apresenta uma variabilidade regional que oscila entre 40 e 100 dias por ano no noroeste e entre 100 e 140 dias por ano no sudeste do território. As projeções futuras indicam um aumento generalizado deste indicador, com valores que, até ao final do século, poderão ultrapassar os 100 dias por ano em todo o país. Sob o cenário RCP8.5, o sul de Portugal poderá atingir cerca de 200 dias de verão por ano, o equivalente a mais de 6,5 meses. A dispersão entre modelos é reduzida, conferindo elevada robustez ao sinal da mudança projetada (Soares et al., 2024).

Quanto aos dias muito quentes (temperatura máxima superior a 35 °C), o período de referência mostra concentrações mais elevadas no sudeste, com valores entre 10 e 40 dias por ano, sendo significativamente mais baixos nas restantes regiões. As projeções apontam para um aumento mais pronunciado destes eventos, especialmente na região sudeste. No final do século XXI, sob o cenário RCP8.5, os acréscimos podem ultrapassar os 70 dias adicionais por ano face ao período histórico, com elevada consistência entre modelos (Soares et al., 2024).

As projeções indicam um crescimento expressivo tanto no número de dias de verão como de dias muito quentes em Portugal Continental ao longo do século XXI, com maior intensidade nas regiões do interior e sul, especialmente sob os cenários de emissão mais elevados. A elevada concordância entre os diferentes RCMs do projeto EURO-CORDEX reforça a fiabilidade destas estimativas.

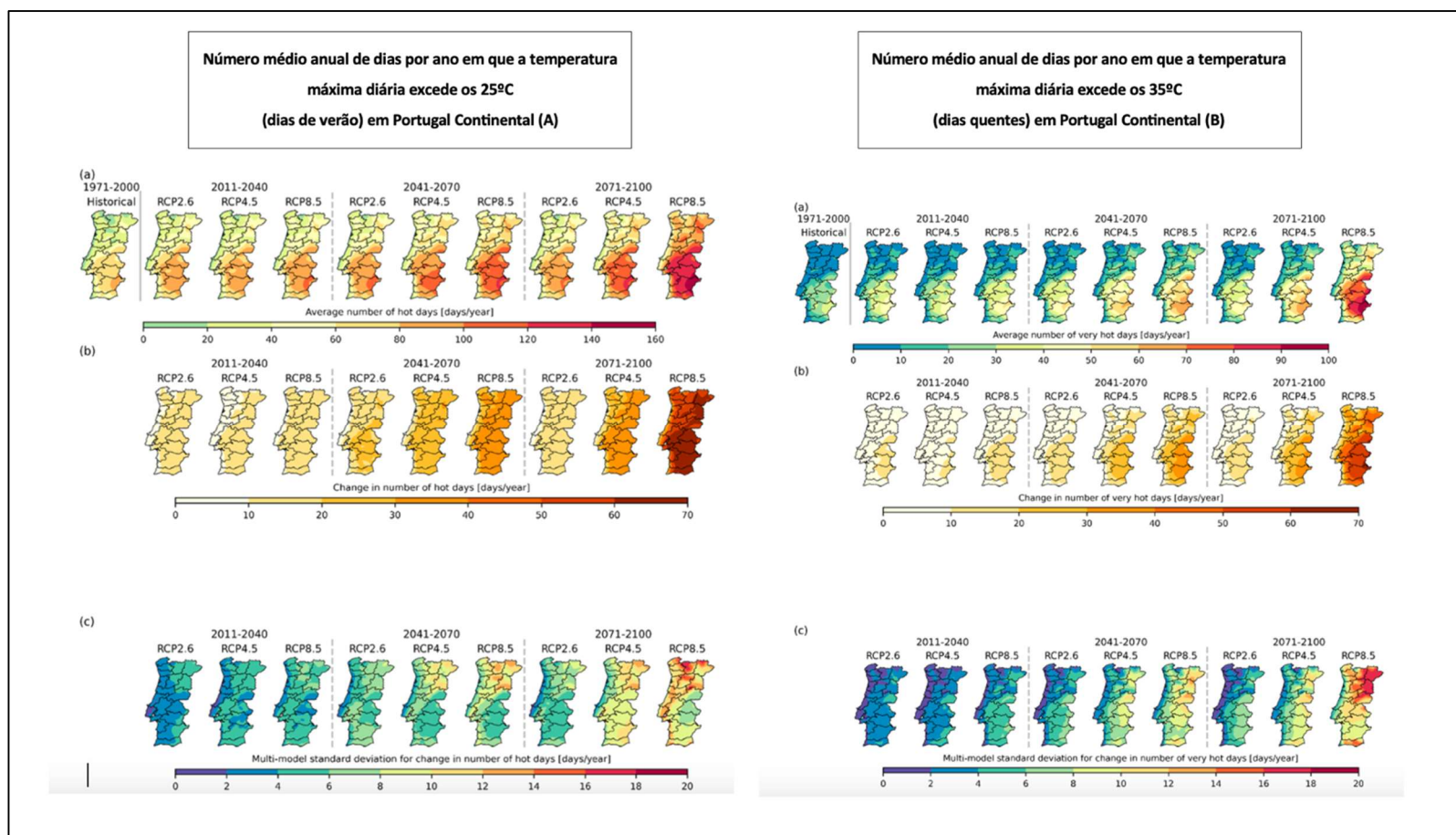


Figura 21 - (a) Número médio anual de dias por ano em que a temperatura máxima diária excede os 25°C **(A)** e 35°C **(B)** (dias de verão) em Portugal Continental, para o período histórico (1971-2000) e para os períodos futuros considerando diferentes cenários de emissão de GEE. (b) Alterações projectadas para o futuro no número médio de dias de verão, considerando o período 1971-2000 como referência. (c) Dispersão de vários modelos nas alterações futuras projectadas projetadas no número médio de dias de verão, considerando o período 1971-2000 como referência (Adaptado Soares et al., 2024).

4.1.5. Fenómenos Climáticos Extremos – Temperatura mínima

As projeções climáticas para Portugal Continental indicam alterações significativas no número médio anual de dias com temperatura mínima diária inferior a 0°C (dias de geada) e 7°C (dias frios) (Figura 22), ao longo do século XXI, tendo como referência o período histórico de 1971–2000. Estas estimativas baseiam-se em modelos climáticos regionais do projeto EURO-CORDEX e consideram diferentes cenários de emissão de GEE (Soares et al., 2024).

Historicamente, os dias de geada distribuem-se com maior frequência na região nordeste, com médias entre 50 e 80 dias por ano, enquanto zonas costeiras registam apenas 0 a 10 dias e o restante do território apresenta entre 10 e 30 dias por ano. As projeções indicam uma diminuição progressiva destes eventos, particularmente sob o cenário RCP8.5, onde mesmo o nordeste do país poderá registar apenas 10 a 20 dias de geada até ao final do século (Soares et al., 2024).

No caso dos dias frios (temperatura mínima diária inferior a 7 °C), o padrão histórico revela maior incidência nas regiões do interior e norte. As projeções climáticas sugerem uma redução generalizada ao longo do século, mais acentuada nos cenários de maior emissão. As alterações mais expressivas são esperadas justamente nas zonas historicamente mais frias (Soares et al., 2024).

Tanto para os dias de geada como para os dias frios, a magnitude da redução projetada aumenta com o agravamento do cenário de emissões e com o avanço temporal. A baixa dispersão entre os modelos climáticos confere robustez às projeções, confirmando a tendência de diminuição dos dias frios em Portugal Continental ao longo do século XXI (Soares et al., 2024).

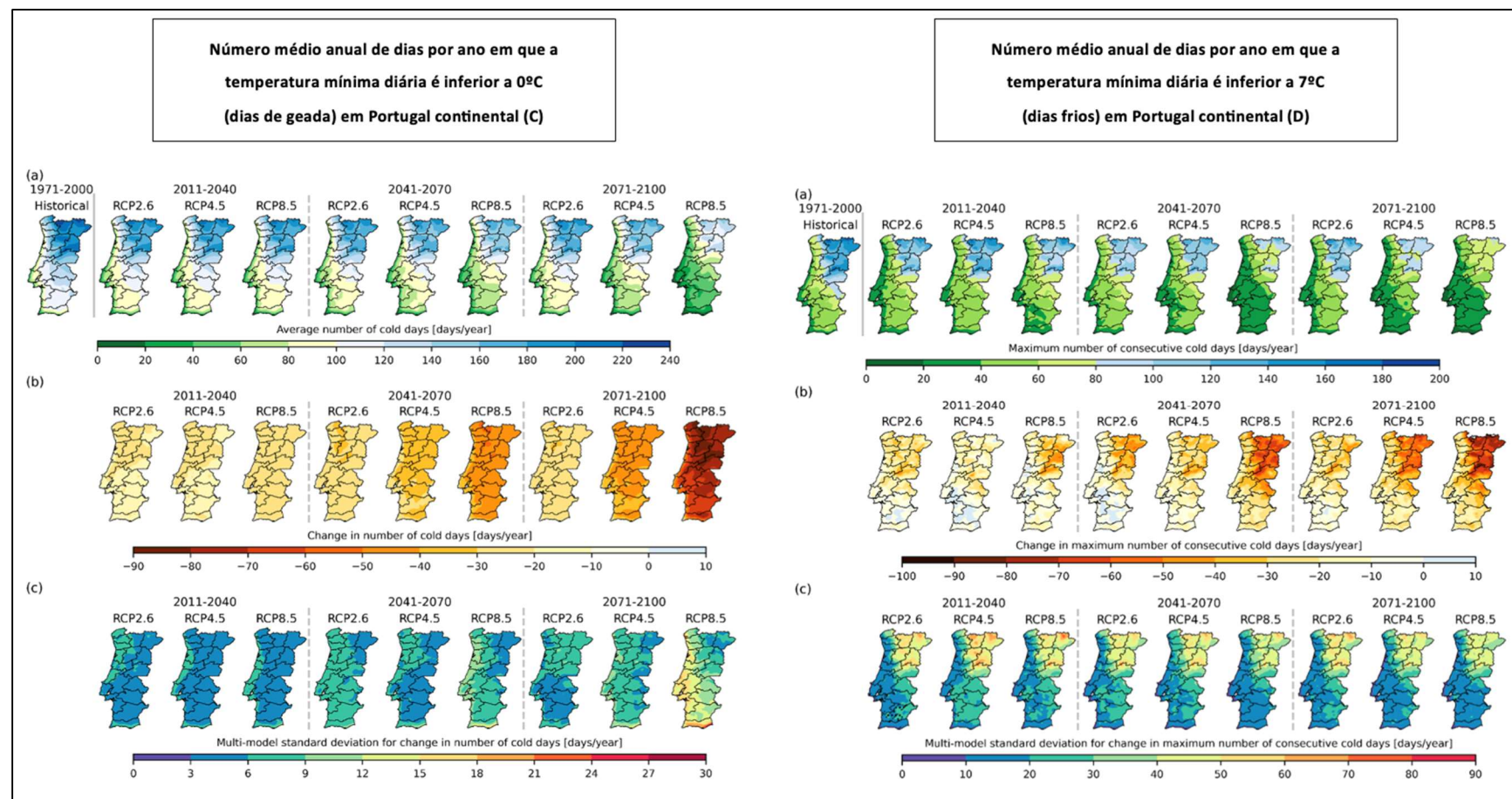


Figura 22 - (a) Número médio anual de dias por ano em que a temperatura mínima diária é inferior a 0°C **(C)** e 7°C **(D)** (dias frios) em Portugal continental, para o período histórico (1971-2000) e para os períodos futuros considerando diferentes cenários de emissão de GEE. (b) Alterações projetadas para o futuro no número médio de dias frios, considerando o período 1971-2000 como referência. (c) Dispersão de vários modelos nas alterações futuras projetadas no número médio de dias de frio, considerando o período 1971-2000 como referência (Adaptado Soares et al., 2024).

4.1.6. Fenómenos Climáticos Extremos – Precipitação

As projeções climáticas para Portugal Continental indicam alterações no número médio anual de dias com precipitação superior a 1 mm e 20 mm (Figura 23), tendo como referência o período histórico de 1971-2000 e considerando diferentes cenários de emissão de GEE. Estas projeções são baseadas em múltiplos RCMs do projeto EURO-CORDEX (Soares et al., 2024).

No que se refere aos dias com precipitação superior a 1 mm, o padrão histórico mostra uma maior frequência no noroeste do território, com mais de 140 dias por ano, enquanto o sudeste apresenta valores entre 60 e 80 dias. As projeções futuras indicam uma tendência de redução a partir de 2041–2070, especialmente sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5, sendo as alterações no período de 2011–2040 praticamente residuais. Esta redução torna-se mais acentuada no final do século XXI, especialmente sob o cenário de maiores emissões (RCP8.5) (Soares et al., 2024).

Relativamente aos dias com precipitação superior a 20 mm, o padrão espacial é semelhante, com o noroeste a registar entre 15 e 25 dias por ano, ao passo que o sudeste não ultrapassa os 5 dias. As projeções apontam para uma diminuição a partir do período de 2041-2070 para os cenários RCP4.5 e RCP8.5. As reduções mais significativas são esperadas para o cenário RCP8.5 no período de 2071-2100. Tal como para os dias com precipitação superior a 1 mm, as alterações projetadas para o período de 2011-2040 são mínimas (Soares et al., 2024).

A redução projetada no número de dias chuvosos, tanto para limiares moderados (superiores a 1 mm) como intensos (superiores a 20 mm), é mais acentuada nos cenários de maiores emissões e nos períodos temporais mais distantes. A baixa dispersão entre modelos, sobretudo para o limiar de 1 mm, reforça a confiança na robustez destas tendências (Soares et al., 2024).

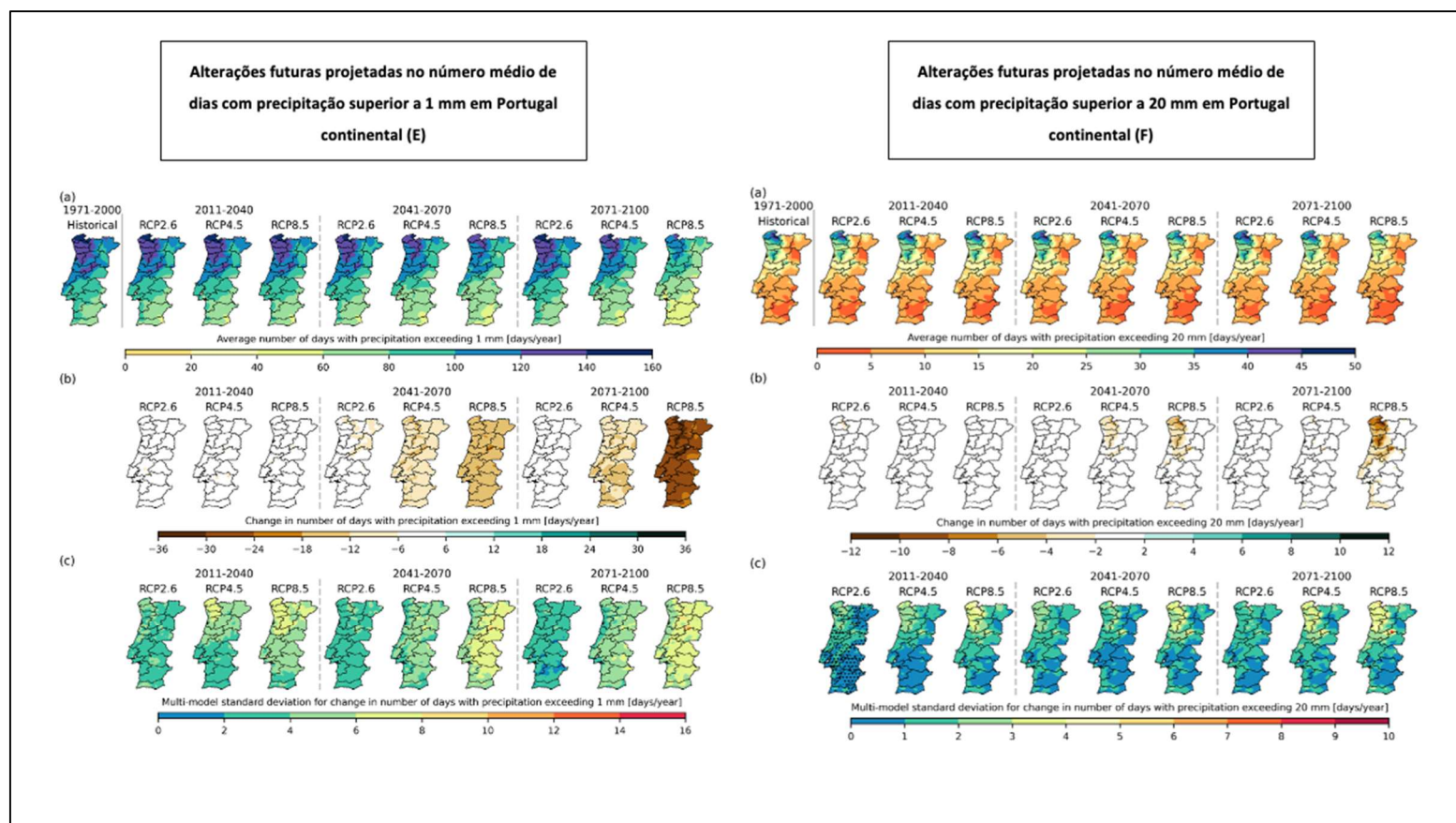


Figura 23 - (a) Número médio anual de dias com precipitação superior a 1 mm **(E)** e 20 mm **(F)** para o período histórico (1971-2000) e para os períodos futuros considerando diferentes cenários de emissões de GEE. (b) Alterações futuras projetadas no número médio com precipitação superior a 1 mm e de dias com precipitação superior a 20 mm em Portugal continental, considerando o período 1971-2000 como referência. (c) Dispersão multi-modelo nas alterações futuras projetadas para o futuro no número médio de dias com precipitação superior a 1 mm e com precipitação superior a 20 mm em Portugal continental, considerando o período 1971-2000 como referência (Adaptado Soares et al., 2024).

4.1.7. Fenómenos Climáticos Extremos – Vento

As projeções climáticas para Portugal Continental analisam a evolução da velocidade máxima diária do vento a 10 metros e do valor máximo diário da rajada de vento (Figura 24), tendo como referência o período histórico de 1971–2000 e considerando diferentes cenários de emissão de GEE. As estimativas baseiam-se em múltiplos RCMs do projeto EURO-CORDEX (Soares et al., 2024).

Historicamente, os valores mais elevados da velocidade máxima diária do vento a 10 m concentram-se nas zonas costeiras, atingindo cerca de 15 m/s, enquanto no interior os valores são geralmente inferiores a 10 m/s. Este padrão é globalmente mantido nos cenários futuros, com alterações pouco expressivas em todos os períodos e cenários. Ainda assim, projeta-se uma ligeira redução da velocidade máxima diária nas regiões do Centro e Alentejo, consistente ao longo dos diferentes horizontes temporais (Soares et al., 2024).

Quanto ao valor máximo diário da rajada de vento, o padrão histórico indica os maiores valores no noroeste e ao longo das faixas costeiras ocidental e sul, podendo ultrapassar os 32–34 m/s, enquanto no interior não excedem os 30 m/s. Para os cenários e períodos futuros, o padrão geral é similar ao do período histórico, com pequenas alterações projetadas. Para o início do século, projeta-se um aumento superior a 2 m/s na Área Metropolitana de Lisboa em todos os cenários RCP (Soares et al., 2024).

Para meados do século, o cenário RCP2.6 prevê um aumento generalizado em grande parte do território. Em contraste, os cenários RCP4.5 e RCP8.5 apontam para uma redução das rajadas na maior parte do território, com um aumento superior a 1 m/s localizado no noroeste. No final do século, as projeções divergem: sob RCP4.5 prevê-se um aumento nas regiões noroeste e sul, enquanto no cenário RCP8.5 as rajadas tendem a reduzir-se no interior, mantendo ligeiros aumentos nas zonas costeiras (Soares et al., 2024).

A dispersão entre modelos é geralmente baixa para ambas as variáveis, conferindo confiança às tendências projetadas, embora possa aumentar em contextos específicos, sobretudo para a rajada máxima (Soares et al., 2024).

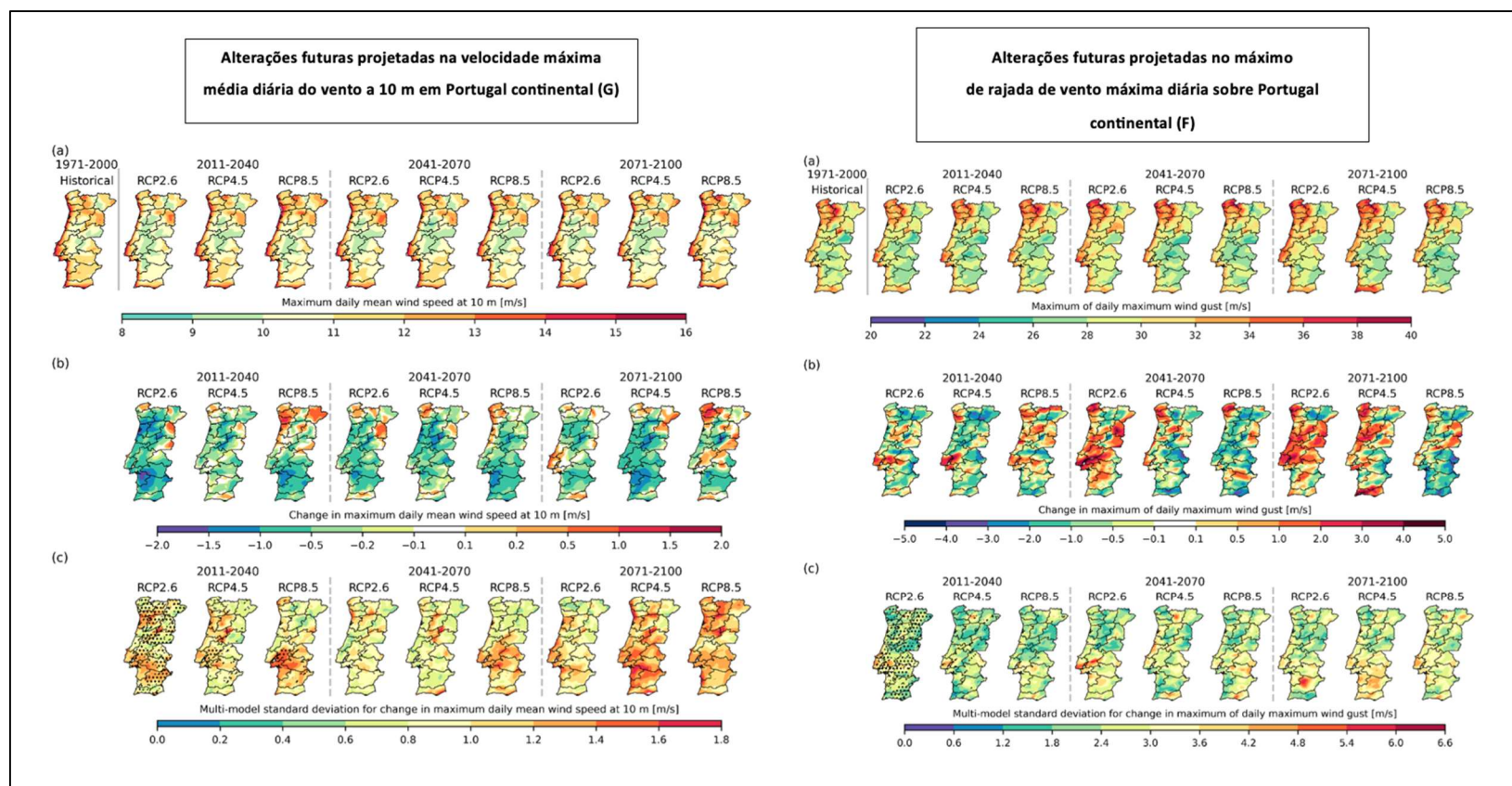


Figura 24 - (a) velocidade máxima diária do vento a 10 m (**G**) e máximo de rajada de vento máxima diária (**F**) para o período histórico (1971-2000) e para os períodos futuros considerando diferentes cenários de emissões de GEE. (b) Alterações futuras projetadas na velocidade máxima diária do vento a 10 m e máximo de rajada de vento máxima diária sobre Portugal continental, considerando o período 1971-2000 como referência. (c) Dispersão multimodelo das alterações projetadas para o futuro na velocidade máxima diária do vento a 10 m e no máximo da rajada de vento máxima diária sobre Portugal continental, considerando o período 1971-2000 como referência. Portugal continental, considerando o período 1971-2000 como referência (Adaptado Soares et al., 2024).

4.2. Monitorização

4.2.1. Importância da monitorização

A monitorização, entendida como um processo sistemático e contínuo de recolha e análise de dados ao longo do tempo, desempenha um papel crucial na preservação e gestão de diversas infraestruturas, nomeadamente as costeiras e portuárias, bem como na avaliação e mitigação de riscos ambientais e naturais.

No domínio portuário, a monitorização assume particular relevância na garantia da integridade estrutural, operacionalidade e segurança das infraestruturas ao longo do seu ciclo de vida. As defensas portuárias, fundamentais para a proteção de pessoas, ambiente, embarcações e estruturas, são alvo de monitorização regular, a qual pode ser realizada através de células de carga calibradas, transdutores de pressão e sensores de deslocamento. É essencial assegurar a calibração anual de todos os equipamentos, garantindo a fiabilidade das medições.

Mais do que uma mera avaliação de desempenho, a monitorização permite a deteção precoce de situações críticas, como sobretensões nas amarrações, compressões excessivas nas defensas ou movimentos anómalos dos navios que possam comprometer a segurança estrutural. A integração com sistemas de gestão de atracação e amarração, associada ao registo contínuo de variáveis ambientais, possibilita análises estatísticas detalhadas das cargas e movimentos em diferentes cenários operacionais e meteorológicos.

A conservação das estruturas costeiras, incluindo pavimentos portuários, depende também da monitorização, através de avaliações superficiais, funcionais ou estruturais que apoiam a tomada de decisão sobre intervenções de manutenção.

No contexto ambiental, a monitorização revela-se igualmente indispensável na previsão e no acompanhamento da evolução das linhas de costa e dos impactos das alterações climáticas. O recurso a satélites (Copernicus, NASA, EFFIS, FIRMS) permite uma vigilância abrangente e em tempo real, essencial face à complexidade e incerteza dos fenómenos naturais. Adicionalmente, em zonas suscetíveis à ação sísmica, a monitorização geotécnica torna-se fundamental para a avaliação do comportamento do solo e das infraestruturas.

A monitorização constitui assim uma ferramenta estratégica para garantir a segurança, funcionalidade e durabilidade das infraestruturas costeiras e portuárias, promovendo a deteção precoce de anomalias, a otimização operacional e uma gestão eficiente da manutenção.

Paralelamente, permite aprofundar o conhecimento sobre fenómenos ambientais e riscos naturais, essenciais para uma adaptação informada e eficaz às alterações climáticas.

A recolha sistemática de dados e o registo rigoroso de séries temporais desempenham um papel vital na compreensão de tendências locais, na identificação de momentos críticos para ação e na documentação da frequência e do impacto de eventos extremos. Estes dados tornam-se especialmente valiosos para fundamentar decisões de adaptação e resiliência.

De forma específica, a monitorização permite:

- Construir um registo detalhado das tendências climáticas, danos estruturais e tempos de inatividade;
- Informar decisões estratégicas sobre o reforço da resiliência e a adaptação;
- Justificar investimentos com base na avaliação dos custos reais associados a eventos extremos;
- Disponibilizar dados técnicos essenciais para apoiar políticas de adaptação;
- Monitorizar o desempenho de medidas de adaptação, evitando a má adaptação;
- Identificar limiares críticos que justificam intervenções (ex.: subida do nível do mar);
- Contribuir para avaliações de risco mais robustas, compreendendo probabilidades e impactos;
- Avaliar a eficácia das medidas implementadas face aos riscos identificados;
- Identificar tendências de manutenção, promovendo intervenções mais eficientes;
- Apoiar soluções custo-eficazes, demonstrando a necessidade de adaptação quando necessário;
- Estabelecer uma linha de base para futuras comparações;
- Compreender a eficácia da manutenção e antecipar necessidades de resiliência adicionais.

4.2.2. Caracterização da monitorização

No contexto da adaptação às alterações climáticas em infraestruturas portuárias e obras marítimas, a monitorização sistemática de múltiplos aspetos é fundamental para identificar tendências, avaliar riscos e medir a eficácia das medidas de resiliência implementadas.

A recolha e registo de dados contínuos permite construir uma base sólida de informações sobre:

- Estado dos ativos físicos: Monitorização da condição estrutural e integridade dos ativos, incluindo fundações. É essencial registar a natureza e extensão dos danos (causados por eventos extremos ou deterioração gradual), o seu impacto na capacidade de manutenção e reparação e eventuais consequências funcionais. Deve-se também avaliar se as taxas de degradação ou danos estão a ultrapassar os níveis previstos.
- Eficiência operacional: Acompanhamento do desempenho diário das operações portuárias e fluviais, identificando atrasos, interrupções ou ultrapassagens de limiares operacionais que exijam modos alternativos de funcionamento ou ativação de sistemas de reserva. Os danos nos ativos devem ser igualmente documentados.
- Impacto de eventos extremos: Registo dos custos diretos associados à reparação e limpeza, bem como dos tempos de inatividade e perturbações operacionais. É importante identificar quais os ativos ou operações afetadas, a duração da paralisação e os custos diretos e indiretos, como perdas comerciais ou financeiras.
- Parâmetros e processos climáticos relevantes: A monitorização deve focar-se nos parâmetros com maior impacto nos ativos e operações, incluindo temperatura do ar e da água, precipitação, tempestades, subida do nível do mar e outros indicadores meteorológicos, hidrológicos e oceanográficos que permitam uma avaliação precisa das tendências locais e de fenómenos extremos.
- Indicadores ambientais complementares: Consoante a vulnerabilidade específica do local, podem ser monitorizados níveis da água, altura e direção das ondas, desempenho dos sistemas de drenagem, crescimento de vegetação, presença de espécies invasoras, evapotranspiração, pH e salinidade da água.
- Desempenho das medidas de adaptação: Avaliação contínua da eficácia das soluções implementadas, com indicadores e métricas alinhados com os objetivos definidos.
- Limiares operacionais e frequência de excedência: Identificar quando ativos ou operações se aproximam de valores críticos pode revelar suscetibilidades e ajudar a planejar medidas de reforço.
- Esforço e custos de manutenção: A análise da evolução dos custos e da frequência de manutenção pode indicar vulnerabilidades crescentes ou necessidade de adaptação adicional.

Além destes aspetos, a monitorização deve incluir métricas específicas relacionadas com impactos potenciais das alterações climáticas, como:

- Águas superficiais e áreas inundadas;
- Galgamentos e áreas afetadas;
- Caudal, ondulação e transporte de sedimentos;
- Nevoeiro e visibilidade;
- Vento (velocidade e direção);
- Episódios de frio, geada e gelo;
- Ondas de calor (temperatura e humidade);
- pH da água, saúde dos recifes e acidez marinha;
- Salinidade da água;
- Dinâmica da vegetação (crescimento, evapotranspiração);
- Espécies-alvo (migração, abundância, saúde);
- Espécies exóticas invasoras (presença, propagação).

A consistência e compatibilidade dos dados recolhidos ao longo do tempo são essenciais para permitir análises robustas de tendências a longo prazo e apoiar uma tomada de decisão informada e sustentável.

4.2.3. Implementação dos métodos de monitorização

A monitorização constitui um elemento central na estratégia de adaptação às alterações climáticas, sendo indispensável para garantir a eficácia das medidas implementadas e evitar situações de má adaptação. Sempre que se adotam medidas de adaptação, é fundamental estabelecer mecanismos de monitorização que permitam avaliar o seu desempenho face aos riscos climáticos identificados e às tendências das principais variáveis climáticas, assegurando, assim, a melhoria contínua e o suporte a decisões futuras.

A implementação de um programa de monitorização requer a definição clara do que deve ser monitorizado, tendo por base o inventário das infraestruturas críticas e a respetiva vulnerabilidade aos impactos climáticos. Tal implica o acompanhamento do estado dos ativos físicos, da eficiência

operacional, das consequências associadas a eventos climáticos extremos, bem como dos parâmetros e processos climáticos relevantes e do desempenho das medidas de adaptação.

A monitorização deve estar alinhada com os objetivos estratégicos da intervenção, recorrendo a métricas e indicadores previamente definidos e, sempre que possível, quantificáveis. A quantificação pode incluir, por exemplo, o registo da frequência de eventos adversos ou a identificação de ultrapassagens de limiares operacionais. Na ausência de dados quantitativos, podem ser utilizados métodos qualitativos para apoiar a avaliação do risco.

Para maximizar a eficiência e a integração da monitorização, esta deve articular-se com os sistemas e procedimentos de gestão de ativos já existentes, nomeadamente os relacionados com a hidrologia, hidrografia ou inspeção de infraestruturas. A recolha de dados pode adotar diversas formas (automatizada, em tempo real, manual ou até anedótica), sendo crucial garantir a consistência na medição e registo dos parâmetros selecionados. Neste processo, a colaboração das partes interessadas assume particular relevância, devendo ser incentivada ao longo de todas as fases do programa.

É igualmente essencial dispor de um sistema moderno de gestão de dados, capaz de assegurar o controlo, proteção e utilização eficiente da informação recolhida. Os dados devem ser armazenados e geridos de forma normalizada e segura, garantindo a sua acessibilidade e integridade. A definição de um processo simples e coordenado para o registo e backup de dados é fundamental para assegurar a continuidade e fiabilidade das análises.

A participação dos co-beneficiários e de outras partes interessadas deve ser considerada na definição das métricas de desempenho e dos critérios de sucesso. Caso estas entidades assumam responsabilidades na monitorização, os respetivos papéis devem ser claramente estabelecidos.

Para além da monitorização, a realização de estudos técnicos e a utilização de modelação numérica podem fornecer informações complementares que permitam reduzir a incerteza e aprofundar a compreensão da vulnerabilidade das infraestruturas. Os dados recolhidos devem ser periodicamente analisados e revistos, permitindo identificar tendências, avaliar o desempenho das medidas implementadas e fundamentar futuras decisões. A estratégia de adaptação deve, assim, ser encarada como um documento dinâmico, sujeito a atualizações regulares.

A monitorização também desempenha um papel crucial na identificação precoce de situações em que ativos ou operações se aproximam de limiares críticos, sinalizando a necessidade de ação. Exemplos práticos ilustram a aplicação desta abordagem: a Harwich Haven Authority integrou o seu vasto programa de monitorização no respetivo relatório de adaptação; a NSW Ports

reconheceu a importância de reforçar o registo de dados e a monitorização das perturbações causadas por tempestades; e um projeto nas Caraíbas recorreu a limiares operacionais para avaliar a vulnerabilidade.

Assim, destaca-se a importância de uma monitorização eficaz, sustentada por uma gestão de dados robusta, como ferramenta essencial para reforçar a resiliência e apoiar decisões fundamentadas sobre quando e como agir. Sempre que possível, estes processos devem estar alinhados com os sistemas de gestão de ativos já existentes, promovendo a eficiência e a integração das ações de adaptação climática.

4.2.4. Instrumentos de monitorização

Os instrumentos utilizados para a monitorização de infraestruturas podem ser automáticos, em tempo real ou manuais, sendo a escolha do tipo de instrumento determinada pelos parâmetros específicos que se pretende monitorizar. A seleção adequada dos equipamentos é fundamental para garantir a fiabilidade e a utilidade dos dados recolhidos.

Com base nos anexos e nos estudos de caso analisados, destacam-se os seguintes instrumentos e sistemas de monitorização:

- **Monitorização da condição estrutural dos ativos físicos:**
 - Inspeções visuais regulares para identificar sinais de deterioração ou danos;
 - Medições específicas para detetar e quantificar taxas de variação na condição estrutural;
 - Inspeções intrusivas em elementos críticos;
 - Câmaras subaquáticas para inspeção de componentes submersos;
 - Utilização de mergulhadores profissionais para inspeções detalhadas em ambientes subaquáticos;
 - Sensores sem fios integrados em estruturas de betão armado para medição e transmissão contínua de dados em tempo real.
- **Monitorização de parâmetros meteorológicos, hidrológicos e oceanográficos:**
 - Pluviómetros para medição da precipitação;
 - Medidores de nível de água com pontos de referência fixos;
 - Marégrafos automatizados para monitorização da altura das marés;

- Boias costeiras e offshore para medição do nível da água, altura e direção das ondas;
- Anemómetros para registo da velocidade e direção do vento;
- Medidores de visibilidade;
- Perfiladores acústicos de correntes Doppler para medição automatizada da velocidade das correntes;
- Sensores de temperatura e humidade;
- Barómetros para monitorização manual ou automática da pressão atmosférica.
- **Monitorização de parâmetros batimétricos e sedimentares:**
 - Equipamento de levantamento batimétrico (de feixe único ou multifeixe) para mapear o fundo subaquático;
 - Sistemas hidrográficos de baixo custo, como dispositivos de deriva para monitorização de correntes e boias de medição de ondas acessíveis;
 - GPS para posicionamento preciso durante levantamentos horizontais;
 - Corda e cabo tradicional para medições pontuais da profundidade da água.
- **Outros sistemas e instrumentos de monitorização relevantes:**
 - Sistemas de Informação Fluvial (RIS) para gestão e monitorização em vias navegáveis;
 - Serviços de Tráfego de Navios (VTS) e Sistemas de Identificação Automática (AIS) para apoio à navegação e segurança marítima;
 - Sistemas de localização e de gestão de incidentes (registos eletrónicos ou físicos);
 - Sistemas SCADA para monitorização remota de parâmetros ambientais como temperatura e humidade;
 - Equipamentos de medição da visibilidade e radares;
 - Dispositivos portáteis ou vestíveis inteligentes para recolha de dados ambientais;
 - Iluminação de alta visibilidade e equipamentos de navegação baseados exclusivamente em instrumentos.

A recolha e gestão dos dados devem seguir princípios de consistência, compatibilidade e acessibilidade, assegurando que a informação obtida é facilmente integrável nos sistemas de gestão de ativos existentes. Em determinadas situações, poderá ser necessário recorrer a empresas especializadas ou a instituições de investigação para apoiar tanto na recolha como na interpretação dos dados, garantindo a robustez e a fiabilidade das análises.

Capítulo V

Modelação Aplicada ao Porto de Leixões

[página propositadamente em branco]

5. Modelação Aplicada ao Porto de Leixões

5.1. Cálculo modelação RCP do Betão

A análise integrada dos fenómenos climáticos extremos, com especial ênfase na intensificação das temperaturas máximas, variações na humidade atmosférica, alterações nos regimes de precipitação e aumento da ação do vento, permite antecipar mudanças significativas nas condições de exposição a que estão sujeitas as infraestruturas portuárias. Estas alterações têm impacto direto na durabilidade dos materiais estruturais, em particular nas zonas costeiras e marítimas. A avaliação é executada num panorama geral e transversal, sendo os fenómenos extremos incorporados na metodologia de análise da durabilidade do betão.

O betão constitui um dos principais materiais utilizados nas obras portuárias e marítimas do Porto de Leixões, sendo amplamente aplicado em muros-cais, estacas, fundações e quebra-mares. A sua utilização justifica-se pela elevada resistência mecânica, facilidade de moldagem em grandes volumes e, sobretudo, pela sua durabilidade em ambientes agressivos. No entanto, a exposição contínua à água do mar coloca desafios significativos, nomeadamente a penetração de iões cloreto, que pode desencadear processos de corrosão nas armaduras, comprometendo seriamente a vida útil das estruturas.

Recomendações internacionais, como as ROM (Recomendações para Obras Marítimas) e os UFC (*Unified Facilities Criteria*), estabelecem critérios exigentes para o projeto de estruturas em ambiente marinho. Estas recomendações sugerem o uso de betões com baixa relação água/cimento, a incorporação de adições pozolânicas e a aplicação de recobrimentos adequados, de modo a limitar a penetração de agentes agressivos (Peixoto, 2014).

A seleção do tipo de betão deve ter em conta o grau de agressividade do meio marinho, a localização da estrutura e a função que esta desempenha. Com base nesses critérios, foram

considerados diferentes tipos de betão, adaptados a situações com níveis de risco distintos (elevado, moderado e reduzido) de exposição a cloretos:

- **Betão Geopolimérico (SQAPE GPC) (1):** Aplicado em zonas de impacto elevado, como mantos resistentes de quebra-mares, destaca-se pela excelente resistência química e mecânica. É adequado para ambientes de salpico severo (classe XS3), com classe de resistência C40/50 (APEB, 2022);
- **Betão UHPC (Ultra Alta Performance) (2):** Recomendado para zonas críticas, como cantos e soleiras de cais, exige-se resistência extrema à abrasão, à penetração de cloretos e ao impacto. Classificado como C60/75 – XS3, apresenta durabilidade excecional em ambientes altamente agressivos (APEB, 2022);
- **Betão Hidráulico Marinho (3):** Aplicado em blocos pré-fabricados e quebra-ondas, é projetado para contacto direto com a água do mar (imersão). Corresponde à classe XS2 e resistência C35/45 (APEB, 2022);
- **Betão de Alta Performance (HPC) (4):** Combina boa resistência mecânica com baixa porosidade. Adequado para superestruturas sujeitas a ondulação moderada, com classe XS2 e resistência C40/50 (APEB, 2022);
- **Betão com Inibidores de Corrosão (5):** Indicado para armaduras localizadas na zona de salpico, reduz significativamente o risco de corrosão induzida por cloretos. Classificado como C35/45 – XS2 (APEB, 2022);
- **Betão de Enchimento (Mass Concrete) (6):** Utilizado em fundações e lastros, tem elevada massa térmica e baixa solicitação ambiental, adequado a ambientes secos (classe XC1), com classe C20/25 (APEB, 2022);
- **Betão Armado Durável (7):** Aplicado em zonas menos expostas, como pavimentos de cais protegidos, sujeitos à salinidade atmosférica. Classificado como C30/37 – XS1, adequado para exposição marinha ligeira (APEB, 2022);
- **Betão Projetado (Shotcrete) (8):** Utilizado em reabilitação de taludes ou zonas salpicadas, permite intervenções localizadas, com boa resistência em condições de exposição XS1 (APEB, 2022).

A seleção dos diferentes tipos de betão foi realizada com o objetivo de assegurar o desempenho estrutural e a durabilidade a longo prazo das infraestruturas portuárias, tendo em conta o seu posicionamento e a respetiva classe de exposição, conforme estabelecido pela norma EN 206.

Perante a intensificação dos fenómenos climáticos extremos, projetada nos cenários RCP, prevê-se uma aceleração dos processos de deterioração dos materiais. Neste contexto, torna-se imprescindível adotar uma abordagem preventiva baseada na previsão da durabilidade, integrando variáveis climáticas e ambientais no processo de dimensionamento das estruturas.

O modelo de cálculo adotado neste estudo tem por base a equação de Fick (Equação 2) que permite estimar a profundidade de penetração dos iões cloreto ao longo do tempo. Este modelo constitui uma ferramenta fundamental para avaliar a durabilidade do betão armado, possibilitando a determinação do tempo necessário para que a concentração de cloretos atinja um valor crítico (C_{cr}) junto à armadura, ponto a partir do qual se inicia o processo de corrosão e se compromete a integridade estrutural.

A metodologia aplicada incorpora três variáveis principais: o coeficiente de difusão aparente (D), a concentração superficial de cloretos (C_s) e o limiar crítico de corrosão (C_{cr}), sendo estas ajustadas em função dos diferentes tipos de betão e dos cenários climáticos considerados (RCP 2.6, 4.5 e 8.5). Através desta abordagem, é possível obter uma estimativa do tempo de iniciação da corrosão, fase crítica no ciclo de vida das estruturas, permitindo assim um dimensionamento mais robusto e durável face ao agravamento das condições ambientais.

O coeficiente de difusão (D) representa a facilidade com que os iões cloreto se deslocam através da matriz cimentícia do betão, sendo um dos parâmetros mais relevantes na previsão da durabilidade em ambiente marinho. Este valor influencia diretamente o tempo até ao início da corrosão das armaduras e depende tanto das características intrínsecas do betão como das condições ambientais envolventes.

Com o aumento projetado da temperatura média global e da humidade relativa, associado aos diferentes cenários RCP, verifica-se uma intensificação dos mecanismos de transporte iónico, o que se traduz num aumento do valor de D . A sensibilidade deste parâmetro às alterações climáticas torna necessária a sua adaptação em função das previsões climáticas futuras, de modo a refletir adequadamente a agressividade crescente do ambiente marítimo.

Os valores de D considerados neste estudo (Quadro 20) foram definidos com base numa projeção a 100 anos para cada cenário RCP, respeitando a evolução progressiva da agressividade ambiental e os intervalos de referência para estruturas portuárias localizadas em zonas costeiras expostas.

Quadro 20 - Coeficiente de difusão (**D**) por cada cenário RCP.

CENÁRIO	COEFICIENTE DE DIFUSÃO D (m²/s)	
RCP 2.6	1E-12	
RCP 4.5	1E-12	2,5E-12
RCP 8.5	2,5E-12	5E-12

Os valores adotados para o coeficiente de difusão de cloretos (**D**) neste estudo foram definidos com base na relação físico-química entre a temperatura e a mobilidade iônica na matriz cimentícia do betão, expressa pela equação de Arrhenius (Equação 1). Esta abordagem permite estimar a variação de (**D**) em função da evolução da temperatura média global prevista nos diferentes cenários RCP.

Equação 1 - Equação de Arrhenius.

$$C_T = D_{ref} * e^{\left(-\frac{E_a}{R}\right) * \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)}$$

Onde:

- C_T - Coeficiente de difusão à temperatura T;
- D_{Ref} - Coeficiente de difusão à temperatura de referência T_{Ref} (geralmente 20 °C ou 293 K);
- E_a - Energia de ativação (J/mol);
- R - Constante universal dos gases (8,314 J/mol·K);
- T e T_{Ref} - Temperaturas absolutas em kelvin (K).

No cenário RCP 2.6, que projeta um aumento da temperatura global entre +1,3 °C e +1,8 °C até ao final do século, a aplicação da equação indica uma variação de (**D**) inferior a 10% face ao valor de referência. Dado que este acréscimo se insere dentro da variabilidade experimental normalmente aceite, considerou-se adequado manter o valor base 1E-12 m²/s como representativo para este cenário.

Para o RCP 4.5, com aumentos de temperatura estimados entre +2,0 °C e +3,0 °C, os efeitos térmicos tornam-se mais expressivos, potenciando um aumento do valor de **(D)** entre 25% e 150%. Esta variação é particularmente relevante em contextos onde se verifica simultaneamente uma maior agressividade ambiental. Assim, foi adotado um intervalo entre 1E-12 m²/s e 2,5E-12 m²/s, refletindo uma progressão moderada da agressividade e a consequente aceleração dos mecanismos de transporte de cloretos.

Por fim, o RCP 8.5, que antecipa um aumento superior a +4,0 °C da temperatura média global, representa uma condição climática extremamente severa. Nestes casos, o coeficiente de difusão pode aumentar até cinco vezes em relação ao valor de referência, não apenas em virtude da elevação térmica, mas também devido à intensificação da humidade relativa, do teor de salinidade superficial e da ocorrência de microfissuração induzida por gradientes térmicos. Com base nestes fatores, foi definido um intervalo conservador de 2,5E-12 m²/s e 5,0E-12 m²/s, que traduz a vulnerabilidade acrescida das estruturas portuárias num contexto de alterações climáticas extremas.

A evolução temporal do coeficiente de difusão para cada um dos cenários RCP ao longo de um horizonte de 100 anos encontra-se detalhada na Figura 25, permitindo visualizar a tendência de agravamento progressivo das condições de exposição e o impacto correspondente na durabilidade das estruturas.

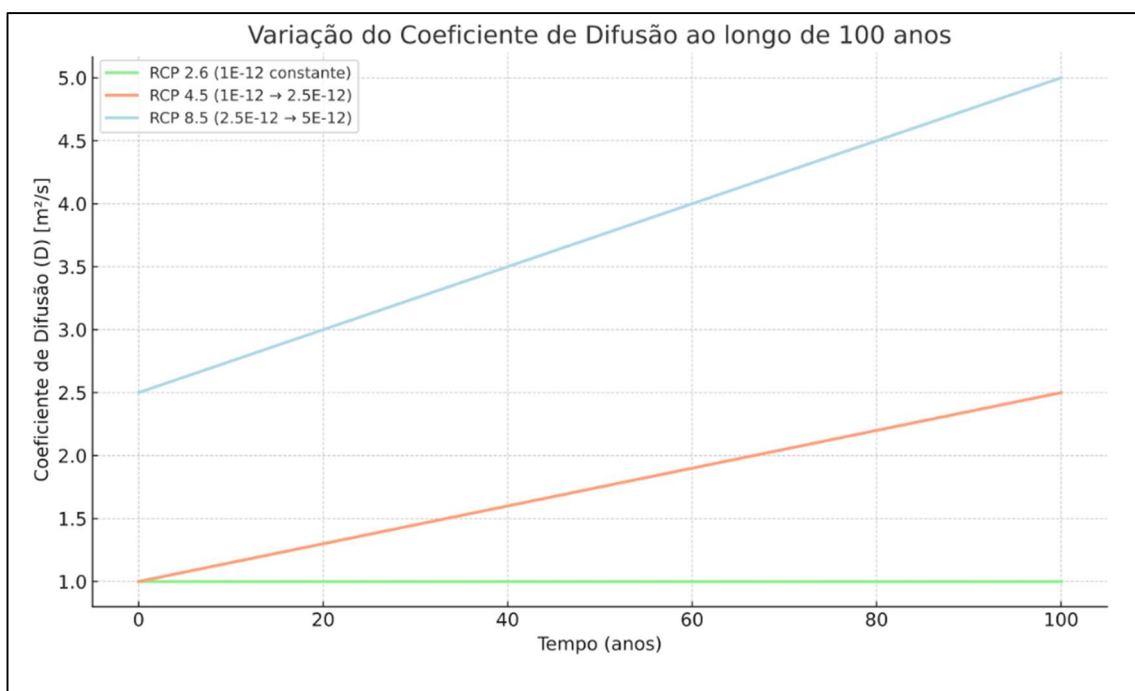


Figura 25 - Variação do Coeficiente de Difusão (**D**) ao longo de 100 anos.

Procedeu-se, de seguida, à estimativa da concentração superficial de cloretos (**Cs**), parâmetro que representa a quantidade máxima de iões cloreto disponíveis na superfície do betão para dar início ao processo de difusão ao longo do tempo.

A determinação de (**Cs**) está diretamente relacionada com diversos fatores, nomeadamente: o grau de agressividade do ambiente envolvente, a salinidade da água, o tipo de exposição (por salpicos, imersão contínua ou atmosfera marítima), bem como as características intrínsecas do betão, com destaque para a composição da mistura e o teor de ligante utilizado.

No âmbito deste estudo, os valores adotados para (**Cs**) variam entre 1,5 kg/m³ e 6,0 kg/m³, consoante o nível de risco associado a cada situação de exposição, tal como se encontra sistematizado no Quadro 21.

Quadro 21 - A concentração superficial de cloretos (**Cs**) e cenários de exposição marinha (adaptada de Vera et al., 2024).

SITUAÇÃO DE EXPOSIÇÃO	EXEMPLO TÍPICO	VALOR SUGERIDO DE (Cs)
ALTO RISCO (MUITO AGRESSIVO)	Quebra-mar, zona de rebentação direta (XS3)	5,0 a 6,0 kg/m ³
MODERADO RISCO (EXPOSIÇÃO INDIRETA OU OCASIONAL)	Cais com proteção de salpico, ambiente húmido salino (XS2)	3,0 a 4,0 kg/m ³
BAIXO RISCO (AMBIENTE MARINHO PROTEGIDO)	Armazéns cobertos em portos ou pavimentos protegidos da ação direta da água do mar (XS1)	1,5 a 2,5 kg/m ³

De acordo com o estudo de Vera et al. (2024), os valores de concentração superficial de cloretos (**Cs**) observados em betões expostos a ambientes marinhos e portuários situam-se entre 0,3% e 0,45% da massa total de betão. Considerando, neste trabalho, um valor médio de 340 kg/m³ de cimento nas formulações analisadas, a conversão direta desses intervalos percentuais para valores absolutos resulta em concentrações compreendidas entre aproximadamente 1,02 kg/m³ e 1,53 kg/m³.

Com base nesta analogia e adotando uma abordagem conservadora, admitiu-se que, em situações de risco moderado a elevado, os valores de (**Cs**) não deverão ultrapassar os 4% em massa de betão, valor geralmente considerado como o limite superior admissível para a concentração de cloretos em estruturas expostas a ambientes severos.

O Quadro 22 apresenta a correspondência entre os valores de (**Cs**) utilizados neste estudo, os respetivos limites críticos de iniciação da corrosão (**Ccr**) e o teor médio de cimento por metro cúbico de betão, permitindo uma análise coerente entre os parâmetros adotados e a sua fundamentação técnico-normativa.

Quadro 22 - Relação entre concentração superficial de cloretos (**Cs**), limite crítico de iniciação da corrosão (**Ccr**) e teor de cimento típico em diferentes cenários de exposição marinha (APEB, 2022).

Cs (kg/m³)	Ccr (% cimento)	CIMENTO TÍPICO (kg/m³)	Ccr (kg/m³)
5,5	0,5–0,6% (GPC)	350	2,1
5,5	≥0,7% (muito denso)	400	2,8
4	0,40%	330	1,32
4	0,5% (HPC)	350	1,75
4	≥0,6% (com aditivos)	350	2,1
1,5	0,40%	280	1,12
3	0,40%	320	1,28
3	0,40%	320	1,28

O recobrimento nominal das armaduras, apresentado no Quadro 23, corresponde à espessura mínima de betão necessária para assegurar a proteção eficaz contra agentes agressivos, como os iões cloreto e o dióxido de carbono (carbonatação).

Os valores indicados estão em conformidade com os requisitos estabelecidos pela norma EN 206, sendo definidos em função das diferentes classes de exposição ambiental, de forma a garantir a durabilidade e a integridade das armaduras ao longo do tempo. Esta abordagem assegura que, para cada condição de exposição, é aplicada uma espessura de recobrimento compatível com o grau de agressividade do meio envolvente (APEB, 2022).

Quadro 23 - Recobrimento nominal mínimo recomendado por classe de exposição (EN 206), de acordo com o tipo de ambiente a que a estrutura de betão está sujeita (adaptado APEB, 2022; Monteiro et al., 2010).

CLASSE DE EXPOSIÇÃO (EN 206)	TIPO DE AMBIENTE	RECOBRIMENTO NOMINAL (m)
XC1	Ar seco, sem risco de carbonatação rápida	0,025
XC3/XC4	Ambiente húmido ou molhado, não marinho	0,035
XS1	Atmosfera marítima (sem contacto direto)	0,03
XS2	Imersão em água do mar	0,04
XS3	Zona de salpico (molhagem/seca intensa)	0,05
XF3/XF4	Congelamento com sal	0,05
XA2/XA3	Solo ou água com ataque químico moderado/forte	0,05

A equação de Fick (Equação 2) modela a penetração de cloretos no betão, relacionando a profundidade, o tempo de exposição e o coeficiente de difusão e a concentração superficial. É amplamente usada para prever o início da corrosão em estruturas.

Equação 2 - Lei de Fick aplicada à penetração de cloretos no betão.

$$C(x, t) = C_s * \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2 * \sqrt{D * t}} \right) \right)$$

Onde:

- $C(x, t)$ - Representa a concentração de cloretos no betão, em kg/m³, a uma profundidade x após um período t;
- C_s - A concentração de cloretos na superfície do betão (valor máximo que pode penetrar), expressa também em kg/m³;

- ***D*** - O coeficiente de difusão aparente dos cloretos no betão, dado em m²/s, e depende do tipo de betão e da sua porosidade;
- ***t*** - O tempo de exposição ao ambiente agressivo, geralmente considerado em segundos (por exemplo, 50 anos = 1,58 × 10⁹ s);
- ***x*** - A profundidade da armadura, ou seja, o recobrimento nominal em metros;
- ***erf* ()** - A função erro (função matemática estatística que representa a probabilidade acumulada de um processo de difusão), aplicada ao fator de penetração $\left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}}\right)$.

Com base nos dados previamente definidos, procedeu-se à análise da penetração de cloretos para o primeiro cenário climático, RCP 2.6, avaliando-se as três classes de risco (baixo, moderado e elevado) com o objetivo de compreender o comportamento do betão ao longo de um horizonte temporal de 100 anos. Esta abordagem permitiu avaliar, de forma comparativa, a resposta dos diferentes tipos de betão face a um cenário de estabilização climática.

Inicialmente, considerou-se um coeficiente de difusão constante e um período de exposição de 50 anos, no âmbito do cenário RCP 2.6. Os resultados demonstram que, mesmo em contextos de exposição classificada como baixo risco, a concentração de cloretos pode atingir níveis significativos nas zonas críticas das estruturas portuárias, revelando a necessidade de atenção mesmo em condições teoricamente favoráveis.

O Quadro 23 sintetiza o efeito conjugado da exposição ambiental, do recobrimento nominal e da concentração superficial de cloretos (***C_s***) na profundidade de penetração dos iões cloreto, evidenciando que em ambientes marinhos mais agressivos podem ser atingidos níveis críticos de concentração junto às armaduras. Apesar de o cenário RCP 2.6 representar uma projeção de estabilização climática, os resultados revelam vulnerabilidades estruturais relevantes, particularmente em contextos com salinidade elevada ou elevada variabilidade costeira.

A análise dos resultados (Quadro 24) demonstra que os Betões 1 e 2, com (***C(x,t)***) de 2,054 kg/m³, não ultrapassam os respetivos limiares críticos de corrosão (***C_{cr}***) de 2,1 e 2,8 kg/m³, respetivamente. O Betão 1 aproxima-se do seu limite, enquanto o Betão 2 mantém-se numa zona segura. Por outro lado, os Betões 3, 4 e 5, com valores de ***C(x,t)*** de 1,906 kg/m³, excedem os seus (***C_{cr}***) em dois dos três casos (1,32 kg/m³ e 1,75 kg/m³ para os Betões 3 e 4), sendo o Betão 5 a única exceção, com (***C_{cr}***) de 2,1 kg/m³, indicando risco efetivo de iniciação da corrosão nos primeiros dois.

O Betão 6, com $C(x,t)$ de 0,984 kg/m³, apresenta um valor inferior ao seu limiar crítico de 1,12 kg/m³, apontando para um desempenho aceitável, embora próximo do limite de segurança. Já os Betões 7 e 8, com valores de 1,780 kg/m³, excedem claramente os respetivos (C_{cr}) de 1,28 kg/m³, o que revela um risco significativo de corrosão, mesmo em situações de exposição teoricamente protegidas, comprometendo assim a durabilidade a longo prazo.

Neste contexto, a resiliência das infraestruturas portuárias deve ser entendida como a capacidade de manter a integridade estrutural ao longo do tempo, mesmo sob pressões ambientais contínuas e crescentes, exigindo uma abordagem preventiva e criteriosamente fundamentada na previsão da durabilidade.

Quadro 24 – Cálculo relativo à penetração dos cloretos no betão no cenário RCP 2.6.

CENÁRIO RCP 2.6	PENETRAÇÃO DOS CLORETOS							
	TIPO DE BETÃO	C _s (Kg/m ³)	COEFICIENTE DE DIFUSÃO D (m ² /s)	TEMPO DE EXPOSIÇÃO t(s)	RECOBRIMENTO NOMINAL (m)	VARIAÇÃO erf (x)		C (x,t) (kg/m ³)
ALTO RISCO (MUITO AGRESSIVO)	1	5,5	1E-12	1,58E+09	0,050	0,629	0,627	2,054
	2	5,5	1E-12	1,58E+09	0,050	0,629	0,627	2,054
MODERADO RISCO (EXPOSIÇÃO INDIRETA OU OCASIONAL)	3	4	1E-12	1,58E+09	0,040	0,503	0,524	1,906
	4	4	1E-12	1,58E+09	0,040	0,503	0,524	1,906
	5	4	1E-12	1,58E+09	0,040	0,503	0,524	1,906
BAIXO RISCO (AMBIENTE PROTEGIDO)	6	1,5	1E-12	1,58E+09	0,025	0,315	0,344	0,984
	7	3	1E-12	1,58E+09	0,030	0,378	0,407	1,780
	8	3	1E-12	1,58E+09	0,030	0,378	0,407	1,780

No cenário RCP 4.5 (Quadro 25), todos os tipos de betão analisados apresentam concentrações máximas de cloretos ($C(x,t)$) superiores aos respetivos limiares críticos de corrosão (C_{cr}), os quais variam entre 1,12 kg/m³ e 2,8 kg/m³, consoante a tipologia do betão.

O Betão 1 apresenta valores de $C(x,t)$ entre 2,054 kg/m³ e 3,154 kg/m³, ultrapassando o seu **(Ccr)** de 2,1 kg/m³, o que indica um elevado risco de iniciação da corrosão. O Betão 2, embora possua um **(Ccr)** mais elevado (2,8 kg/m³), regista igualmente **$C(x,t)$** no mesmo intervalo, o que implica que, embora o risco seja ligeiramente inferior ao do Betão 1, o valor máximo de concentração ultrapassa o limite admissível, traduzindo vulnerabilidade relevante. Os Betões 3, 4 e 5 registam concentrações de cloretos entre 1,906 kg/m³ e 2,610 kg/m³, superando os seus respetivos **(Ccr)**, situados entre 1,32 kg/m³ e 2,1 kg/m³. Estes resultados revelam vulnerabilidades significativas à corrosão, mesmo em tipologias teoricamente associadas a ambientes de exposição menos severa.

O Betão 6, com concentrações entre 0,984 kg/m³ e 1,168 kg/m³, ultrapassa o seu **(Ccr)** de 1,12 kg/m³ no limite superior, o que representa um risco moderado de corrosão, especialmente considerando as margens de segurança reduzidas. Já os Betões 7 e 8, com valores de **$C(x,t)$** entre 1,780 kg/m³ e 2,207 kg/m³, excedem substancialmente o seu **(Ccr)** de 1,28 kg/m³, revelando um risco efetivo de deterioração mesmo em zonas tradicionalmente classificadas como protegidas, como é o caso de superestruturas ou áreas abrigadas.

O impacto do cenário RCP 4.5 é evidente na amplitude dos intervalos de concentração e no aumento significativo dos valores de **$C(x,t)$** . Estes efeitos decorrem da intensificação das condições ambientais e do prolongamento do tempo de exposição, comprometendo seriamente a durabilidade de grande parte dos materiais, incluindo os considerados mais resistentes.

Neste contexto, os resultados reforçam a necessidade urgente de medidas preventivas, tais como o uso de materiais de elevada durabilidade, o aumento dos recobrimentos, a aplicação de inibidores de corrosão e, sobretudo, a integração de estratégias de adaptação climática capazes de garantir a resiliência das infraestruturas portuárias face ao agravamento progressivo das condições de exposição induzidas pelas alterações climáticas.

Quadro 25 - Cálculo relativo à penetração dos cloretos no betão no cenário RCP 4.5.

CENÁRIO RCP 4.5	PENETRAÇÃO DOS CLORETOS							
	TIPO DE BETÃO	Cs (Kg/m³)	COEFICIENTE DE DIFUSÃO D (m²/s)	TEMPO DE EXPOSIÇÃO t (s)	RECOBRIMENTO NOMINAL (m)	VARIAÇÃO erf (x)		C (x,t) (kg/m³)
ALTO RISCO (MUITO AGRESSIVO)	1	5,5	2,5E-12	1,58E+09	0,050	0,398	0,427	2,054 - 3,154
	2	5,5	2,5E-12	1,58E+09	0,050	0,398	0,427	2,054 - 3,154
MODERADO RISCO (EXPOSIÇÃO INDIRETA OU OCASIONAL)	3	4	2,5E-12	1,58E+09	0,040	0,318	0,348	1,906 - 2,610
	4	4	2,5E-12	1,58E+09	0,040	0,318	0,348	1,906 - 2,610
	5	4	2,5E-12	1,58E+09	0,040	0,318	0,348	1,906 - 2,610
BAIXO RISCO (AMBIENTE PROTEGIDO)	6	1,5	2,5E-12	1,58E+09	0,025	0,199	0,222	0,984 - 1,168
	7	3	2,5E-12	1,58E+09	0,030	0,239	0,264	1,780 - 2,207
	8	3	2,5E-12	1,58E+09	0,030	0,239	0,264	1,780 - 2,207

No cenário RCP 8.5 (Quadro 26), o Betão 1 apresenta concentrações de cloretos entre 3,154 e 3,789 kg/m³, ultrapassando de forma significativa o seu limiar crítico de corrosão (**Ccr**) de 2,1 kg/m³, o que indica um elevado risco de corrosão. O Betão 2, com o mesmo intervalo de **C(x,t)**, também excede o seu (**Ccr**) de 2,8 kg/m³, demonstrando que mesmo composições de elevada compacidade e desempenho otimizados são vulneráveis quando sujeitas a condições climáticas extremas. Os Betões 3, 4 e 5 registam concentrações entre 2,610 e 3,001 kg/m³, todos acima dos seus respetivos (**Ccr**), situados entre 1,32 e 2,1 kg/m³, o que confirma um risco significativo de degradação estrutural, mesmo para composições concebidas para ambientes agressivos.

No caso do Betão 6, os valores situam-se entre 1,168 e 1,263 kg/m³, ligeiramente superiores ao (**Ccr**) de 1,12 kg/m³, o que aponta para um risco moderado, mas real de corrosão, sobretudo em situações de exposição prolongada. Já os Betões 7 e 8, com concentrações de cloretos entre 2,207 e 2,434 kg/m³, excedem de forma expressiva o seu (**Ccr**) de 1,28 kg/m³, revelando vulnerabilidades

críticas mesmo em zonas consideradas protegidas, como superestruturas ou áreas abrigadas dos cais.

A influência do cenário RCP 8.5 é particularmente evidente, refletindo-se num acentuado aumento da penetração de cloretos, impulsionada por coeficientes de difusão mais elevados e por condições ambientais extremamente agressivas. Este agravamento acelera os processos de deterioração por corrosão, comprometendo a durabilidade dos materiais independentemente da sua formulação inicial ou classe de exposição.

Neste contexto, os resultados reforçam a necessidade imperativa de adotar soluções de projeto e tecnologias construtivas mais robustas, que assegurem a durabilidade e funcionalidade das infraestruturas portuárias sob cenários de alterações climáticas intensificadas. Tal exigência implica uma abordagem de adaptação proativa e resiliente, ancorada em critérios de durabilidade avançada e prevenção do risco estrutural a longo prazo.

Quadro 26 - Cálculo relativo à penetração dos cloretos no betão no cenário RCP 8.5.

CENÁRIO RCP 8.5	PENETRAÇÃO DOS CLORETOS							
	TIPO DE BETÃO	Cs (Kg/m ³)	COEFICIENTE DE DIFUSÃO D (m ² /s)	TEMPO DE EXPOSIÇÃO t (s)	RECOBRIMENTO NOMINAL (m)	VARIAÇÃO erf (x)		C (x,t) (kg/m ³)
ALTO RISCO (MUITO AGRESSIVO)	1	5,5	5E-12	1,58E+09	0,050	0,281	0,309	3,154 - 3,789
	2	5,5	5E-12	1,58E+09	0,050	0,281	0,309	3,154 - 3,789
MODERADO RISCO (EXPOSIÇÃO INDIRETA OU OCASIONAL)	3	4	5E-12	1,58E+09	0,040	0,225	0,250	2,610 - 3,001
	4	4	5E-12	1,58E+09	0,040	0,225	0,250	2,610 - 3,001
	5	4	5E-12	1,58E+09	0,040	0,225	0,250	2,610 - 3,001
BAIXO RISCO (AMBIENTE PROTEGIDO)	6	1,5	5E-12	1,58E+09	0,025	0,141	0,158	1,168 - 1,263
	7	3	5E-12	1,58E+09	0,030	0,169	0,189	2,207 - 2,434
	8	3	5E-12	1,58E+09	0,030	0,169	0,189	2,207 - 2,434

A Figura 26 indica de forma mais clara e resumida o conteúdo acima descrito, em que evidencia o tipo de betão e cenário correspondentes a cada uma das variações existentes de $(C(x,t))$ (perante o valor de (C_{cr}) típico).

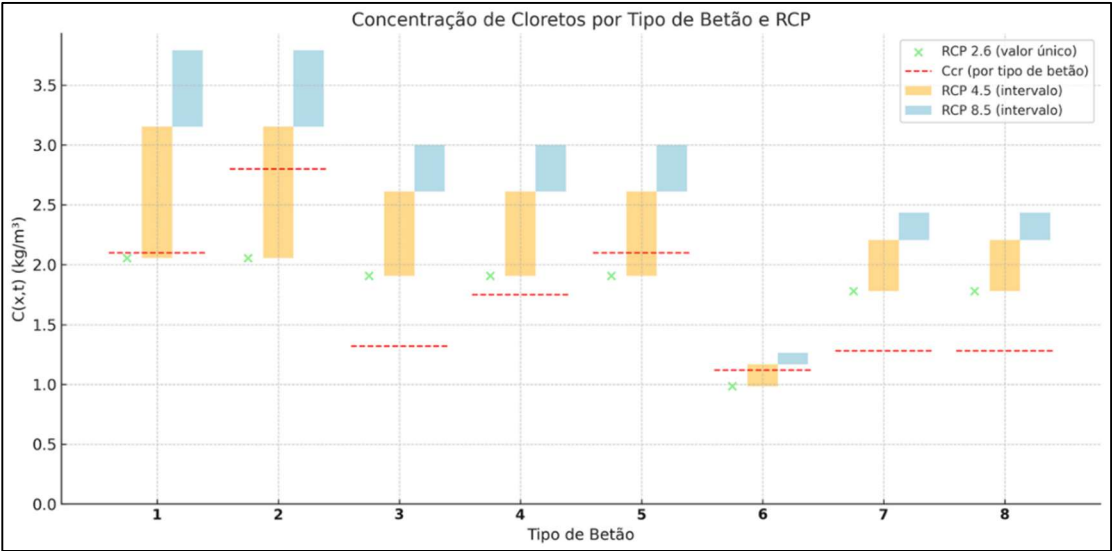


Figura 26 - Concentração de cloretos por tipo de betão e RCP.

A Figura 27 representa a matriz de risco associada à posição de (C_{cr}) face ao intervalo de $(C(x,t))$ que possibilita uma análise direta dos resultados.

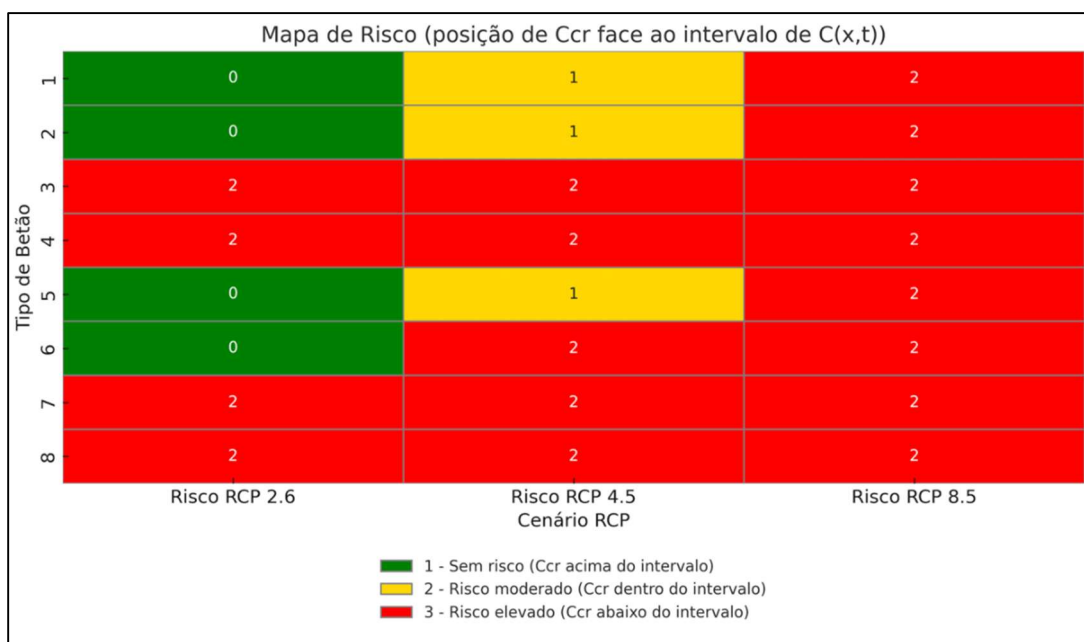


Figura 27 – Matriz de Risco (posição de C_{cr} face ao intervalo de $C(x,t)$).

Posteriormente, com o intuito de complementar a análise, procedeu-se ao cálculo de (t_i) , aplicada à penetração de cloretos na (Equação 3).

Equação 3 – Equação de Fick usada para estimar o tempo de iniciação da corrosão (t_i) .

$$t_i = \left(\left(\frac{x}{2 * \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{C_{cr}}{C_s} \right)} \right) * \frac{1}{D} \right)$$

Onde:

- t_i - Tempo de iniciação da corrosão (tempo necessário para $(C(x,t) = C_{cr})$, expressa em segundos (s) ou anos;
- x - Recobrimento nominal (distância entre a superfície do betão e a armadura), expresso em metros (m);
- erf^{-1} - Função erro inversa, usada para resolver a equação de Fick quando se conhece C_{cr} e C_s ;
- C_{cr} - Concentração crítica de cloretos que inicia a corrosão do aço, expressa em kg/m^3 ;

- C_s - Concentração superficial de cloretos (na superfície do betão exposta), expressa em kg/m^3 ;
- D - Coeficiente de difusão dos cloretos no betão (capacidade de penetração dos iões), expressa em m^2/s .

O Quadro 27 apresenta a estimativa do tempo de iniciação da corrosão (t_i) para os diferentes tipos de betão analisados, com base nos cenários climáticos RCP 2.6, 4.5 e 8.5, considerando os respetivos coeficientes de difusão de cloretos. Os resultados evidenciam uma redução progressiva da durabilidade das estruturas à medida que se intensificam as condições ambientais previstas, confirmando o impacto negativo das alterações climáticas no desempenho a longo prazo do betão armado em contextos marítimos.

Quadro 27 - Estimativa de t_i (anos) e avaliação qualitativa da durabilidade dos betões por cenário climático RCP, com base na difusividade dos cloretos (m^2/s).

TIPO DE BETÃO	RCP 2.6 (t_i (anos)/AVALIAÇÃO)		RCP 4.5 (t_i (anos)/AVALIAÇÃO)		RCP 8.5 (t_i (anos)/AVALIAÇÃO)	
1	> 100	Muito seguro	> 100 - 64	Seguro	64 - 32	Moderado
2	94	Muito seguro	94 - 37	Seguro	60 - 19	Moderado
3	> 100	Muito seguro	> 100 - 55	Seguro	55 - 27	Moderado
4	78	Seguro	78 - 31	Moderado	31 - 27	Risco alto
5	56	Seguro	56 - 23	Moderado	23 - 11	Risco alto
6	9	Muito crítico	9 - 4	Muito crítico	4 - 2	Muito crítico
7	46	Risco Alto	46 - 18	Risco alto	18 - 9	Muito crítico
8	46	Risco Alto	46 - 18	Risco alto	18 - 9	Muito crítico

Os betões de elevado desempenho, como o UHPC e o Geopolimérico, demonstram uma elevada resistência à penetração de cloretos, mesmo sob cenários mais agressivos, apresentando valores (t_i) superiores a 60 anos. Em contraste, soluções mais convencionais, como o betão hidráulico, o betão projetado e o betão de enchimento, revelam tempos de iniciação inferiores a 40 anos no cenário RCP 8.5, evidenciando uma vulnerabilidade significativa à deterioração precoce. Estes resultados reforçam a necessidade de uma seleção criteriosa dos materiais utilizados em estruturas portuárias e marítimas, ajustada à agressividade ambiental prevista, de forma a assegurar níveis adequados de durabilidade e resiliência face às alterações climáticas.

A Figura 28 ilustra, através de diferentes gráficos, a relação entre o coeficiente de difusão de cloretos (**D**) e o tempo de iniciação da corrosão (**ti**) para os diversos tipos de betão analisados. Observa-se uma redução progressiva da durabilidade à medida que se agravam os cenários RCP. A sobreposição gráfica dos diferentes cenários permite visualizar a transição entre níveis de agressividade e a sensibilidade específica de cada tipo de betão ao aumento das condições ambientais desfavoráveis.

Considerando um limite mínimo de segurança de 50 anos para o (**ti**), conclui-se que apenas os betões 1, 2 e 4 mantêm um desempenho aceitável nos cenários mais exigentes. Os restantes tipos apresentam riscos elevados de deterioração prematura, colocando em causa a longevidade estrutural em ambientes portuários expostos às projeções climáticas futuras.

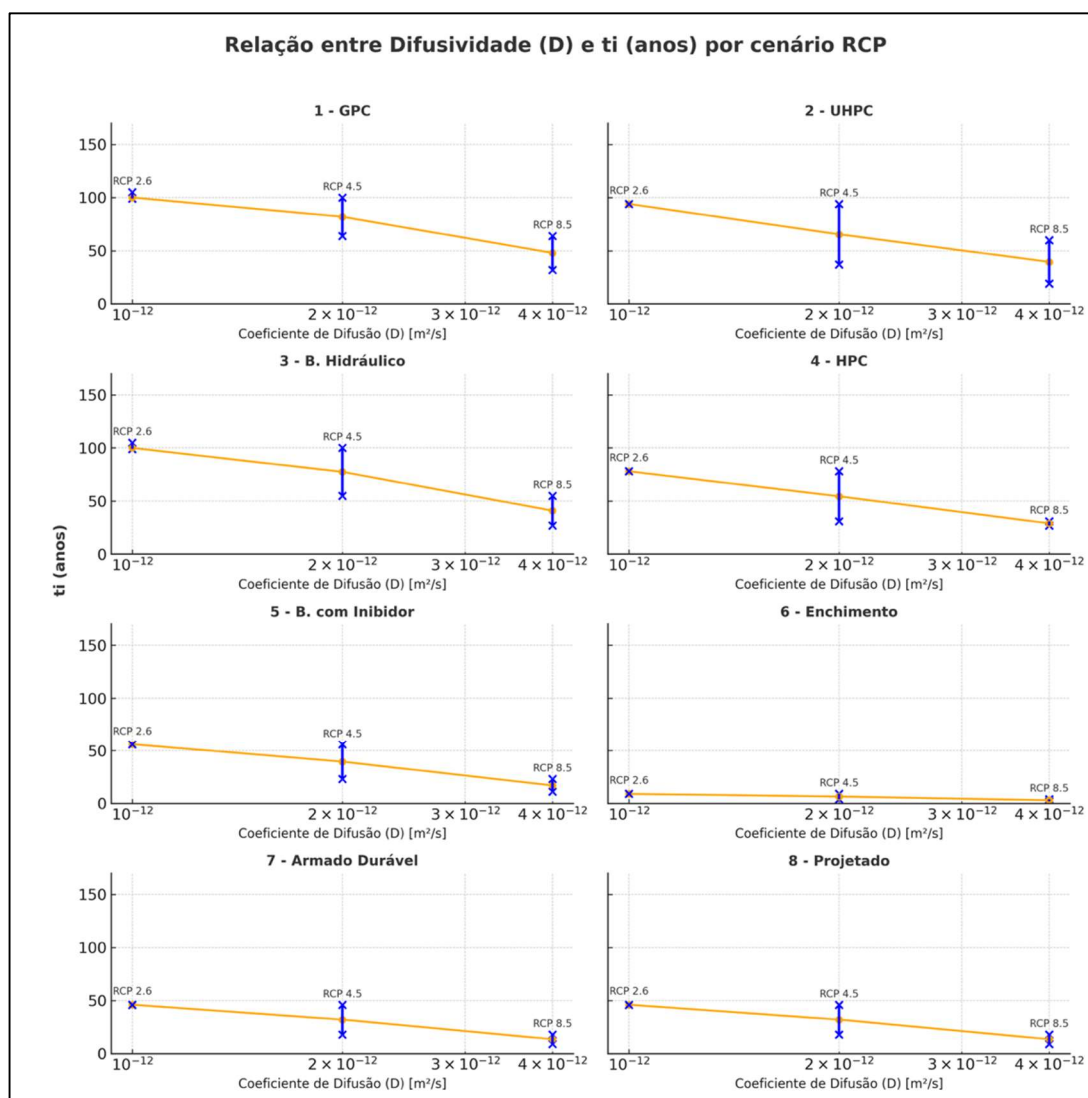


Figura 28 - Variação de t_i em função da difusividade nos Cenários RCP por tipo de betão.

Este comportamento encontra-se associado à maior facilidade com que os iões cloreto atingem a profundidade crítica de recobrimento (**x_{crit}**), o que conduz à redução do tempo de iniciação da corrosão (**t_i**), especialmente em betões com menor espessura de proteção.

A Figura 29 apresenta, numa perspetiva comparativa, a profundidade de penetração de cloretos atingida por cada tipo de betão ao longo de 100 anos. Para efeitos de simplificação da análise, foi considerado um limite crítico de 5 cm, correspondente ao valor de recobrimento nominal frequentemente adotado em estruturas portuárias expostas a ambientes marinhos agressivos.

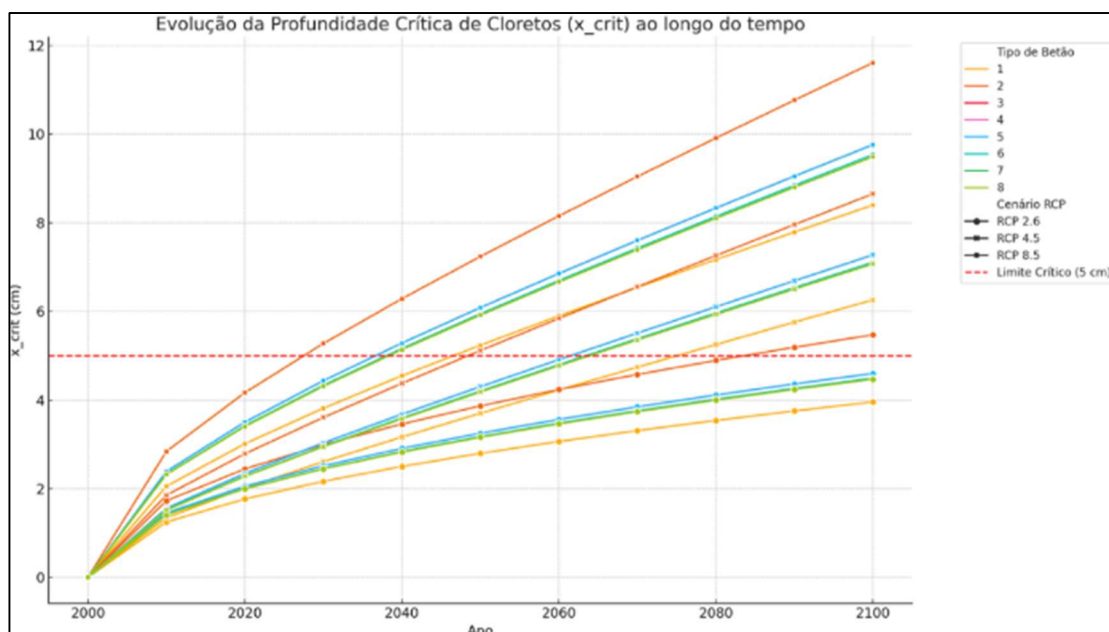


Figura 29 – Evolução da profundidade crítica de cloretos ao longo de um período de 100 anos (por cada RCP).

5.2. Cálculo modelação RCP do Aço

Este estudo incluiu também a análise de diferentes tipos de aço comumente utilizados em estruturas portuárias, avaliando o seu desempenho face a cada um dos RCP's. A durabilidade e o comportamento estrutural das infraestruturas metálicas dependem, em grande medida, da seleção adequada dos materiais, sendo fundamental considerar as características mecânicas e a resistência à corrosão dos diferentes aços disponíveis.

Neste contexto, foram identificados seis grupos principais de aços com aplicação típica em obras portuárias, diferenciando-se pela sua aptidão para diferentes zonas estruturais e condições ambientais:

- **a) Aço carbono estrutural** - Amplamente utilizado em estacas-prancha, tubos estruturais e elementos de cais, combina boa resistência mecânica com ductilidade, sendo uma opção economicamente competitiva. Contudo, apresenta baixa resistência à corrosão, exigindo proteções adicionais, sobretudo em ambientes húmidos ou salinos permanentes (Rodrigues, 2015);
- **b) Aço inoxidável (ex. AISI 316 ou Duplex)** - Recomendado para zonas de salpico ou rebentação, caracteriza-se pela excelente resistência à corrosão. A sua aplicação justifica-se em elementos críticos, de difícil manutenção ou com elevada exigência de durabilidade (Peixoto, 2024).
- **c) Aço galvanizado** - Frequentemente utilizado em elementos secundários, como ligações, ancoragens ou acessórios, apresenta proteção catódica fornecida por uma camada de zinco, a qual retarda os efeitos da corrosão em contacto com a água salgada ou humidade;
- **d) Aço de alta resistência (ex. S355/S420)** - Aplicado em estruturas sujeitas a ações dinâmicas, como pontes móveis, consolas ou defensas metálicas, permite reduzir a secção dos elementos estruturais e oferece elevado desempenho sob cargas cíclicas, mantendo boa capacidade de deformação;
- **e) Estacas-prancha metálicas** - Utilizadas em cais flexíveis e estruturas de contenção, são perfis metálicos (geralmente em forma de U ou Z) com boa flexibilidade e resistência à flexão, permitindo a adaptação a diferentes geometrias e a absorção de esforços horizontais relevantes;
- **f) Aço em defensas metálicas** - Essencial nos sistemas de acostagem e amarração, estes elementos absorvem a energia de impacto dos navios, exigindo resistência mecânica, ductilidade e, quando necessário, proteção anticorrosiva localizada, dado o ambiente particularmente agressivo a que estão sujeitos.

Esta análise comparativa é crucial para garantir que as estruturas portuárias e marítimas mantêm a sua durabilidade e resiliência face às alterações climáticas e à exposição contínua a ambientes marinhos agressivos.

O Quadro 28 sintetiza as características dos diferentes tipos de aço analisados, permitindo observar a variação do seu desempenho estrutural e da durabilidade em função dos diferentes cenários climáticos RCP.

Quadro 28 - Propriedades mecânicas e parâmetros típicos de corrosão dos principais tipos de aço utilizados em ambientes marítimos sob diferentes cenários RCP

TIPO DE AÇO	NORMA APLICÁVEL	TENSÃO DE CEDÊNCIA (f _y) [MPa]	CLASSE DE EXPOSIÇÃO (EN 206)	r TÍPICO (mm/ano) (RCP 2.6 (*1))	r TÍPICO RCP 4.5 (mm/ano) (*1,25)	r TÍPICO RCP 8.5 (mm/ano) (*1,5 a 1,7)	ESPESSURA TÍPICA (mm)
a	EN 10025	235–275	XS2 / XS3	0,1 – 0,25	0,125 – 0,312	0,16 – 0,4	8 – 20
b	EN 10088	≥220	XS3	< 0,01	< 0,01	< 0,01	3 – 8
c	ASTM A123 / ISO 1461	250	XS1 / XS2	0,02 – 0,10	0,025 – 0,125	0,032 – 0,16	4 – 12
d	EN 10025 / EN 10149	355–420	XS2 / XS3	0,08 – 0,20	0,1 – 0,25	0,128 – 0,32	10 – 25
e	EN 10248 / EN 10249	355–460	XS3	0,2 – 0,4	0,25 – 0,5	0,32 – 0,64	9 – 16
f	EN 10025 / ISO 898-1	355–500	XS3	0,15 – 0,30	0,188 – 0,375	0,24 – 0,48	12 – 30

Inicialmente, foi calculado e analisado o impacto de cada cenário RCP na perda de espessura por corrosão ao longo do tempo, com base na

Equação 4, a qual estabelece uma relação direta entre a taxa de corrosão (**r**) e o tempo de exposição (**t**) (Paterlini et al., 2024).

Equação 4 - Cálculo da Perda de Espessura por Corrosão.

$$t_{corr} = r * t$$

Onde:

- **t_{corr}** – Espessura perdida (mm);
- **r** – Taxa de corrosão (mm/ano);
- **t** – Tempo de exposição (anos).

Nesta equação, **(*t_{corr}*)** representa a espessura total perdida por corrosão, expressa em milímetros, funcionando como um indicador quantitativo da degradação dos materiais metálicos ao longo do tempo. Esta relação, de natureza linear, permite estimar a progressão da corrosão para diferentes tipos de aço, assumindo que a taxa de corrosão (***r***) se mantém constante durante o período de análise. Tendo em conta a influência das alterações climáticas, foi introduzido um fator de agravamento sobre o valor de referência (***r_{base}***), sendo este multiplicado por 1,25 e 1,60 nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, respetivamente, de forma a refletir o aumento da agressividade ambiental.

A Figura 30 ilustra a variação da espessura perdida por corrosão ao longo de 100 anos, para os diferentes tipos de aço estrutural, considerando os três cenários climáticos do IPCC (RCP 2.6, RCP 4.5 e RCP 8.5). Os resultados demonstram que a severidade do cenário climático exerce um impacto direto sobre a taxa de corrosão e, consequentemente, sobre a espessura efetivamente degradada ao longo do tempo.

Conclui-se que os materiais expostos ao longo de 100 anos sob o cenário RCP 8.5 apresentam perdas de espessura significativamente superiores face ao cenário RCP 2.6, com destaque para os aços carbono estrutural (a) e galvanizado (c), cuja vulnerabilidade à corrosão é acentuadamente maior em contextos de elevada agressividade ambiental.

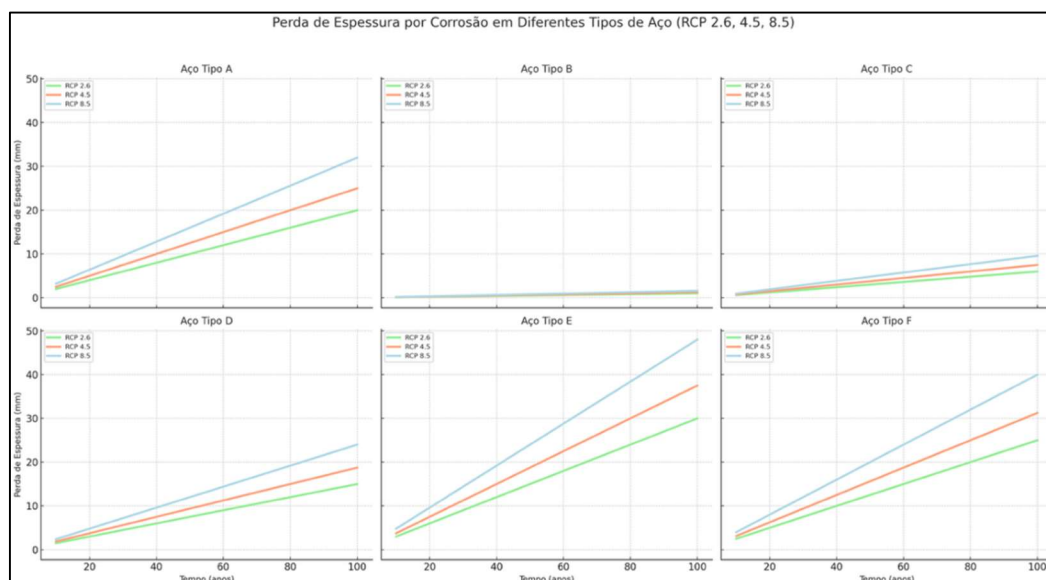


Figura 30 – Perda de espessura por corrosão em diferentes tipos de aço em cada cenário RCP.

Esta abordagem quantitativa permite não apenas comparar a durabilidade relativa dos materiais metálicos, mas também suportar decisões de projeto e estratégias de manutenção preventiva, com base em critérios de vida útil esperada e risco de falha por corrosão.

A análise desenvolvida para os três cenários climáticos definidos pelo IPCC evidencia, conforme apresentado no Quadro 29, que tanto a taxa de corrosão como a perda de espessura aumentam de forma progressiva com o agravamento do cenário considerado.

No cenário RCP 2.6, correspondente a uma trajetória de estabilização das emissões, os aços estruturais convencionais evidenciam uma evolução lenta dos mecanismos de corrosão, com perdas de espessura reduzidas e tempos até à corrosão crítica compatíveis com durações de vida útil prolongadas. As diferenças entre os vários tipos de aço são pouco significativas, e a maioria mantém um comportamento previsível e controlado ao longo do tempo.

Com a transição para o cenário RCP 4.5, observa-se um aumento nas taxas de corrosão e uma redução significativa do tempo necessário para atingir níveis críticos de degradação. A discrepância entre os materiais metálicos torna-se mais evidente, com os aços inoxidáveis a destacarem-se pelo seu desempenho estável, enquanto os aços galvanizados e carbono demonstram maior suscetibilidade à corrosão em situações de exposição prolongada.

No cenário mais severo, RCP 8.5, os efeitos da corrosão são marcadamente intensificados. As perdas de espessura atingem valores elevados num intervalo temporal reduzido, tornando as diferenças entre materiais determinantes para a durabilidade estrutural. Os aços menos resistentes entram em estado avançado de corrosão em poucas décadas, revelando limites críticos em termos de desempenho e segurança estrutural.

Estes resultados demonstram de forma inequívoca a influência direta das alterações climáticas na integridade dos materiais metálicos, reforçando a importância de integrar cenários climáticos nos critérios de dimensionamento, seleção de materiais e planeamento da vida útil das infraestruturas portuárias e marítimas.

Quadro 29 - Desempenho à Corrosão dos Aços em Diferentes Cenários RCP.

	r (mm/ano) RCP 2.6	t_corr RCP 2.6 (mm)	ANO CORROSÃO RCP 2.6	r (mm/ano) RCP 4.5	t_corr RCP 4.5 (mm)	ANO CORROSÃO RCP 4.5	r (mm/ano) RCP 8.5	t_corr RCP 8.5 (mm)	ANO CORROSÃO RCP 8.5
a	0,20 0	2,0 – 2,0	40,0 – 100,0	0,250	6,2 – 25,0	6,0 – 80,0	0,320	3,2 – 32,0	9,0 – 25,0
b	0,01 0	0,1 – 1,0	300,0 – 800,0	0,013	0,1 – 1,2	240,0 – 640,0	0,016	0,16 – 1,6	188,0 - 500
c	0,06 0	0,6 – 6,0	67,0 – 200,0	0,075	0,8 – 7,5	53,0 – 160,0	0,096	0,96 – 9,6	31,00 – 83,00
d	0,15 0	1,5 – 15,0	67,0 – 167,0	0,188	1,9 – 18,8	53,0 – 133,0	0,240	2,4 – 24,0	13,00 – 33,00
e	0,30 0	3,0 – 30,0	30,0 – 53,0	0,375	3,8 – 37,5	24,0 – 43,0	0,480	4,8 – 48,0	6,00 – 17,00
f	0,25 0	2,5 – 25,0	48,0 – 120,0	0,313	3,1 – 31,2	38,0 – 96,0	0,400	4,0 – 40	8,00 – 20,00

Para uma compreensão mais eficaz dos resultados, foi realizada uma análise comparativa do comportamento à corrosão dos diferentes tipos de aço face aos cenários RCP, com base na estimativa do ano médio de início da corrosão. Esta avaliação, fundamentada na Equação 5, permitiu quantificar o desempenho relativo dos materiais em diferentes condições ambientais.

Equação 5 – Cálculo do desempenho normalizado com base no ano de corrosão.

$$Desempenho (\%) = \left(\frac{t_{médio}}{t_{ref}} \right) * 100$$

Onde:

- **Desempenho (%)** - Valor percentual que representa a resistência relativa à corrosão (quanto maior, melhor o desempenho);
- **$t_{médio}$** - Ano médio de início da corrosão, calculado como a média aritmética dos limites inferior e superior do intervalo fornecido para cada tipo de aço e cenário RCP;
- **t_{ref}** - Valor de referência fixo, correspondente ao máximo absoluto de todos os intervalos analisados, adotado como 800 anos, representando o melhor caso observado (aço inoxidável no RCP 2.6).

Com base nesta abordagem, foi elaborada uma análise qualitativa representada na Figura 31, a qual evidencia uma tendência clara de redução da resistência à corrosão com o agravamento das

condições climáticas. O aço inoxidável (b) apresenta o desempenho mais robusto, mantendo níveis de resistência superiores a 65%, mesmo sob cenários mais exigentes. Em contraste, os aços carbono (a), galvanizado (c) e de alta resistência (d) demonstram maior sensibilidade à corrosão nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, com reduções significativas no desempenho. Por sua vez, os aços utilizados em estacas-prancha (e) e em defensas metálicas (f) registam níveis de desempenho muito baixos em ambientes severos, evidenciando vulnerabilidade crítica à degradação por corrosão.

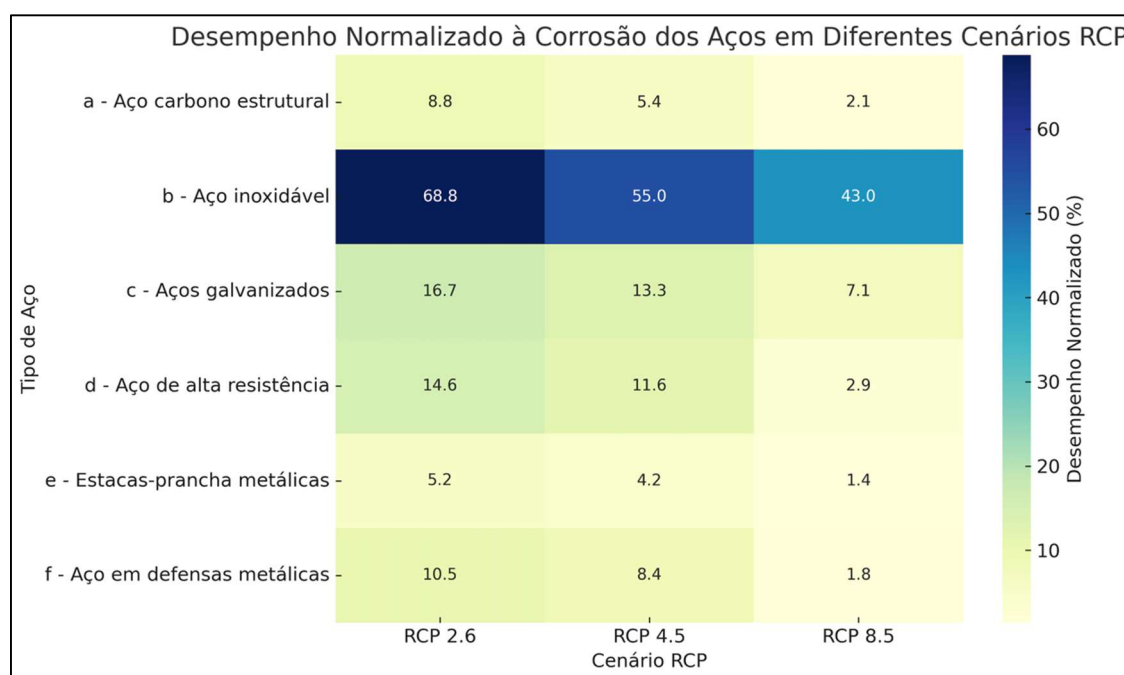


Figura 31 – Desempenho normalizado à corrosão dos aços em diferentes cenários climáticos.

De forma a calcular a área efetiva, foram estabelecidas as áreas típicas (Quadro 30) segundo o tipo de perfil de cada aço.

Quadro 30 - Área típica segundo o tipo de perfil.

PERFIL TÍPICO	Área (mm²)
(a) IPE 200	2400
(b) Tubo Ø168.3x6.3 mm	3120
(c) HEA 160	3420
(d) HEB 200	7640
(e) Estaca VL603	13450
(f) Tubo Ø406.4x12.5 mm	15430

A Equação 6 foi aplicada com o objetivo de estimar a área efetiva remanescente da secção metálica ao longo do tempo, incorporando os efeitos da corrosão progressiva sob diferentes cenários climáticos RCP. Esta abordagem permite avaliar a redução da capacidade resistente dos perfis metálicos em função da espessura de material perdida, assumindo-se que a deterioração ocorre de forma simétrica nas duas faces expostas da secção.

Equação 6 - Cálculo da área efetiva da secção metálica após corrosão.

$$A_{efetiva} = A_0 - 2 * t_{corr} * L$$

Onde:

- $A_{efetiva}$ - Área da secção transversal remanescente do aço após corrosão (mm²);
- A_0 - Área inicial da secção transversal do elemento metálico (mm²), antes de qualquer degradação;
- t_{corr} - Espessura perdida por corrosão (em mm), determinada através da Equação 4;
- L - Largura ou altura útil exposta do elemento metálico (mm), normalmente correspondente ao lado que sofre perda em ambos os flancos;
- O fator 2 representa a corrosão ocorrida em ambas as faces expostas da secção.

Com base no procedimento de cálculo adotado, foi possível obter os resultados apresentados no Quadro 31, que ilustra a evolução da área efetiva dos perfis metálicos ao longo do tempo, em função dos diferentes cenários climáticos RCP. Esta representação permite uma comparação direta do impacto da corrosão nos principais tipos de aço utilizados em estruturas portuárias, evidenciando o efeito cumulativo da deterioração induzida pela agressividade ambiental.

A análise evidencia de forma clara que a severidade do cenário climático influencia diretamente a redução da secção metálica disponível, observando-se uma diminuição progressiva da área útil ($A_{efetiva}$) com o agravamento do cenário, podendo mesmo conduzir à falência técnica em determinados materiais.

No caso do aço carbono estrutural (a), observa-se uma perda total da área efetiva a partir dos 25 anos, mesmo no cenário RCP 2.6, refletindo a sua elevada vulnerabilidade à corrosão em ambientes marinhos sem proteção adicional.

O aço inoxidável (b) mantém praticamente toda a sua capacidade resistente ao longo do período de análise (100 anos), com valores de ***A_efetiva*** superiores a 3000 mm² em todos os cenários RCP, incluindo o RCP 8.5, confirmando a sua excelente durabilidade e desempenho em condições de exposição severa.

O aço galvanizado (c) apresenta uma redução significativa da área efetiva ao longo do tempo, evidenciando perdas de mais de 80% aos 50 anos no cenário RCP 8.5, culminando em falência estrutural total após esse período. Estes resultados indicam uma durabilidade intermédia, adequada apenas em aplicações com vida útil limitada ou com planos de manutenção e repintura definidos.

No caso do aço de alta resistência (d), observa-se uma redução progressiva da área útil de 6290 mm² para valores próximos de zero ao longo do horizonte temporal de 100 anos, sendo a falência antecipada nos cenários RCP 4.5 e 8.5 após cerca de 50 anos. Apesar da sua resistência inicial, o comportamento indica a necessidade de medidas de proteção suplementares ou de restrição do seu uso a elementos menos expostos.

Relativamente às estacas-prancha metálicas (e), os resultados apontam para uma redução acentuada da área efetiva, com perdas superiores a 60% até aos 50 anos no cenário RCP 4.5 e colapso total no RCP 8.5, o que compromete a integridade estrutural a médio prazo e evidencia a necessidade de manutenção periódica ou galvanização reforçada.

Por fim, o aço em defensas metálicas (f) apresenta uma tendência semelhante, mantendo áreas efetivas superiores a 10 000 mm² nos primeiros 25 anos, mas com uma degradação acelerada nos cenários mais agressivos, atingindo falência estrutural total no RCP 8.5 após 50 anos.

Estes resultados confirmam que, à exceção do aço inoxidável, nenhum dos materiais analisados assegura um desempenho estrutural satisfatório a longo prazo sem o recurso a proteções adicionais, como pinturas anticorrosivas, revestimentos catódicos ou manutenção sistemática. A variação observada na área efetiva (***A_efetiva***) ao longo do tempo reforça a importância de integrar projeções climáticas (RCP) na fase de dimensionamento e planeamento da durabilidade, de modo a definir estratégias construtivas mais resilientes e sustentáveis para infraestruturas marítimas e portuárias expostas a ambientes de elevada agressividade.

Quadro 31 - Área efetiva dos perfis metálicos por tipo de aço e cenário climático RCP.

TIPO DE AÇO	A_efetiva (RCP 2.6) (mm ²)	A_efetiva (RCP 4.5) (mm ²)	A_efetiva (RCP 8.5) (mm ²)	A0/2	A _o típico (mm ²)	L típico (mm)
a	800	400	0	1200	2400	400
	0	0	0	1200	2400	400
	0	0	0	1200	2400	400
	0	0	0	1200	2400	400
	0	0	0	1200	2400	400
b	3070	3058	3040	1560	3120	250
	2995	2964	2920	1560	3120	250
	2870	2808	2720	1560	3120	250
	2745	2651	2520	1560	3120	250
	2620	2495	2320	1560	3120	250
c	3060	2970	2844	1710	3420	300
	2520	2295	1980	1710	3420	300
	1620	1170	540	1710	3420	300
	720	45	0	1710	3420	300
	0	0	0	1710	3420	300
d	6290	5953	5480	3820	7640	450
	4265	3421	2240	3820	7640	450
	890	0	0	3820	7640	450
	0	0	0	3820	7640	450
	0	0	0	3820	7640	450
e	10450	9700	8650	6725	13450	500
	5950	4075	1450	6725	13450	500
	0	0	0	6725	13450	500
	0	0	0	6725	13450	500
	0	0	0	6725	13450	500
f	12430	11680	10630	7715	15430	600
	7930	6055	3430	7715	15430	600
	430	0	0	7715	15430	600
	0	0	0	7715	15430	600
	0	0	0	7715	15430	600

A Figura 32 representa a evolução da área efetiva média dos diferentes tipos de aço face ao agravamento das condições climáticas nos cenários RCP, permitindo visualizar de forma mais nítida os dados estabelecidos anteriormente no Quadro 31 (variação num intervalo temporal de 10, 25,50,75,100 anos).

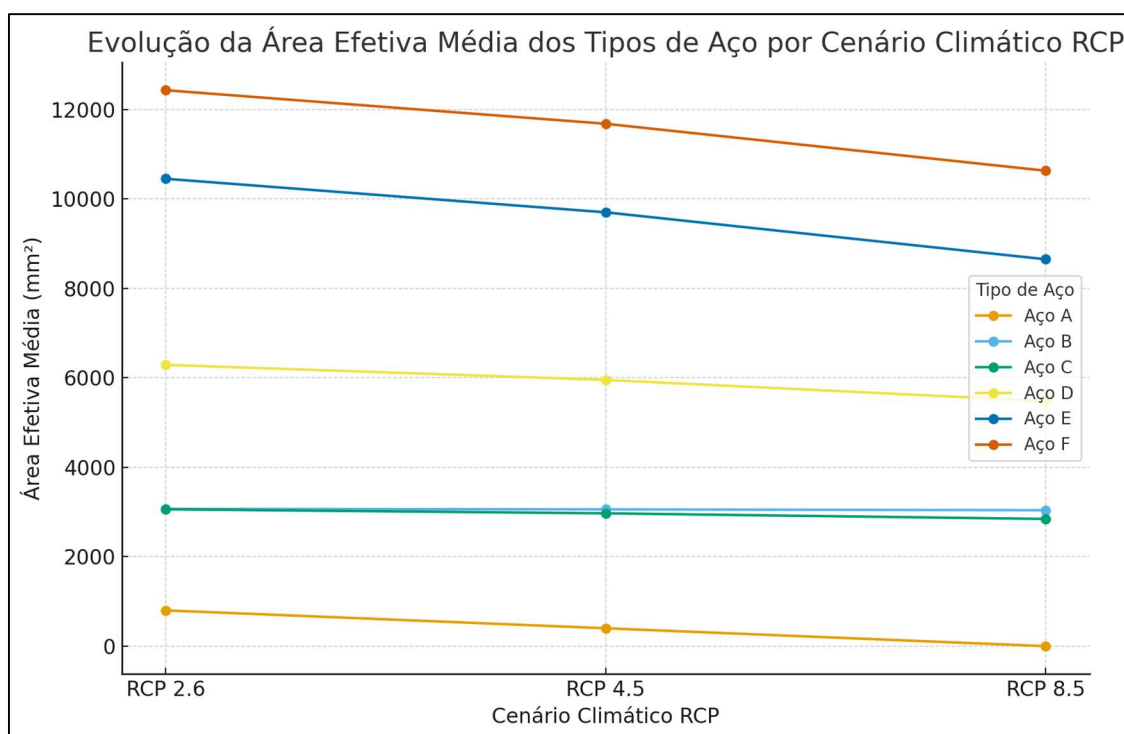


Figura 32 – Evolução da área efetiva por tipo de aço em diferentes cenários RCP.

Com o objetivo de avaliar o impacto combinado das alterações climáticas e operacionais sobre as estruturas portuárias, foram considerados, nesta análise, seis tipos de ações relevantes com potencial de influência no desempenho e durabilidade das infraestruturas: ondas, precipitação, temperaturas mínimas e máximas, tráfego e vento. Estes parâmetros representam condicionantes físicas e funcionais que, sob diferentes cenários climáticos RCP, podem intensificar-se ou atenuar-se ao longo do tempo.

Para incorporar essas variações, foi desenvolvido o Quadro 32, no qual são apresentados os fatores de ajuste aplicáveis a cada tipo de ação, conforme o cenário RCP adotado. Estes fatores foram utilizados multiplicando o valor base de cada variável pelo respetivo coeficiente, permitindo uma projeção ajustada à evolução climática prevista.

Esta abordagem possibilita a quantificação do acréscimo ou redução esperada na intensidade das ações ao longo do tempo, oferecendo uma base objetiva para a avaliação da vulnerabilidade estrutural e para o dimensionamento de soluções adaptativas em contexto portuário.

Quadro 32 – Fator de ajuste dos tipos de ações integradas nos cenários dos fenômenos climáticos extremos.

FATOR DE AJUSTE			
TIPO DE AÇÃO	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
TEMPERATURA MÍNIMA	0.9	0.95	1.0
ONDAS	1.0	1.1	1.2
PRECIPITAÇÃO (GERAL)	1.0	1.05	1.1
TEMPERATURA MÁXIMA	1.0	1.15	1.3
TRÁFEGO	1.0	1.1	1.25
VENTO (GERAL)	0.95	1.05	1.15

Cada fator representa uma multiplicação ajustada à ação correspondente, refletindo a tendência esperada de agravamento ou suavização dos efeitos:

- Um valor inferior a 1,0 (ex: 0,90 para frio em RCP 2.6) indica uma redução da intensidade esperada da ação;
- Um valor igual a 1,0 representa condições de referência atuais;
- Valores superiores a 1,0 (ex: 1,30 para temperatura em RCP 8.5) indicam um aumento significativo do impacto previsto da ação no cenário futuro.

Procedeu-se também à análise da durabilidade das estruturas metálicas em ambiente marítimo, sendo esta significativamente afetada pelo processo de corrosão, levando à redução progressiva da secção transversal dos perfis estruturais. Esta perda de material compromete diretamente a capacidade resistente dos elementos, sendo necessário adaptar as verificações de segurança estrutural para refletir essa realidade.

O Quadro 33 apresenta a tensão de cedência f_y dos diferentes perfis metálicos utilizados neste estudo, bem como o respetivo coeficiente de segurança parcial γ_M , conforme as especificações do Eurocódigo 3.

Quadro 33 - Tensão de cedência do aço segundo o tipo de perfil e respetivo coeficiente de segurança.

PERFIL TÍPICO	f_y (MPa)	γ_M
(a) IPE 200	235	1
(b) Tubo Ø168.3x6.3 mm	500	1,1
(c) HEA 160	275	1
(d) HEB 200	355	1
(e) Estaca VL603	355	1
(f) Tubo Ø406.4x12.5 mm	275	1

Para estimar a capacidade resistente residual dos elementos metálicos corroídos, foi aplicada a Equação 7, baseada na proporcionalidade entre a tensão resistente e a área efetiva da secção. A análise seguiu as expressões do Eurocódigo 3, permitindo calcular a resistência à compressão e à flexão, considerando as propriedades do aço, a geometria da secção e os coeficientes de segurança. Esta abordagem assegura uma avaliação rigorosa da degradação estrutural ao longo do tempo.

Equação 7 - Cálculo da tensão resistente efetiva (σ_{eff}) de um elemento estrutural metálico afetado por corrosão.

$$\sigma_{eff} = f_y * \left(\frac{A_{red}}{A_0} \right)$$

Onde:

- σ_{eff} - Tensão efetiva admissível (em MPa), ou seja, a capacidade resistente do aço após a redução da secção;
- f_y - Tensão de cedência do material (em MPa), correspondente à tensão máxima antes da plastificação do aço não corroído;
- A_{red} - Área da secção transversal reduzida (em mm²), resultante da corrosão ao longo do tempo;
- A_0 - Área inicial da secção transversal (em mm²), sem qualquer perda por corrosão.

As verificações ao Estado Limite Último (ELU) de elementos estruturais metálicos requerem a determinação das suas capacidades resistentes, tanto face à compressão axial como à flexão. Para esse efeito, o Eurocódigo 3 fornece um conjunto de expressões normativas que permitem avaliar

se os esforços solicitantes permanecem dentro dos limites de segurança admissíveis para a estrutura.

A Equação 8 é utilizada para calcular a resistência de cálculo à compressão axial de um elemento metálico, tendo em conta a área da secção transversal, **A**, a tensão de cedência do aço, ***f_y***, e o coeficiente parcial de segurança do material, ***γ_M***. A equação é expressa da seguinte forma:

Equação 8 – Cálculo da resistência de cálculo à compressão.

$$N_{Rd} = \left(\frac{A * f_y}{\gamma_M} \right)$$

Onde:

- ***N_{Rd}*** - Resistência de cálculo à compressão axial (em N);
- **A** - Área da secção transversal do elemento (em mm²), podendo ser a área reduzida no caso de corrosão;
- ***f_y*** - Tensão de cedência do aço (em MPa ou N/mm²);
- ***γ_M*** - Coeficiente parcial de segurança do material, normalmente varia entre 1 e 1,1.

No caso de estruturas degradadas por corrosão, a área (**A**) deve ser substituída pela área reduzida *A_{red}*, refletindo as perdas dimensionais acumuladas.

A equação utilizada (Equação 9) para o cálculo do momento resistente de cálculo, ***M_{Rd}***, permite determinar a resistência última à flexão de uma secção estrutural de aço em regime plástico.

Esta grandeza é obtida pelo produto entre o módulo plástico da secção transversal, ***W_{pl}***, e a tensão de cedência do material, ***f_y*** (Equação 8), dividido por um coeficiente parcial de segurança, ***γ_M*** (Equação 8).

A aplicação desta fórmula é fundamental para garantir a integridade das estruturas metálicas submetidas a ações de flexão, especialmente em ambientes portuários sujeitos a esforços dinâmicos e degradação ambiental.

Equação 9 – Cálculo do momento resistente de cálculo.

$$M_{Rd} = \left(\frac{W_{pl} * f_y}{\gamma_M} \right)$$

Onde:

- M_{Rd} - Momento resistente de cálculo (em kNm ou Nmm);
- W_{pl} - Módulo plástico da secção (em mm³), que representa a capacidade da secção resistir à flexão em regime plástico completo;
- f_y - Tensão de cedência do aço (em MPa ou N/mm²);
- γ_M - Coeficiente parcial de segurança do material, normalmente varia entre 1 e 1,1.

O Quadro 34 apresenta os valores de largura (**b0**) e altura (**h0**) efetiva inicial das secções metálicas representativas utilizadas para cada tipo de aço analisado no estudo. Estes parâmetros são fundamentais para a caracterização geométrica dos elementos estruturais permitindo perceber a corrosão provocada especificamente nestas secções.

Quadro 34 – Valores da largura e altura efetiva inicial.

10	b0 (mm)	h0 (mm)
a	100	240
b	168	168
c	160	152
d	200	200
e	600	224
f	406	406

A Equação 10 apresentada permite estimar o módulo plástico (**Wpl**) de uma secção metálica retangular, considerando perdas de material devido à corrosão.

Este parâmetro é essencial para avaliar a capacidade resistente à flexão em regime plástico, é utilizado no cálculo do momento resistente da estrutura.

A equação considera ainda as dimensões efetivas (**b_{eff}/h_{eff}**), ajustadas conforme a espessura corroída, refletindo o comportamento real da secção ao longo do tempo de exposição ambiental.

Equação 10 -Módulo plástico da secção.

$$W_{pl} = \left(\frac{b_{eff} * h_{eff}^2}{4} \right)$$

Onde:

- W_{pl} - Módulo plástico da secção (em mm³), que quantifica a capacidade da secção resistir à flexão antes da plastificação completa;
- b_{eff} - Largura efetiva da secção (em mm), considerando possíveis perdas de material devido à corrosão, dado pela equação $b_{eff} = b_0 - 2 * t_{corr}$;
- h_{eff} - Altura efetiva da secção (em mm), também ajustada para perdas por corrosão, dado pela equação $h_{eff} = h_0 - 2 * t_{corr}$;
- $\left(\frac{1}{4}\right)$ - Deriva da integração da distribuição de tensões em regime plástico para uma secção retangular.

A Equação 11 permite determinar a resistência ao esforço transversal (***V_{Rd}***) de uma secção metálica, considerando a capacidade da alma resistir ao cortante.

É especialmente relevante em zonas onde atuam forças verticais concentradas, como apoios ou ligações. O valor obtido é ajustado com base num fator de segurança e num coeficiente derivado da teoria da plasticidade.

Equação 11 – Cálculo da resistência ao esforço transversal de cálculo.

$$V_{Rd} = \left(\frac{A_v * f_y}{\sqrt{3} * \gamma_M} \right)$$

Onde:

- V_{Rd} - Resistência ao esforço transversal de cálculo (em N ou kN);
- A_v - Área resistente ao cortante (em mm²), geralmente associada à alma da secção (por exemplo, em perfis I ou H);
- f_y - Tensão de cedência do aço (em MPa ou N/mm²);
- γ_M - Coeficiente parcial de segurança do material, normalmente varia entre 1 e 1,1;

- $\sqrt{3}$ - Fator que decorre da teoria da plasticidade para o estado de tensão de cisalhamento puro.

O Quadro 35 apresenta as características geométricas relevantes para o cálculo da área resistente ao esforço transversal (**A_v**), discriminadas por tipo de aço. Este parâmetro é fundamental na verificação da resistência ao cortante de secções metálicas.

Para perfis com alma, como os perfis IPE ou HE, a área resistente ao cortante é determinada pelo produto entre a altura útil da alma (**h_w**) e a espessura da alma (**t_w**). Já no caso de perfis tubulares, assume-se que (**$A_v \approx A_0$**), considerando a totalidade da secção como resistente ao cisalhamento.

Esta abordagem permite uniformizar e simplificar o processo de cálculo da resistência ao esforço transversal em diferentes tipologias estruturais, mantendo a coerência com os critérios definidos pelo Eurocódigo.

Quadro 35 - Características geométricas e fórmula da área resistente ao esforço transversal (**A_v**) por tipo de aço.

TIPO DE AÇO	GEOMETRIA	h_w (mm)	t_w (mm)	FÓRMULA A_v
a	IPE 200	200	6	$h_w * t_w$
b	Tubo Ø168.3x6.3 mm			$A_v \approx A_0$
c	HEA 160	160	7	$h_w * t_w$
d	HEB 200	200	9	$h_w * t_w$
e	Estaca VL603	300	13,5	$h_w * t_w$
f	Tubo Ø406.4x12.5 mm			$A_v \approx A_0$

O Quadro 36 sintetiza a variação estimada das ações climáticas (ondas, vento, precipitação, temperatura e frio) e ações indiretas (tráfego), consoante diferentes cenários de alterações climáticas (RCP 2.6, 4.5 e 8.5).

Estas variações são expressas em termos percentuais sobre a ação característica (***Q***), refletindo o impacto projetado das mudanças climáticas na intensidade das solicitações sobre as estruturas portuárias que é compreendido da seguinte forma:

- **Ondas (energia, altura, frequência)**

- RCP 2.6: Aumento até 10% – ligeira intensificação dos eventos ondulatórios, mas dentro de limites moderados;
- RCP 4.5: Aumento até 20% – alteração mais relevante, afetando sobretudo a agressividade do mar nos quebra-mares e estruturas de acostagem;
- RCP 8.5: Aumento até 40% – cenários severos de tempestades, implicando maiores exigências estruturais e reforços de proteção.

- **Ventos (velocidade máxima diária e rajadas)**

- RCP 2.6: Aumento até 5% – variações ligeiras, sobretudo em zonas expostas;
- RCP 4.5: Aumento até 15% – possível intensificação da carga eólica em elementos verticais;
- RCP 8.5: Aumento até 30% – efeitos significativos sobre equipamentos portuários, coberturas e estruturas altas com risco de instabilidade dinâmica.

- **Precipitação (intensidade e frequência)**

- RCP 2.6: Aumento até 10% – aumento moderado do volume e frequência de eventos pluviais;
- RCP 4.5: Aumento até 20% – risco de sobrecarga de sistemas de drenagem e erosão localizada.
- RCP 8.5: Aumento até 40% – implica redimensionamento de sistemas hidráulicos e medidas contra escorrência superficial e instabilidade geotécnica.

- **Temperatura máxima (média e extremos)**

- RCP 2.6: Aumento até 5% – impacto térmico pouco significativo em materiais;
- RCP 4.5: Aumento até 10% – alterações nos gradientes térmicos das superfícies expostas;
- RCP 8.5: Aumento até 25% – risco de fadiga térmica e deformações excessivas, especialmente em betões e aços.

- **Tráfego (utilização e acessos portuários)**
 - RCP 2.6: Mantém-se constante – pressupõe estabilidade económica e climática;
 - RCP 4.5: Redução até 5% – possível queda ligeira da procura por impactos logísticos ou ambientais;
 - RCP 8.5: Redução até 10% – cenários extremos que afetam a continuidade das operações, segurança de navegação e condições de acostagem.
- **Temperatura mínima (número de dias com temperatura baixa)**
- RCP 2.6: Redução até 5% – menor frequência de fenómenos de gelo;
- RCP 4.5: Redução até 10% – contribui para alívio de ações térmicas de contração;
- RCP 8.5: Redução até 20% – praticamente elimina o risco de geada, afetando a durabilidade de certos materiais habituados a ciclos de gelo-degelo.

Além disso, são indicados os coeficientes parciais de segurança para as ações permanentes (γ_G) e variáveis (γ_Q), mantendo-se constantes, mesmo perante cenários de agravamento climático.

Esta informação é essencial para o dimensionamento seguro e realista das infraestruturas, assegurando que estas resistam ao aumento esperado das solicitações ao longo do tempo.

Quadro 36 -Variação estimada das ações climáticas e coeficientes parciais de segurança segundo os cenários RCP.

TIPO DE AÇÃO	CENÁRIO RCP	VARIAÇÃO ESTIMADA DE Q	γ_G	γ_Q
ONDAS	RCP 2.6	↗ até 10%	1,35	1,5
ONDAS	RCP 4.5	↗ até 20%	1,35	1,5
ONDAS	RCP 8.5	↗ até 40%	1,35	1,5

VENTO	RCP 2.6	↗ até 5%	1,35	1,5
VENTO	RCP 4.5	↗ até 15%	1,35	1,5
VENTO	RCP 8.5	↗ até 30%	1,35	1,5
PRECIPITAÇÃO	RCP 2.6	↗ até 10%	1,35	1,5
PRECIPITAÇÃO	RCP 4.5	↗ até 20%	1,35	1,5
PRECIPITAÇÃO	RCP 8.5	↗ até 40%	1,35	1,5
TEMPERATURA MÁXIMA	RCP 2.6	↗ até 5%	1,35	1,5
TEMPERATURA MÁXIMA	RCP 4.5	↗ até 10%	1,35	1,5
TEMPERATURA MÁXIMA	RCP 8.5	↗ até 25%	1,35	1,5
TRÁFEGO	RCP 2.6	Constante	1,35	1,3
TRÁFEGO	RCP 4.5	↘ até 5%	1,35	1,3
TRÁFEGO	RCP 8.5	↘ até 10%	1,35	1,3
TEMPERATURA MÍNIMA	RCP 2.6	↘ até 5%	1,35	1,5
TEMPERATURA MÍNIMA	RCP 4.5	↘ até 10%	1,35	1,5
TEMPERATURA MÍNIMA	RCP 8.5	↘ até 20%	1,35	1,5

O Quadro 37 apresenta os valores característicos (**g_k**) (em kN/m²) das diferentes ações consideradas no dimensionamento estrutural.

Quadro 37 - Tipo de ação e respetivo valor característico **g_k** (kN/m²).

10	g_k (kN/m ²)
ONDAS	5
VENTO	1,2
PRECIPITAÇÃO	0,8
TEMPERATURA MÁXIMA	0,5
TRÁFEGO	7,5
TEMPERATURA MÍNIMA	0,9

Os valores (**q_k**) apresentados (Quadro 38) servem como ações características representativas das cargas ambientais e funcionais nas estruturas marítimas e portuárias, segundo as ROM.

São utilizados no dimensionamento estrutural para avaliar os efeitos combinados das ações permanentes e variáveis sobre os elementos, garantindo segurança face a solicitações típicas de operação e exposição marítima.

Estes valores são especialmente relevantes na definição das combinações de cálculo nos estados limite último e de serviço.

Quadro 38 - Valores de q_K deduzidos segundo as ROM.

TIPO DE AÇÃO	VALOR USADO q_K (kN/m ²)
ONDAS MARÍTIMAS	8,0
VENTO	2,5
PRECIPITAÇÃO	1,2
TEMPERATURA MÁXIMA	1,0
TRÁFEGO RODOVIÁRIO	10,0
TEMPERATURA MÍNIMA	1,0

Os valores de largura de influência (b) e vão livre (L) (Quadro 39) são utilizados para determinar a extensão da área carregada que atua sobre um elemento estrutural e o seu comprimento entre apoios.

Servem de base para o cálculo das cargas distribuídas aplicadas sobre os elementos metálicos, permitindo a avaliação das solicitações internas e o dimensionamento adequado da secção resistente.

Quadro 39 – Valores típicos usados para a largura de influência (b) e vão livre (L) (adaptado de Peixoto, 2014).

ELEMENTO ESTRUTURAL	LARGURA DE INFLUÊNCIA b (m)	VÃO LIVRE L (m)
a - AÇO ESTRUTURAL LAMINADO (S235 / S275)	2	7
b - AÇO INOXIDÁVEL (AISI 316L / Duplex)	2	6
c - AÇOS GALVANIZADOS	2	6
d - AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA (S355 / S420)	4	5
e - ESTACAS-PRANCHA METÁLICAS	2	5
f - TUBOS ESTRUTURAIS SOLDADOS (EN 10210/10219)	1,5	5,5

O momento de dimensionamento (M_{Ed}) é determinado pela combinação dos efeitos das ações permanentes e variáveis, através da Equação :

Equação 12 – Cálculo do momento de dimensionamento.

$$M_{Ed} = \gamma_G * M_{Gk} + \gamma_Q * M_{Qk}$$

Onde:

- **M_{Ed}** - Momento de cálculo ou momento de dimensionamento (kNm), considerado na verificação da resistência da estrutura;
- **M_{Gk}** - Momento característico devido às ações permanentes (ex.: peso próprio, equipamentos fixos);
- **M_{Qk}** - Momento característico devido às ações variáveis (ex.: sobrecargas de utilização, vento, sismo);
- **γ_G** - Coeficiente de segurança para ações permanentes;
- **γ_Q** - Coeficiente de segurança para ações variáveis.

Este valor representa o momento fletor total a considerar na verificação da segurança estrutural do elemento em análise. Os coeficientes (**γ_G**) e (**γ_Q**) correspondem aos fatores parciais de segurança para ações permanentes e variáveis, respetivamente.

O momento fletor característico devido às ações permanentes (**M_{Gk}**) é calculado a partir da Equação 12.

Equação 12 – Cálculo do momento característico devido às ações permanentes

$$M_{Gk} = \left(\frac{g_k * b * L^2}{8} \right)$$

Onde:

- **M_{Gk}** - Momento fletor característico devido às ações permanentes (kNm);
- **g_k** - Carga permanente (kN/m²), ou seja, o peso próprio ou outras ações permanentes sobre a estrutura;
- **b** - Largura da zona de influência da carga (m), geralmente correspondente à largura do elemento estrutural ou da faixa atuante;
- **L** - Vão livre do elemento estrutural (m);
- **8** - Fator de forma típico para vigas simplesmente apoiadas sujeitas a carga uniformemente distribuída.

Na equação (**g_k**) representa a carga permanente (como o peso próprio), (**b**) a largura de influência e (**L**) o vão livre da estrutura.

Esta expressão assume uma carga uniformemente distribuída numa viga simplesmente apoiada, refletindo a situação típica de carregamento em estruturas portuárias.

De forma análoga, o momento fletor característico devido às ações variáveis (***MQk***) é dado pela Equação 13.

Equação 13 - Momento fletor máximo característico de uma viga isostática com carga uniformemente distribuída.

$$M_{Qk} = \left(\frac{q_k * b * L^2}{8} \right)$$

Onde:

- ***M_{Gk}*** - Momento fletor característico devido às ações variáveis (kNm);
- ***q_k*** - Carga variável de cálculo (kN/m²), representando ações ambientais ou de utilização, dada pela equação $q_{krp} = q_{kbase} * (1 + \delta)$, onde δ corresponde à variação de (*Q*/100) (valor de *Q* presente no Quadro 36).
- ***b*** - Largura da zona de influência da carga (m), geralmente correspondente à largura do elemento estrutural ou da faixa atuante;
- ***L*** - Vão livre do elemento estrutural (m);
- **8** - Fator de forma típico para vigas simplesmente apoiadas sujeitas a carga uniformemente distribuída.

O valor de (***qk***) é ajustado de acordo com o cenário climático (RCP), onde δ representa a variação percentual da ação variável extraída do Quadro 36.

O esforço normal de cálculo (***NEd***) resulta da combinação das ações permanentes e variáveis aplicadas na estrutura, segundo a Equação 14.

Equação 14 - Equação do esforço normal de cálculo.

$$N_{Ed} = G + Q = \gamma_G * g_k + \gamma_Q * q_K$$

Onde:

- N_{Ed} - Esforço normal de cálculo (valor de projeto da força axial) (kN);
- q_k - Carga variável de cálculo (kN/m²), representando ações ambientais ou de utilização, dada pela equação $q_{krp} = q_{kbase} * (1 + \delta)$, onde δ corresponde à variação de ($Q/100$) (valor de Q presente no Quadro 36);
- g_k - Carga permanente (kN/m²), ou seja, o peso próprio ou outras ações permanentes sobre a estrutura;
- γ_G - Coeficiente de segurança para ações permanentes;
- γ_Q - Coeficiente de segurança para ações variáveis

Este valor corresponde à força axial total de dimensionamento a aplicar na verificação da resistência à compressão ou tração de um elemento estrutural. As cargas (g_k) e (q_k) referem-se, respetivamente, às ações permanentes e variáveis por unidade de área, sendo esta última ajustada conforme o cenário RCP.

Para a verificação ao esforço cortante nos apoios de vigas isostáticas sujeitas a carregamento uniformemente distribuído, utiliza-se a Equação 15.

Equação 15 - Esforço Transverso de Cálculo em apoio da viga isostática com carga uniformemente distribuída.

$$V_{Ed} = \left(\frac{q_d * b * L}{2} \right)$$

Onde:

- V_{Ed} - Esforço transverso máximo de cálculo (KN);
- q_d - Carga variável de cálculo (kN/m²), representando ações ambientais ou de utilização, dada pela equação $q_d = g_k * \gamma_G + \gamma_Q * q_k$;
- b - Largura da zona de influência da carga (m), geralmente correspondente à largura do elemento estrutural ou da faixa atuante;
- L - Vão livre do elemento estrutural (m);
- 2 - Representa a distribuição do esforço cortante total nos apoios de uma viga simplesmente apoiada submetida a uma carga uniformemente distribuída.

As equações dos rácios de verificação permitem avaliar a segurança dos elementos estruturais comparando os esforços solicitantes com as respetivas resistências de cálculo. O Rácio do esforço normal é dada pela Equação 16.

Equação 16 – Rácio esforço Normal.

$$Rácio_N = \left(\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} \right)$$

Onde:

- N_{Ed} - Esforço normal de cálculo (valor de projeto da força axial) (kN);
- N_{Rd} - Resistência de cálculo à compressão axial (em N).

O Rácio do momento fletor é definido pela Equação 17.

Equação 17 – Rácio do momento fletor.

$$Rácio_M = \left(\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \right)$$

Onde:

- M_{Ed} - Momento de cálculo ou momento de dimensionamento (kNm), considerado na verificação da resistência da estrutura;
- M_{Rd} - Momento resistente de cálculo (em kNm ou Nmm).

Por sua vez, o Rácio do esforço transversal é expresso pela Equação 18.

Equação 18 – Rácio do esforço transversal.

$$Rácio_V = \left(\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} \right)$$

Onde:

- V_{Ed} - Esforço transversal máximo de cálculo (kN);
- V_{Rd} - Resistência ao esforço transversal de cálculo (em N ou kN);

O Quadro 40 apresenta os valores estruturais calculados (tensões, áreas reduzidas e resistências) ao longo de 100 anos para cada tipo de aço e cenário climático.

Quadro 40 – Análise estrutural tendo em conta o respetivo intervalo de variação temporal (100 anos).

TIPO AÇO	CENÁRIO RCP	Σ_{EFF} (MPa)	A_RED (MM ²)	N_RD (KN)	M_RD (KNM)	V_ED (KN)
a	RCP 2.6	235.00	0 – 2400	564.00	338.40	0.44 – 4.94
	RCP 4.5	235.00	0 – 2400	564.00	338.40	0.46 – 5.83
	RCP 8.5	235.00	0 – 2400	564.00	338.40	0.48 – 7.37
b	RCP 2.6	419.87 – 500.00	2620 – 3120	1418.18	491.04 – 538.82	0.43 – 4.98
	RCP 4.5	399.84 – 500.00	2495 – 3120	1418.18	404.13 – 479.56	0.45 – 5.87
	RCP 8.5	371.79 – 500.00	2320 – 3120	1418.18	328.13 – 424.81	0.46 – 7.43
c	RCP 2.6	43.42 – 275.00	0 – 3420	940.50	187.10 – 254.14	0.57 – 10.34
	RCP 4.5	57.89 – 275.00	0 – 3420	940.50	107.89 – 153.19	0.61 – 8.33
	RCP 8.5	89.74 – 275.00	0 – 3420	940.50	32.35 – 83.28	0.63 – 10.53
d	RCP 2.6	104.08 – 355.00	0 – 7640	0 – 2712.20	0 – 710.00	0.66 – 8.59
	RCP 4.5	41.35 – 355.00	0 – 7640	0 – 2712.20	0 – 311.67	0.67 – 10.12
	RCP 8.5	0.00 – 355.00	0 – 7640	0 – 2712.20	0 – 99.83	0.73 – 12.80
e	RCP 2.6	38.27 – 355.00	0 – 13450	0 – 4774.75	0 – 2671.87	1.92 – 24.25
	RCP 4.5	157.04 – 355.00	0 – 13450	0 – 4774.75	0 – 1082.65	2.12 – 28.59
	RCP 8.5	101.62 – 355.00	0 – 13450	0 – 4774.75	0 – 259.01	2.12 – 36.15
f	RCP 2.6	61.13 – 275.00	0 – 15430	0 – 4243.25	0 – 4600.98	1.29 – 16.31
	RCP 4.5	7.66 – 275.00	0 – 15430	0 – 4243.25	0 – 2048.13	1.53 – 19.23
	RCP 8.5	0.00 – 275.00	0 – 15430	0 – 4243.25	0 – 673.77	1.57 – 24.31

O Quadro 41 mostra os rácios estruturais correspondentes (N, M e V) e indica se ocorre falência técnica, o tipo de falência e se esta se verifica em vários casos da análise.

Os intervalos de rácios são obtidos para cada tipo de aço (a–f) e para os três cenários climáticos RCP (2.6, 4.5 e 8.5) em função dos 100 anos (*Perda total da secção útil em N* → corresponde à corrosão integral da área resistente; *M > 1* → indica que o momento fletor aplicado ultrapassa a capacidade resistente (falência por solicitação excessiva); *Falência precoce* → ocorre em fases intermédias de vida útil, antes do horizonte dos 100 anos, devido à degradação acelerada da secção) (A coluna “Muitos casos de falência” assinala com “Sim” as situações em que se verificaram múltiplas combinações de ações e cenários com rácios superiores a 1 ou perda total de resistência, indicando falência generalizada ou recorrente no conjunto da análise estrutural).

Quadro 41- O quadro apresenta os intervalos de rácios estruturais (N/M/V).

TIPO DE AÇO	CENÁRIO RCP	INTERVALOS RÁCIOS (N / M / V)	FALÊNCIA TÉCNICA – INTERPRETAÇÃO	MUITOS CASOS DE FALÊNCIA
a	RCP 2.6	$N = 0.000-0.001 / M = 0.087-0.937 / V = 0.002-0.027$	SIM – FALÊNCIA POR PERDA TOTAL DA SECÇÃO EM N	SIM
	RCP 4.5	$N = 0.000-0.001 / M = 0.092-0.964 / V = 0.003-0.029$	SIM – FALÊNCIA POR PERDA TOTAL DA SECÇÃO EM N	
	RCP 8.5	$N = 0.000-0.001 / M = 0.087-1.018 / V = 0.003-0.032$	SIM – FALÊNCIA POR PERDA DE SECÇÃO EM N E $M > 1$	
b	RCP 2.6	$N = 0.000-0.001 / M = 0.040-0.474 / V = 0.001-0.006$	NÃO – TODOS OS RÁCIOS ≤ 1 , APESAR DE $N \rightarrow 0$	NÃO
	RCP 4.5	$N = 0.000-0.001 / M = 0.048-0.593 / V = 0.001-0.007$	NÃO – MANTÉM SEGURANÇA ESTRUTURAL	
	RCP 8.5	$N = 0.000-0.001 / M = 0.051-0.771 / V = 0.001-0.007$	NÃO – MANTÉM SEGURANÇA ESTRUTURAL	
c	RCP 2.6	$N = 0.000-0.001 / M = 0.085-1.374 / V = 0.004-0.071$	SIM – FALÊNCIA POR PERDA DE SECÇÃO EM N E $M > 1$	SIM
	RCP 4.5	$N = 0.000-0.001 / M = 0.150-2.221 / V = -$	SIM – FALÊNCIA PRECOCE EM N E $M > 1$	
	RCP 8.5	$N = 0.000-0.001 / M = 0.261-7.825 / V = -$	SIM – FALÊNCIA PRECOCE EM N E $M > 1$	
d	RCP 2.6	$N = 0.000 / M = 0.061-0.656 / V = 0.002-0.023$	SIM – FALÊNCIA POR PERDA TOTAL EM N	SIM
	RCP 4.5	$N = 0.000 / M = 0.147-1.968 / V = -$	SIM – FALÊNCIA PRECOCE EM N E $M > 1$	
	RCP 8.5	$N = 0.000 / M = 0.435-11.141 / V = -$	SIM – FALÊNCIA PRECOCE EM N E $M > 1$	
e	RCP 2.6	$N = 0.000-0.001 / M = 0.006-0.061 / V = 0.006-0.070$	SIM – FALÊNCIA POR PERDA TOTAL EM N	SIM
	RCP 4.5	$N = 0.000-0.001 / M = 0.015-0.154 / V = -$	SIM – FALÊNCIA PRECOCE EM N	
	RCP 8.5	$N = 0.000-0.001 / M = 0.058-0.679 / V = -$	SIM – FALÊNCIA PRECOCE EM N	
f	RCP 2.6	$N = 0.000-0.007 / M = 0.003-0.032 / V = 0.002-0.020$	SIM – FALÊNCIA POR PERDA TOTAL EM N	SIM
	RCP 4.5	$N = 0.000-0.008 / M = 0.007-0.075 / V = -$	SIM – FALÊNCIA PRECOCE EM N	
	RCP 8.5	$N = 0.000-0.008 / M = 0.020-0.237 / V = -$	SIM – FALÊNCIA PRECOCE EM N	

Cada rácio expressa a relação entre a ação de cálculo e a capacidade resistente da secção, permitindo verificar o cumprimento dos critérios de segurança estrutural. A condição de segurança é assegurada sempre que os rácios são inferiores ou iguais a 1.

A análise dos rácios aos 100 anos permitiu avaliar o nível de solicitação dos diferentes tipos de aço face à respetiva resistência. Globalmente, os rácios de esforço normal (**N**) e esforço transversal (**V**) mantêm-se baixos, sendo o momento fletor (**M**) o parâmetro mais crítico.

O aço (a) evidencia um desempenho inicial aceitável, com rácios de momento de 0,72 para ação de ondas e 0,94 para tráfego, ambos no cenário RCP 2.6 aos 0 anos. No entanto, verifica-se uma perda

total da capacidade resistente aos 100 anos em todos os cenários e ações, com os rácios de esforço normal, momento e transversal anulados. Esta falência não decorre de excesso de solicitação estrutural, mas sim da degradação da secção útil provocada pela corrosão, mesmo em contextos com baixa agressividade climática.

O **aço (b)** apresenta um desempenho altamente consistente e seguro ao longo do tempo. Aos 0 anos, destacam-se rácios de momento de 0,64 sob ação de tráfego (RCP 8.5) e 0,51 para ação de ondas (RCP 2.6), com valores de esforço normal e transversal muito reduzidos ($<0,01$). Mesmo aos 100 anos, este tipo de aço mantém todos os rácios abaixo dos limites admissíveis, demonstrando excelente resistência à corrosão e elevada fiabilidade, independentemente do cenário climático. A sua estabilidade estrutural a longo prazo confirma-o como a opção mais segura para estruturas expostas em ambiente portuário e marítimo.

O **aço (c)** apresenta valores de momento moderados aos 0 anos, como 0,25 em tráfego (RCP 2.6), mas perde completamente a sua capacidade estrutural aos 100 anos, com falência registada em todos os esforços e cenários. Isto demonstra que a proteção superficial oferecida pela galvanização não é suficiente para garantir longevidade estrutural, sobretudo quando sujeita a ações cíclicas ou ambientes húmidos e salinos.

O **aço (d)** evidencia excesso de solicitação logo aos 0 anos em algumas ações. Por exemplo, para tráfego no RCP 4.5, o rácio de momento ultrapassa 1,90, indicando falência imediata por flexão. Esta situação agrava-se com o tempo, conduzindo à falência total aos 100 anos em todos os cenários. A resistência inicial elevada não compensa a perda de espessura progressiva provocada pela corrosão, tornando-o inadequado sem proteção adicional.

O **aço (e)** apresenta os rácios mais elevados entre os aços ainda seguros aos 0 anos, com destaque para 0,80 sob ondas (RCP 2.6) e 0,93 sob tráfego, o que exige atenção nos dimensionamentos. Contudo, verifica-se falência generalizada aos 100 anos, com colapso total da secção útil em todos os cenários. Este comportamento revela que, apesar da robustez inicial, a sua durabilidade estrutural é severamente limitada.

O **aço (f)** já aos 0 anos regista valores residuais de momento, como 0,04 sob ação de vento (RCP 8.5), sugerindo uma estrutura pouco solicitada ou com baixa eficácia inicial. Aos 100 anos, o material falha completamente em todos os cenários e ações, evidenciando ausência de durabilidade mesmo com solicitação estrutural mínima.

Em conclusão, com exceção do aço inoxidável (b), todos os materiais analisados falham devido à perda de secção útil provocada pela corrosão, e não por excesso de solicitação estrutural. Esta

tendência verifica-se inclusive no cenário menos agressivo (RCP 2.6), reforçando a importância de incorporar critérios de durabilidade no projeto de estruturas portuárias, através da seleção de materiais com elevada resistência à corrosão ou da aplicação de soluções de proteção adequadas.

5.3. Conclusões de Cálculo

▪ Betão

Com base nos cálculos realizados, foi avaliado o comportamento de diferentes tipos de betão sujeitos à ação de cloretos, considerando o cenário climático RCP 4.5 e distintos níveis de agressividade do ambiente marinho. A análise centrou-se na velocidade de penetração dos cloretos até à armadura, fator que pode desencadear a corrosão e comprometer a durabilidade das estruturas portuárias.

O **betão (1)** resiste eficazmente à penetração de cloretos, apresentando boa resistência a ambientes químicos agressivos. É indicado para locais com salinidade elevada ou variações significativas de pH, assegurando durabilidade superior a 100 anos.

O **betão (2)** revelou o melhor desempenho da análise, mesmo em cenários extremos, não ocorreu penetração relevante de cloretos em 100 anos. É ideal para zonas críticas, como cantos de cais e zonas de impacto, justificando o custo mais elevado com uma durabilidade excecional e manutenção quase nula.

O **betão (3)** teve desempenho razoável em zonas de exposição moderada, como paredes de cais protegidas ou estruturas interiores húmidas. Garante proteção por cerca de 60 anos, sendo uma solução viável para estruturas de vida útil média.

O **betão (4)** apresentou bons resultados em ambientes agressivos, com penetração de cloretos mais lenta e proteção da armadura superior a 70 anos. É adequado para zonas salpicadas ou em contacto com água do mar em cotas elevadas.

O **betão (5)** demonstrou excelente resistência mesmo em cenários exigentes; os cloretos não atingem a armadura antes dos 100 anos, sendo ideal para pilares ou elementos com exposição direta ao mar.

O **betão (6)**, com características convencionais e menor resistência à penetração de cloretos, teve fraco desempenho; em ambientes agressivos, os cloretos alcançam a armadura em menos de 20 anos, mesmo com recobrimentos adequados. Não é recomendado para zonas expostas sem proteção adicional.

O **betão (7)** teve desempenho intermédio; a inclusão de fibras ajuda a controlar fissuras, mas a durabilidade depende fortemente da execução. Em caso de microfissuras ou recobrimentos insuficientes, a penetração de cloretos é facilitada. Deve ser usado com precaução, em zonas menos expostas ou com manutenção regular.

O **betão (8)**, com ligeiras melhorias face aos convencionais, atrasa moderadamente a chegada dos cloretos à armadura, mas não garante durabilidade suficiente em ambientes severos. Pode ser usado com segurança até 40 anos em zonas protegidas, mas não é indicado para estruturas críticas sem reforço adicional.

- **Aço**

Com base na presente análise estrutural, que considerou diferentes combinações de ações ambientais e projeções climáticas segundo os cenários RCP, avaliou-se a durabilidade e o desempenho estrutural de seis tipos distintos de aço com aplicação recorrente em infraestruturas portuárias e marítimas. Os resultados obtidos revelam comportamentos bastante diferenciados entre os materiais, com implicações diretas no planeamento de estruturas expostas a ambientes agressivos e com requisitos de vida útil prolongada.

O **aço tipo (a)** revelou a menor resistência à corrosão entre todos os materiais analisados. Verificou-se perda total da área efetiva a partir dos 20 anos no cenário RCP 8.5, e degradação significativa já aos 30 anos sob RCP 4.5. A geometria típica dos perfis laminados (como I ou H), associada à ausência de proteção adicional, favorece a retenção de humidade e sais, acelerando a corrosão. Assim, o aço carbono estrutural é desaconselhado para aplicações de longa duração sem manutenção rigorosa, devendo ser reservado a estruturas temporárias ou protegidas, com planos de substituição ou manutenção periódica.

Em contraste, o **aço tipo (b)** apresentou o desempenho mais robusto, mantendo a área resistente praticamente inalterada ao longo dos 100 anos, mesmo nos cenários mais agressivos. Este resultado confirma a elevada resistência do aço inoxidável à corrosão por cloretos, típica de ambientes costeiros. Apesar do custo inicial elevado, a sua utilização é justificada em zonas críticas, expostas ou de difícil acesso, como estacas, defensas ou apoios estruturais, pela redução significativa de necessidades de manutenção.

O **aço tipo (c)** demonstrou um desempenho intermédio, com degradação progressiva da secção resistente e falência estrutural por volta dos 60 anos. A camada de zinco conferida pela galvanização atua como barreira inicial de proteção, mas é gradualmente consumida, sobretudo em ambientes de elevada salinidade ou humidade persistente. Em cenários como o RCP 8.5, essa

proteção torna-se insuficiente. A sua aplicação pode ser considerada em estruturas com vida útil inferior a 50 anos, desde que acompanhada por inspeções regulares e eventual reaplicação da proteção.

O **aço tipo (d)**, embora apresente elevada resistência mecânica inicial, revelou perda crítica de área a partir dos 40 anos, principalmente sob ações combinadas (ondas e precipitação intensa) nos cenários RCP 4.5 e 8.5. A sua resistência não compensa a suscetibilidade à corrosão, tornando indispensável o uso de proteções anticorrosivas, revestimentos técnicos ou redundância estrutural. Sem estas precauções, o seu uso deve limitar-se a estruturas com manutenção assegurada e horizontes temporais controlados.

O **aço tipo (e)**, habitualmente utilizado em estacas-prancha, muros de contenção e cais, demonstrou boa performance estrutural inicial, mas com falência estrutural a partir dos 40 anos em cenários agressivos, e até 60 anos em contextos moderados. A zona de variação do nível da água e os impactos diretos agravam o processo de corrosão. A sua aplicação requer manutenção rigorosa e proteção complementar, não sendo recomendada para estruturas com vida útil superior a 50 anos sem essas garantias.

Por fim, o **aço tipo (f)** apresentou um comportamento crítico, com colapso da secção resistente aos 20 anos no cenário RCP 8.5. A geometria tubular, embora eficiente do ponto de vista estrutural, dificulta a inspeção e promove corrosão localizada severa. A sua utilização requer proteção anticorrosiva obrigatória e inspeções frequentes, sobretudo em estruturas sujeitas a impacto direto de ondas, abrasão ou salinidade intensa, devendo ser usada com precaução.

Em síntese, os resultados obtidos reforçam que, à exceção do aço inoxidável (b), nenhum dos tipos analisados assegura, por si só, um desempenho adequado a longo prazo sob condições climáticas adversas. A integração de cenários climáticos nos critérios de seleção de materiais, associada a estratégias de proteção e manutenção, é fundamental para garantir a resiliência e durabilidade das infraestruturas portuárias.

5.4. Melhoria da Resiliência do porto de Leixões às Alterações Climáticas

A resiliência do Porto de Leixões face às alterações climáticas e marítimas depende da sua capacidade de resistir, adaptar-se e recuperar perante condições ambientais progressivamente mais adversas. Esta resiliência não se limita às propriedades dos materiais, mas resulta de uma

abordagem integrada que combina projeto robusto, seleção criteriosa de soluções construtivas e sistemas eficazes de monitorização.

Fenómenos como a subida do nível médio do mar, o aumento da frequência de tempestades severas, a intensificação da salinidade atmosférica e as variações térmicas extremas representam desafios crescentes, sobretudo nos cenários RCP 4.5 e 8.5, com impacto direto na durabilidade e no desempenho estrutural a longo prazo.

Nas estruturas portuárias críticas, como quebra-mares, cais acostáveis, moles, plataformas logísticas, rampas RO-RO, pontes móveis e fundações de gruas, o betão armado e o aço estrutural continuam a ser os materiais predominantes. Contudo, a sua durabilidade está condicionada por mecanismos como a carbonatação, o ataque por cloretos e a corrosão generalizada, exigindo modelos de degradação que integrem as variações climáticas previstas nos RCPs.

A análise dos betões considerados revela que os betões 1 a 5, com aditivos pozolânicos, baixa relação água/cimento e matriz densificada, apresentaram os melhores resultados em resistência à penetração de cloretos, mantendo x_{corr} inferiores a x_{crit} durante períodos alargados, especialmente em RCP 2.6 e parcialmente em RCP 4.5. São ideais para zonas críticas, como lajes de cais ou blocos de ancoragem.

Por contraste, os betões 6 a 8, que incluem o betão de enchimento, armado durável e projetado, revelaram desempenhos inferiores ao esperado, com coeficientes de difusão mais elevados, resultando numa ultrapassagem prematura de x_{crit} nos cenários RCP mais exigentes. A sua aplicação requer ajustamentos na formulação ou no recobrimento.

No que respeita aos aços, os tipos (a), (c) e (d) demonstraram vulnerabilidade significativa à corrosão, com perdas de área crítica após 40 anos em cenários agressivos. Os aços (b) (inoxidável) e (f) (defensas metálicas) mantiveram desempenho estrutural elevado até aos 100 anos, mesmo sob RCP 8.5, confirmando a sua adequação para contextos exigentes.

A monitorização contínua é hoje um pilar essencial da gestão da resiliência portuária. A aplicação de sistemas de *Structural Health Monitoring* (SHM) permite acompanhar, em tempo real, a evolução dos mecanismos de degradação, reduzindo incertezas na previsão da vida útil.

Tecnologias como sensores de cloretos e humidade, potenciais eletroquímicos, ensaios ultrassónicos, inspeções por radar interferométrico (InSAR), drones, ROVs e LiDAR têm sido amplamente aplicadas em portos europeus, permitindo uma avaliação precisa do estado de conservação e a antecipação de falhas estruturais.

De acordo com o projeto europeu SARIL, a monitorização deve ser integrada desde a fase de conceção, e não encarada como elemento acessório. A articulação entre dados reais e modelos preditivos possibilita a adoção de estratégias de manutenção baseadas no risco.

Assim, a resiliência estrutural deve assentar em quatro pilares fundamentais:

- Seleção de materiais com base no desempenho face aos RCPs (betões 1 a 8 e aços de (a) a (f));
- Proteção anticorrosiva adequada, ajustada à função e exposição (espessura de recobrimento, galvanização, barreiras físicas);
- Monitorização ativa e contínua, com sensores inteligentes e inspeções digitais;
- Modelação fiável da degradação, considerando projeções climáticas, fatores ambientais e dados experimentais.

Esta abordagem integrada é essencial para assegurar que as infraestruturas portuárias e marítimas, cada vez mais expostas a agressões ambientais e incertezas climáticas, mantêm a sua funcionalidade, segurança e longevidade num cenário em constante transformação.

A monitorização, neste contexto, deixa de ser um mero instrumento técnico para assumir-se como fundamento operativo da resiliência portuária sustentável e adaptativa.

Capítulo VI

Considerações Finais

[página propositadamente em branco]

6. Considerações Finais

Este capítulo dedica-se à análise crítica dos principais resultados alcançados, destacando a sua relevância prática para o setor das infraestruturas portuárias e marítimas, bem como às limitações identificadas e às perspectivas para futuras investigações. O objetivo central desta investigação consistiu na quantificação dos impactos das alterações climáticas através da aplicação dos cenários RCP sobre a resiliência dos materiais estruturais mais comuns em obras portuárias, nomeadamente o betão armado e o aço estrutural, com a devida transposição para o desempenho global da infraestrutura portuária, dado que estes materiais constituem a base da maioria das estruturas marítimas.

A investigação assentou num extenso conjunto de simulações, que integraram variáveis ambientais, propriedades específicas dos materiais e mecanismos de degradação, apoiando-se em dados experimentais e normativos. Os resultados evidenciaram que a exposição prolongada a ambientes marinhos agressivos, agravada pelas projeções climáticas dos cenários RCP 4.5 e 8.5, exerce um impacto significativo na penetração de cloretos em estruturas de betão e na corrosão de elementos metálicos. Verificou-se, em particular, que os betões de elevada compacidade e com incorporação de adições pozolânicas (tipos 1 a 5) apresentaram um desempenho superior na resistência à penetração de agentes agressivos, conseguindo, quando aplicados com recobrimentos adequados, proteger eficazmente as armaduras durante períodos superiores a 75 anos, mesmo nos cenários climáticos mais exigentes.

Em contraste, alguns betões com formulações inovadoras (tipos 6 a 8), nomeadamente geopoliméricos e projetados, evidenciaram resultados inferiores às expectativas, devido aos coeficientes de difusão mais elevados considerados na modelação. Este resultado sublinha a necessidade de validar criticamente as soluções tecnológicas emergentes antes da sua aplicação

em estruturas críticas, sob o risco de comprometer a durabilidade e a segurança estrutural previstas.

Relativamente ao desempenho estrutural dos diferentes tipos de aço, a análise permitiu uma clara distinção entre materiais com baixa resistência à corrosão, como o aço carbono estrutural (tipo a) e o aço galvanizado (tipo c), e materiais de elevada durabilidade, como o aço inoxidável AISI 316 (tipo b) e o aço utilizado em defensas metálicas (tipo f), os quais mantiveram a sua integridade estrutural ao longo de todo o período de análise.

Outro contributo inovador deste trabalho reside na introdução da monitorização como pilar central da estratégia de resiliência portuária. Inspirado nos princípios do projeto europeu SARIL, demonstrou-se que a integração de sistemas de *Structural Health Monitoring* (SHM) no ciclo de vida das infraestruturas permite não só acompanhar, em tempo real, o estado de conservação dos ativos, mas também fundamentar decisões de manutenção mais eficientes. A monitorização, aliada a modelos preditivos baseados em risco, assume-se assim como uma ferramenta indispensável face à incerteza crescente associada às alterações climáticas.

Conclui-se que a combinação entre aço inoxidável (b) e betão UHPC (2) representa a solução estrutural mais resiliente face às alterações climáticas e à agressividade marinha, assegurando maior vida útil, menor necessidade de manutenção e uma resposta estrutural consistente aos efeitos cumulativos da corrosão e da degradação ambiental.

Em síntese, os principais contributos desta dissertação foram os seguintes:

- A aplicação de cenários climáticos RCP na modelação da degradação de materiais estruturais portuários;
- A identificação e diferenciação de betões e aços mais e menos adequados à exposição marinha, com base em simulações quantitativas de desempenho ao longo de 100 anos;
- A valorização da monitorização estrutural contínua como estratégia fundamental para reforçar a resiliência e apoiar a gestão adaptativa das infraestruturas.

Não obstante os contributos alcançados, reconhecem-se algumas limitações relevantes. A modelação baseou-se em coeficientes de difusão e taxas de corrosão extraídos da literatura e dos documentos normativos, o que introduz uma margem de incerteza face às condições reais em campo. A inexistência de dados experimentais locais limita a calibração e validação dos modelos, pelo que se recomenda, em investigações futuras, a integração de medições obtidas em infraestruturas portuárias portuguesas.

Com base nos resultados obtidos, propõem-se as seguintes linhas orientadoras para investigações futuras:

- A implementação de campanhas de monitorização e em infraestruturas portuárias com diferentes tipologias de materiais (para além dos materiais já analisados);
- O desenvolvimento de modelos digitais das estruturas portuárias integrando dados em tempo real provenientes de sensores, promovendo a resiliência face as alterações climáticas;
- A avaliação integrada do desempenho técnico e do custo global ao longo do ciclo de vida das soluções construtivas, de modo a sustentar decisões fundamentadas em critérios de sustentabilidade económica e operacional.

Em jeito conclusivo, este trabalho contribuiu para consolidar uma metodologia de avaliação da resiliência estrutural baseada na integração de dados, cenários climáticos e ferramentas normativas, propondo-se como um guião aplicável a diferentes contextos portuários. A replicação e aprofundamento desta abordagem poderão apoiar as administrações portuárias e entidades gestoras na adoção de decisões mais robustas, seguras e informadas, assegurando a segurança e a funcionalidade das infraestruturas marítimas perante os desafios emergentes das alterações climáticas.

[página propositadamente em branco]

Capítulo VII

Referências Bibliográficas

[página propositadamente em branco]

7. Referências Bibliográficas

Abdulla, A., Barros, V.R., Calvo, E., Field, C B., ... Kissel, E. (2014). TS Prepared under the leadership of the Working Group II Bureau: Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the IPCC.

Afonso, M.J., Chaminé, H.I., Gomes, A., Teixeira, J., Araújo, M.A., Fonseca, P.E., Carvalho, J.M., Marques, J.M., Marques da Silva, M.A., Rocha, F. (2004). Cartografia geológica e geomorfológica estrutural da área metropolitana do Porto: implicações na gestão dos recursos hídricos subterrâneos. *Xeográfica: revista de xeografia, territorio e medio ambiente*, Santiago de Compostela, 4: 101-115.

Afonso, M.J., Freitas, L., Chaminé, H.I. (2019). Groundwater recharge in urban areas (Porto, NW Portugal): the role of GIS hydrogeology mapping. *Sustainable Water Resources Management* (5):203-216. <https://doi.org/10.1007/s40899-019-00302-9>

Afonso, M.J., Freitas, L., Marques, J.M., Carreira, P.M., Pereira, A.J., Rocha, F., Chaminé, H.I. (2020). Urban Groundwater Processes and Anthropogenic Interactions (Porto Region, NW Portugal). *Water*, 12:2797. <https://doi.org/10.3390/w12102797>

Araújo, M.A., Gomes, A.A., Chaminé, H.I., Fonseca, P.E., Gama Pereira, L.C., Pinto de Jesus, A. (2003). Geomorfologia e geologia regional do sector de Porto–Espinho (W de Portugal): implicações morfoestruturais na cobertura sedimentar cenozóica. *Cadernos Laboratório Xeolóxico de Laxe, A Coruña*, 28: 79-105.

Argonvia. (2009). Prolongamento do quebra-mar exterior e das acessibilidades marítimas, projeto de execução das acessibilidades marítimas ao porto de Leixões, relatório do reconhecimento geotécnico. (relatório confidencial).

Argonvia. (2019). Prolongamento do quebramar exterior e das acessibilidades marítimas, projeto de execução das acessibilidades marítimas ao porto de Leixões, relatório do reconhecimento geotécnico. (relatório confidencial).

Asariotis, R. (2023). Climate change adaptation and resilience-building for seaports: Key challenges and gaps from a global perspective. 6th Workshop, Glasgow-Sharm el-Sheikh WP on the Global Goal on Adaptation. <https://www.shipmap.org/>

Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil (ANEPC). (2014). Avaliação nacional de risco. <https://prociv.gov.pt/pt/prevencao-e-preparacao/avaliacao-de-riscos/avaliacao-nacional-de-risco/>

Becker, A., Ng, A.K.Y., McEvoy, D., Mullett, J. (2018). Implications of climate change for shipping: Ports and supply chains. *WIREs Climate Change*, 9 (2): e508. <https://doi.org/10.1002/wcc.508>

Bertrand, S., Williams, B. (2022). Climate Change Mitigation and Adaptation at U.S. Ports.: <https://www.eesi.org/papers/view/issue-brief-climate-change-mitigation-and-adaptation-at-u.s-ports-2022>

Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., ... Ha, M. (2023). IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Sixth Assessment Report of the IPCC [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>

Castro, J.M. (2018). Tendências de evolução dos transportes marítimos internacionais e implicações nas infraestruturas portuárias. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (dissertação de mestrado). URI: <https://hdl.handle.net/10216/113509>

Lopes, H., Brògueira-Dias, E. (2021). The port of Leixões (Portugal): over 120 years of knowledge. *Geotechnical Research*, 8 (2): 42–53. <https://doi.org/10.1680/jgere.18.00015>

Pacheco, C.C.C. (2013). Geologia da área do Porto de Leixões, com base em dados geofísicos, sondagens e levantamentos de campo. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (dissertação de mestrado). URI: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/77541>

Chaminé, H.I., Gama Pereira, L.C., Fonseca, P.E., Noronha, F., Lemos de Sousa, M.J. (2003). Tectonoestratigrafia da faixa de cisalhamento de Porto-Albergaria-a-Velha-Coimbra-Tomar, entre as Zonas Centro-Ibérica e de Ossa-Morena (Maciço Ibérico, W de Portugal). *Cadernos Laboratório Xeolóxico de Laxe, A Coruña*, 28: 37-78.

Consulmar (2019). Concurso limitado por prévia qualificação modelo complexo (cfr. Artigo 181º do ccp) empreitada do prolongamento do quebra-mar exterior e das acessibilidades marítimas do porto de Leixões peças do procedimento volume 5-projeto de execução das acessibilidades marítimas tomo i-peças escritas. www.consulmar.pt

de Vera, G., Antón, C., & Climent, M. A. (2024). Effect of exposure conditions on the chloride concentration profiles in a marine concrete structure, studied by means of the kernel density estimation technique and a Gaussian–Lorentzian model. *Construction and Building Materials*, 413. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134833>

Dias, L.F., Soares, P.M.M., Carvalho, S.C.P., Parente, J., Santos, F.M., Rodrigues, M., Lemos, G., Costa, P.R., Cardoso, R.M., Antunes, C., Bento, V.A., Russo, A., Nunes, S., DaCamara, C.C., Lima, D.C.A., Santos, F.D. (2024). National Roadmap for Adaptation 2100: Portuguese Territorial Climate Change Vulnerability Assessment for XXI Century – Report WP1: Stakeholder Engagement. APA. <https://doi.org/10.5281/zenodo.13915110>

Fernández-Pérez, A., Losada, I.J., Y Lara, J.L. (2024). A framework for climate change adaptation of port infrastructures. *Coastal Engineering*, 191: 104538. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2024.104538>

Herrero, M.G., Ametller, J. (2019). Recommendations for the design and construction of Berthing and Mooring Structures. In: [https://widispe.puertos.es/rom/storage/public/docROM/ROM%202_0-11%20\(EN\).pdf](https://widispe.puertos.es/rom/storage/public/docROM/ROM%202_0-11%20(EN).pdf)

IPCC (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the IPCC [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf

IPCC (2023). Technical Summary. In *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability* (pp. 37–118). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.002>

Luís, F., Dias, S., Carvalho, F., Santos, J., Parente, M., Rodrigues, G., Lemos, P., Costa, R., Cardoso, C., Antunes, V., Bento, A., Russo, S., Nunes, C., Da Camara, D., Lima, F. D., Santos, P., Matos, S., Dias, L. F., Soares, P. M. M., ... Santos, D. C. A. &. (2024). National Roadmap for Adaptation 2100: Portuguese Territorial Climate Change Vulnerability Assessment for XXI Century – Report WP4: Sectoral Impacts Modelling – Hydrological Balance & Agroforestry (Portugal Mainland). <https://doi.org/10.5281/zenodo.13919119>

Matos Soares, P., Ferreira, J., Miranda, P., Deus, R., Tomé, R., & Cabrinha, V. (2024). National Roadmap for Adaptation 2100 Portuguese Territorial Climate Change Vulnerability Assessment for XXI Century REPORT WP2E-Climate Projections, Extremes, And Indices Portugal Autonomous Regions Final Version National Roadmap for Adaptation 2100 Portuguese Territorial Climate.

Members of Working Group 178 (2020). Climate change adaptation planning for ports and inland waterways. PIANC Secrétariat Général. <https://www.pianc.org/publication/climate-change-adaptation-planning-for-ports-and-inland-waterways-2/>

Monteiro, F.G. (2010). Modelação da evolução da carbonatação em elementos de betão armado. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa. (dissertação de mestrado).

Mourão, V., Bosnic, S., Costa, I., Santos, P. R., Carvalho, F. M., Santos, S. C. P., Cardoso, L. C., Costa, R. M., Rodrigues, T. C., Nunes, M., Santos, J. P. (2024). National Roadmap for Adaptation 2100: Portuguese Territorial Climate Change Vulnerability Assessment for the XXI Century. <https://doi.org/10.5281/zenodo.13920018>

Nemus (2018). Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo, S.A. - Estudo de Impacte Ambiental do prolongamento do quebra-mar exterior do porto. APDL. <https://www.eib.org/attachments/registers/157173972.pdf>

Number, D. D., Maria Pina Limongelli, A., Karagiannakis, G., Jose Vallhonrat Blanco, P., Ortega Hita, R., Durán Piñeiro, G., Kempski, J., Waldmann, M., Hansen, L., Ndoc Son, D., Maia, A., & Lickert, B. (2024). Sustainability and Resilience for Infrastructure and Logistics Networks. [https://saril-project.eu // https://cordis.europa.eu/project/id/101103978/reportin](https://saril-project.eu//https://cordis.europa.eu/project/id/101103978/reportin)

Paterlini, L., Brenna, A., Ceriani, F., Gamba, M., Ormellese, M., & Bolzoni, F. (2024). Atmospheric Corrosion of Different Steel Types in Urban and Marine Exposure. *Materials*, 17(24). <https://doi.org/10.3390/ma17246211>

Pathak, M. et al. (2022). Mitigation of Climate Change Climate Change 2022 Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/>

Peixoto, R.L. (2014). Conservação e monitorização de estruturas portuárias. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto. (dissertação de mestrado).

Pinto, A.C. (1737). Historia da prodigiosa imagem de Christo Crucificado, Que com o titulo de Bom Jesus de Bouças se venera no lugar de Matosinhos na Luzitania, Em que se referem notaveis Antiguidades deste Reyno. Na Officina de Antonio Isidoro da Fonseca Impressor do Duque Estribeiro Mòr, Lisboa Ocidental

Pinto, F.T. (2024). Ciclo de construção, do projeto à obra. Sebentas d’Obra, SbO #33, Prolongamento do Quebra-Mar Exterior do Porto de Leixões Matosinhos.

Porto de Leixões (2013). Anos de construção das principais obras nos portos do Douro e de Leixões.

Qin, D., Plattner, G., Alexander, L., Allen, S.,... Tangang, F. (2013). Climate Change 2013 – The Physical Science Basis Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, pp. 31 – 116. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.005>

Ribeiro, A., Munhá, J., Dias, R., Mateus, A., Pereira, E., Ribeiro, L., Fonseca, P.E., Araújo, A., Oliveira, J.T., Romão, J., Chaminé, H.I., Coke, C., Pedro, J. (2007). Geodynamic evolution of the SW Europe Variscides. *Tectonics*, 26, TC6009, 24 pp. [doi: 10.1029/2006TC002058]

Rodrigues, C.S. (2015). Aplicação da metodologia pronic a obras portuárias. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto. (dissertação de mestrado).

Seixas, A., Cristina, A., Ana, A., Rizzone, S., Dionísio, S., Figueiredo, C., Caetano, G., Calado, L., Henriques, P., Pereira, A. (2023). Technical sheet Report: WP8D-Guidelines and good practices for mainstreaming climate change adaptation into Municipal Master Plans. <https://edo.jrc.ec.europa.eu/>

Van Dorland, R., Beersma, J., Bessembinder, J., Bloemendaal, N., ... Van Der Wiel, K. (2024). KNMI National Climate Scenarios 2023 for the Netherlands. In 2023 | Scientific report (Issue 2).

Sítios da internet (consultados de março a junho de 2025)

APAMBIENTE – Plano Nacional de Energia e Clima (PNEC). In <https://apambiente.pt/clima/plano-nacional-de-energia-e-clima-pnec>

APDL – Administração do Porto de Douro, Leixões e Viana do Castelo - Porto de Leixões > O Porto > História. In: <https://leixoes.apdl.pt/o-porto/a-historia/>

APEB (2022). Guia do betão. APEB. In: <https://www.apeb.pt/Docs/GuiadoBetao2022.PDF>

Button, A. M., Orrey, E., Freakes, C., Persson, E., Rising, R., Laberrenne, R., & Baldwin, R. (2022). Port Resilience Framework for Action: <https://www.arup.com/insights/port-resilience-framework-for-action/>

Cadario, 2024. Global Center on Adaptation – Climate adaptation in ports: a global imperative for resilience. In <https://gca.org/climate-adaptation-in-ports-a-global-imperative-for-resilience/>

Decreto-Lei 90/2021 e normas associadas: NP EN 206 e NP EN 13670: Betão. In: <https://www.ordemdosengenheiros.pt/fotos/editor2/regioes/regiaoacentro/sextoestecnicas/decretolei902021enormasassociadas.pdf>

Deltares - Climate-resilient ports and waterways. In <https://www.deltares.nl/en/expertise/areas-of-expertise/future-proof-infrastructure/ports-and-waterways/climate-resilient-ports-and-waterways>

Dias, 2025. Leixões: O porto que tem tudo e que não cresce porque não deixam. In <https://www.transportesenegocios.pt/leixoes-o-porto-que-tem-tudo-e-que-nao-cresce-porque-nao-deixam/>

Fisk, 2022. BMT – Building practical resilience in ports and harbours. In <https://www.bmt.org/insights/building-practical-resilience-in-ports-and-harbours/>

IDB Invest & IDOM (2021). A practical guide on strengthening resilience, climate risk, and ports. In: <https://idbinvest.org/en/publications/climate-risk-and-ports-practical-guide-strengthening-resilience>

IPCC – The IPCC is the United Nations body for assessing the science related to climate change. In <https://www.ipcc.ch>

PIANC – The World Association for Waterborne Transport Infrastructure. In <https://www.pianc.org>

PIANC (2024). Climate Resilience Guide for Ports. In: <https://pianc.org.au/wp-content/uploads/2024/06/toR-MarCom-WG-259-Climate-Resilience-Guide-for-Ports.pdf>

RNA 2100 – Roteiro Nacional para a Adaptação 2100 – Avaliação da vulnerabilidade do território português às alterações climáticas no século XXI (RNA 2100). In <https://rna2100.apambiente.pt/pagina/programa-ambiente-alteracoes-climaticas-e-economia-de-baixo-carbono>

ROM – Recomendaciones para Obras Marítimas. In <https://www.puertos.es/servicios/publicaciones/recomendaciones-para-obras-maritimas>

SARIL – Sustainability and Resilience for Infrastructure and Logistics networks. in <https://saril-project.eu/>

Shibata Fender Team AG (2021). Manual IOM. In: <https://www.shibata-fender.team/files/content/Downloads/SFT-IOM-A4-Portuguese.pdf>

Shibata Fender Team AG. (2019). Manual para projeto de defesa. In: <https://www.shibata-fender.team/files/content/Downloads/SFT-Design-Manual-A4-Portuguese-2019.pdf>

ShibataFenderTeam – ShibataFenderTeam offers customized fender solutions for high quality Rubber fenders. In <https://www.shibata-fender.team/en/>

Specials Deltares – Navigating towards climate resilient ports. In <https://specials.deltares.nl/impact-report-2023/navigating-towards-climate-resilient-ports>

UFC Unified – Facilities Criteria. in <https://www.wbdg.org/dod/ufc>

WPSP – Port of Açú – Climate Resilience. In <https://sustainableworldports.org/project/port-of-acu-climate-resilience/>

WSC – The Top 50 Container Ports - These are the biggest container ports in the world, the hubs that keep global trade moving. In <https://www.worldshipping.org/top-50-ports?rq=top%20%20>

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Eu, **Rafael Filipe Nunes Rodrigues**, Nº CC 15228020

Declaro ter conduzido e desenvolvido este trabalho académico com integridade e ética. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à elaboração da dissertação/projeto/estágio.

Declaro ainda que **pontualmente recorri a** ferramentas de inteligência artificial (IA) — texto, imagem, vídeo ou outro formato — apenas para fins académicos de pesquisa avançada de tópico específico e ainda fiz devida citação deste recurso sem colocar em causa os direitos de autor ou uso indevido de informações ou falsificação de conteúdos.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.

ISEP, Porto, 1 de agosto de 2025

Rafael Filipe Nunes Rodrigues