



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

CONTRIBUTOS PARA O AVANÇO DA INVESTIGAÇÃO EM HIDRÁULICA DE ESTRUTURAS NO LNEC

Maria Teresa Fontelas Santos Viseu

Lisboa • dezembro de 2018

Programa de Investigação e de Pós-Graduação para obtenção do título de Habilitação
para o Exercício de Funções de Coordenação Científica

I&D
PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO
HIDRÁULICA E AMBIENTE



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

CONTRIBUTOS PARA O AVANÇO DA INVESTIGAÇÃO EM HIDRÁULICA DE ESTRUTURAS NO LNEC

Maria Teresa Fontelas Santos Viseu

Lisboa • dezembro de 2018

Programa de Investigação e de Pós-Graduação para obtenção do título de Habilitação
para o Exercício de Funções de Coordenação Científica

I&D
PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO
HIDRÁULICA E AMBIENTE

CONTRIBUTOS PARA O AVANÇO DA INVESTIGAÇÃO EM HIDRÁULICA DE ESTRUTURAS NO LNEC

Resumo

O presente Programa de Investigação identifica quatro áreas que necessitam de investimento em investigação no Núcleo de Recursos Hídricos e Estruturas Hidráulicas (NRE) do Departamento de Hidráulica e Ambiente do LNEC.

A primeira área centra-se nas barragens e nas alterações climáticas, envolvendo as áreas da modelação hidrológica de cheias e da otimização da exploração de albufeiras em condições de escassez hídrica.

A segunda área trata da modelação avançada do escoamento em descarregadores de cheias envolvendo não só a modelação numérica por recurso a esquemas *Computational Fluid Dynamics* como também a modelação experimental de novas soleiras para aumento da capacidade de vazão neste tipo de estruturas hidráulicas.

A terceira área centra-se na modelação experimental avançada de processos erosivos em hidráulica de estruturas com enfoque na rotura de aterros (barragens e diques) e da erosão junto a pilares de pontes.

Finalmente, a quarta área envolve a gestão do risco em barragens centrando-se nos aspetos da identificação de deteriorações e estimativa da probabilidade de rotura em estruturas hidráulicas, da medição de grandezas em protótipo e do planeamento de emergência.

Apresenta-se neste Programa de Investigação uma descrição do estado da arte nestas temáticas da hidráulica de estruturas e perspetivam-se diversas linhas de investigação. Visa-se, para além do aumento do conhecimento, o desenvolvimento de ferramentas de modelação numérica em estruturas hidráulicas bem como o domínio de novas técnicas de medição e de visualização do escoamento com aplicação na modelação física, área tradicional de atuação do NRE.

Associadas a estas quatro áreas, apresentam-se quatro Programas de Estudos baseados em oito projetos de investigação distintos que procuram dar resposta aos problemas identificados, propondo-se metodologias, estimando-se os recursos necessários bem como definindo-se os objetivos a atingir e os benefícios esperados da sua realização.

Finalmente descrevem-se as oportunidades de formação pós-graduada associadas ao presente Programa de Investigação onde são concretizadas as linhas de investigação propostas, sob a forma de planos de enquadramento de trabalhos visando os graus de mestrado e de doutoramento. Neste âmbito são propostas cinco teses de doutoramento e cinco dissertações de mestrado.

Palavras-chave: Alterações Climáticas / Descarregador de cheias / CFD / Erosão / Risco em barragens

CONTRIBUTION TO THE ADVANCEMENT OF RHE RESEARCH ON HYDRAULIC STRUCTURES IN LNEC

Abstract

This Research Program aims to contribute to the establishment of a strategy for scientific development in the context of dams and appurtenant hydraulic structures. It features four areas of investigation.

The first area focuses on dams and Climate Change, involving the hydrological modelling of floods and the optimizing of reservoirs operation in water-scarce conditions.

The second area deals with the advanced modelling of flow in spillways, based on numerical modelling using Computational Fluid Dynamics schemes as well as on physical modelling of new solutions for flood discharge increment.

The third area focuses on experimental advanced modeling of erosion processes in hydraulic structures with focus on the failure of embankments dams and levees as well as on scour at bridge piers.

Finally, the fourth area involves risk management in dams focused on the aspects of damage identification and estimation of the failure likelihood in hydraulic structures, measurement of flow variables (namely pressures and velocities) in prototype as well as in dam emergency planning.

Associated with these areas, a set of four Programs of Studies is presented, based on eight distinct research projects that seek to respond to the identified problems by proposing methodologies and identifying resources and goals to be achieved as well as the expected benefits within the accomplishment of those programs.

Finally, a Post Graduating Program is presented with the training opportunities associated with this Research Program and particularly envisaging the development of five PhD and five Master of Science thesis.

Keywords: Climate Change / Spillway / CFD / Scour / Dam Risk

Índice

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Considerações iniciais	3
1.2	Razões para a escolha do tema	4
1.3	Enquadramento do tema no LNEC.....	7
1.3.1	Áreas de investigação do NRE.....	7
1.3.2	Lacunas de investigação	8
1.3.3	O Programa de Investigação e Inovação (P2I) 2013-2020	10
1.3.3.1	Enquadramento	10
1.3.3.2	Alterações climáticas e riscos associados	11
1.3.3.3	Risco em estruturas e infraestruturas hidráulicas	11
1.3.3.4	Obras hidráulicas associadas a barragens e vias de comunicação	12
1.4	Identificação de prioridades de investigação.....	13
1.4.1	Prioridades de investigação e interligação com o P2I do LNEC	13
1.4.2	Prioridades de investigação e interligação com os Programas de Estudos propostos	15
1.5	Estrutura do Programa de Investigação	18
2	BARRAGENS E ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS	19
2.1	Considerações iniciais	19
2.2	Enquadramento e principais conclusões de projetos no domínio das AC	21
2.2.1	Clima e projeções climáticas no século XXI.....	21
2.2.1.1	Previsões globais dos GCM	21
2.2.1.2	Projeções climáticas para Portugal	25
2.2.2	Importantes projetos a nível europeu neste domínio	29
2.3	Estado da arte nas alterações climáticas em barragens.....	33
2.3.1	Impactos das alterações climáticas nas barragens.....	33
2.3.2	Cheias e dimensionamento de obras hidráulicas.....	35
2.3.2.1	Alterações observadas e projeções	35
2.3.2.2	Modelos e métodos para estimar os riscos de cheias englobando as alterações climáticas	38
2.3.3	Secas e exploração de barragens	42
2.3.3.1	Alterações observadas e projeções	42
2.3.3.2	Modelos e métodos para adaptação a secas em cenários de alterações climáticas	47
2.4	Oportunidades de investigação	50
2.4.1	Considerações iniciais	50
2.4.2	Cheias e segurança de barragens	51
2.4.3	Secas e exploração de barragens em condições de escassez	53
3	ESTRUTURAS HIDRÁULICAS ASSOCIADAS A BARRAGENS E VIAS DE COMUNICAÇÃO	55
3.1	Introdução	55
3.2	Abordagens para a modelação do escoamento e dos processos erosivos em estruturas hidráulicas.....	55
3.2.1	Modelação de escoamentos em descarregadores de cheias em canal	55
3.2.1.1	Considerações gerais.....	55
3.2.1.2	Modelação CFD.....	57
3.2.1.3	Modelação física e experimental.....	60

3.2.2	Caracterização do escoamento e dos mecanismos de erosão junto a pilares de pontes	63
3.2.2.1	Considerações iniciais	63
3.2.2.2	Mecanismo do escoamento e do desenvolvimento da erosão	64
3.2.3	Medição de grandezas hidráulicas	67
3.2.3.1	Considerações iniciais	67
3.2.3.2	Medições de alturas de água e de pressões.....	67
3.2.3.3	Medições de velocidades	68
3.2.3.4	Medições de concentrações de ar.....	71
3.2.3.5	Medições de caudais.....	72
3.2.3.6	Medições da erosão	74
3.3	Estado da arte na modelação do escoamento em estruturas hidráulicas.....	76
3.3.1	Modelação numérica do escoamento em descarregadores.....	76
3.3.2	Modelação dos processos de erosão junto a pilares de pontes.....	81
3.3.3	Principais projetos no LNEC neste domínio	84
3.4	Oportunidades de investigação	86
3.4.1	Modelação híbrida	86
3.4.2	Escoamento em descarregadores de cheias	87
3.4.3	Erosão em pilares de pontes	89
3.4.4	Técnicas de medição de grandezas hidráulicas.....	92
4	GESTÃO DO RISCO EM BARRAGENS	95
4.1	Considerações iniciais	95
4.2	Estado da arte na modelação da rotura de barragens e diques e principais projetos neste domínio	98
4.2.1	Considerações iniciais	98
4.2.2	Modelação experimental da rotura de aterros	99
4.2.3	Modelação numérica da rotura de aterros.....	101
4.2.4	Principais projetos no LNEC neste domínio	105
4.3	Abordagens de mitigação do risco em barragens	107
4.3.1	Medidas de controle ou de prevenção estruturais: soleiras PKW	107
4.3.2	Medidas de deteção ou de prevenção não-estruturais: caracterizações <i>in situ</i> do escoamento em bacias de dissipação por impacto.....	113
4.3.3	Medidas de mitigação ou de preparação: planeamento de emergência.....	117
4.3.3.1	Enquadramento geral	117
4.3.3.2	Plano de Emergência Interno	120
4.4	Oportunidades de investigação	122
4.4.1	Contribuições para a avaliação do risco em barragens	122
4.4.1.1	Modelação da rotura de aterros	122
4.4.1.2	Avaliação do risco das barragens portuguesas com impacto em Espanha.....	125
4.4.2	Contribuições para a mitigação do risco em barragens	127
4.4.2.1	Novas soluções de projeto: as soleiras PKW.....	127
4.4.2.2	Medições de grandezas em protótipo	129
4.4.2.3	Implementação e informatização de PEI em ambiente WebSig ...	130
5	PROGRAMAS DE ESTUDOS	133
5.1	Introdução	133
5.2	Conceção dos Programas de estudos.....	133
5.3	Estimativa de custos	137
5.4	Programa de Estudo 1 – Barragens e Alterações Climáticas	139

5.4.1	Considerações iniciais	139
5.4.2	Projeto 1.1 – Modelação hidrológica de cheias e dimensionamento de descarregadores de cheias num contexto de AC.....	140
5.4.2.1	Enquadramento e justificação	140
5.4.2.2	Objetivos.....	140
5.4.2.3	Metodologia proposta e planeamento de atividades.....	141
5.4.2.4	Resultados esperados.....	143
5.4.2.5	Recursos necessários	144
5.4.2.6	Potenciais parcerias e financiamento.....	145
5.4.3	Projeto 1.2 – Adaptação às AC através da otimização da exploração de albufeiras	146
5.4.3.1	Enquadramento e justificação	146
5.4.3.2	Objetivos.....	146
5.4.3.3	Metodologia proposta e planeamento das atividades.....	147
5.4.3.4	Resultados esperados.....	149
5.4.3.5	Recursos necessários	150
5.4.3.6	Potenciais parcerias e financiamento.....	151
5.5	Programa de Estudo 2 - Modelação avançada do escoamento em descarregadores de cheias.....	152
5.5.1	Considerações gerais	152
5.5.2	Projeto 2.1 - Modelação CFD do escoamento em descarregadores de cheias.....	153
5.5.2.1	Enquadramento e justificação	153
5.5.2.2	Objetivos.....	154
5.5.2.3	Metodologia proposta e planeamento das atividades.....	154
5.5.2.4	Resultados esperados.....	156
5.5.2.5	Recursos necessários	157
5.5.2.6	Potenciais parcerias e financiamentos.....	158
5.5.3	Projeto 2.2 – Modelação experimental de novas soluções para aumento da vazão em descarregadores de cheias.....	159
5.5.3.1	Enquadramento e justificação	159
5.5.3.2	Objetivos.....	160
5.5.3.3	Metodologia proposta e planeamento das atividades.....	161
5.5.3.4	Resultados esperados.....	162
5.5.3.5	Recursos necessários	163
5.5.3.6	Potenciais parcerias e financiamentos.....	164
5.6	Programa de Estudo 3 – Modelação de processos erosivos em obras hidráulicas....	165
5.6.1	Considerações iniciais	165
5.6.2	Projeto 3.1 – Modelação híbrida da rotura de barragens e diques	166
5.6.2.1	Enquadramento e justificação	166
5.6.2.2	Objetivos.....	167
5.6.2.3	Metodologia proposta e planeamento das atividades.....	168
5.6.2.4	Resultados esperados.....	169
5.6.2.5	Recursos necessários	170
5.6.2.6	Potenciais parcerias e financiamento.....	171
5.6.3	Projeto 3.2 – Modelação híbrida da erosão junto a pilares de pontes	172
5.6.3.1	Enquadramento e justificação	172
5.6.3.2	Objetivos.....	173
5.6.3.3	Metodologia proposta e planeamento das atividades.....	173

	5.6.3.4	Resultados esperados	175
	5.6.3.5	Recursos necessários	176
	5.6.3.6	Potenciais parcerias e financiamento	177
5.7		Programa de Estudo 4 – Gestão do risco em barragens	178
	5.7.1	Considerações iniciais	178
	5.7.2	Projeto 4.1 – Análise e redução do risco em barragens por instrumentos de prevenção	179
	5.7.2.1	Enquadramento e justificação	179
	5.7.2.2	Objetivos	180
	5.7.2.3	Metodologia proposta e planeamento das atividades	181
	5.7.2.4	Resultados esperados	183
	5.7.2.5	Recursos necessários	184
	5.7.2.6	Potenciais parcerias e financiamentos	185
	5.7.3	Projeto 4.2 – Mitigação do risco em barragens por medidas de preparação	186
	5.7.3.1	Enquadramento e justificação	186
	5.7.3.2	Objetivos	187
	5.7.3.3	Metodologia proposta e planeamento das atividades	187
	5.7.3.4	Resultados esperados	190
	5.7.3.5	Recursos necessários	191
	5.7.3.6	Potenciais parcerias e financiamentos	192
6		PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO	195
	6.1	Considerações iniciais	195
	6.2	Doutoramento 1 - Avaliação dos impactos das alterações climáticas no dimensionamento de descarregadores de cheias em Portugal	198
	6.2.1	Justificação	198
	6.2.2	Objetivos	198
	6.2.3	Metodologia e planeamento de atividades	198
	6.2.4	Custos	200
	6.3	Doutoramento 2 – Otimização da exploração de albufeiras em situação de escassez hídrica	201
	6.3.1	Justificação	201
	6.3.2	Objetivos	201
	6.3.3	Metodologia e planeamento das atividades	202
	6.3.4	Custos	203
	6.4	Doutoramento 3 - Modelação híbrida do escoamento em descarregadores de cheias	204
	6.4.1	Justificação	204
	6.4.2	Objetivos	204
	6.4.3	Metodologia e planeamento de atividades	205
	6.4.4	Custos	206
	6.5	Mestrado 1 – Soleiras PKW em descarregadores em degraus	207
	6.5.1	Justificação	207
	6.5.2	Objetivos	207
	6.5.3	Metodologia e planeamento das atividades	208
	6.5.4	Custos	209
	6.6	Doutoramento 4 - Modelação do processo de formação de cheias induzidas por rotura de barragens e diques	210
	6.6.1	Justificação	210
	6.6.2	Objetivos	210

6.6.3	Metodologia e planeamento de atividades	211
6.6.4	Custos	213
6.7	Doutoramento 5 – Previsão da erosão junto a pilares de pontes	214
6.7.1	Justificação	214
6.7.2	Objetivos	214
6.7.3	Metodologia e planeamento de atividades	215
6.7.4	Custos	217
6.8	Mestrado 2 - Novas técnicas para caracterização do escoamento em instalações experimentais e <i>in situ</i>	218
6.8.1	Justificação	218
6.8.2	Objetivos	218
6.8.3	Metodologia e planeamento das atividades	219
6.8.4	Custos	220
6.9	Mestrado 3 – Análise do risco em órgãos de segurança de barragens	221
6.9.1	Justificação	221
6.9.2	Objetivos	221
6.9.3	Metodologia e planeamento das atividades	222
6.9.4	Custos	223
6.10	Mestrado 4 – WebSig e implementação do planeamento de emergência nos vales a jusante de barragens portuguesas	224
6.10.1	Justificação	224
6.10.2	Objetivos	224
6.10.3	Metodologia e planeamento das atividades	225
6.10.4	Custos	226
6.11	Mestrado 5 - Impactos transfronteiriços da rotura de barragens portuguesas em bacias internacionais	227
6.11.1	Justificação	227
6.11.2	Objetivos	227
6.11.3	Metodologia e planeamento das atividades	228
6.11.4	Custos	229
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	231
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	237
8.1	Capítulo 1	237
8.2	Capítulo 2	238
8.3	Capítulo 3	248
8.4	Capítulo 4	260
8.5	Capítulo 5	269
8.6	Capítulo 6	269
8.7	Principais <i>sites</i> consultados	269

Índice de figuras

Figura 1.1 Sistemas hidráulicos objeto de estudo no NRE e domínios de investigação abordados no presente Programa de Investigação.....	4
Figura 1.2 Interligação entre os sistemas hidráulicos objeto de estudo no NRE, as atividades previstas em P2I do LNEC e as prioridades de investigação identificadas no NRE....	15
Figura 1.3 Interligação das atividades previstas em P2I do LNEC com as prioridades de investigação identificadas e com os Programas de Estudos propostos	16
Figura 2.1 Impacto das AC a nível da bacia hidrográfica (adaptado de World Bank, 2010)	20
Figura 2.2 Projeções para a temperatura (ano de 2080) para dois cenários de emissão de GEE: B1 (Esq.) e A2 (Dir.). Os dados plotados são, para cada pixel colorido, a média obtida pelos 16 modelos GCM listados no Quadro 2.2 (Maurer et al., 2007, citado em http://www.climatewizard.org)	24
Figura 2.3 Projeções para a precipitação (ano de 2080) para dois cenários de emissão de GEE: B1 (Esq.) e A2 (Dir.). Os dados plotados são, para cada pixel colorido, a média obtida pelos 16 modelos GCM listados no Quadro 2.2 (Maurer et al., 2007, citado em http://www.climatewizard.org)	24
Figura 2.4 Temperatura máxima de verão em Portugal Continental obtida com o modelo regional de clima HadRm (Fonte: SIAM, 2002): a) simulação de controle com observações entre 1961 e 1990; b) simulação com aumento de emissão de GEE (no período 2080-2100)	25
Figura 2.5 Anomalia da precipitação anual para o cenário A2 e B2 em 2100 obtida com o modelo regional de clima HadRm (Fonte: SIAM, 2002)	26
Figura 2.6 Alteração de variáveis climáticas para Portugal para o cenário RCP 8.5. Temperatura média anual no período 2050-2074 (http://regclim.coas.oregonstate.edu/visualization/gccv/cmip5-global-climate-change-viewer/index.html , consultado em 21 de abril de 2018)	27
Figura 2.7 Alteração de variáveis climáticas para Portugal para o cenário RCP 8.5. Precipitação média anual no período 2050-2074 (http://regclim.coas.oregonstate.edu/visualization/gccv/cmip5-global-climate-change-viewer/index.html , consultado em 21 de abril de 2018)	27
Figura 2.8 Precipitação para Portugal prevista pelo Programa ADAPT no período 2071-2100: a) Projeções para o cenário RCP4.5; b) Evolução anual da precipitação no continente (Fonte: http://portaldoclima.pt/pt/# , consultado a 28 de maio de 2018)	28
Figura 2.9 Relação característica entre a alteração do período de retorno e a correspondente variação na intensidade de cheias e secas (adaptado de Lehner et al., 2006)	34
Figura 2.10 Alteração do período de retorno de 100 anos, baseada na comparação entre o clima atual (1961-1990) e simulações para os anos de 2020 e 2070 (modelos GCM ECHAM4 e HadCM3; valores calculados com modelo WaterGAP).....	36
Figura 2.11 Domínio RCM incorporado em uma grelha GCM. (Fonte da imagem: Giorgi and Gutowski, Regional Downscaling and the Cordex Initiative 2015 , consultado em http://portaldoclima.pt/pt/o-projeto/metodologia/modelos-climaticos/)	40
Figura 2.12 Suscetibilidade à desertificação em Portugal (Pimenta et al., 2017).....	43
Figura 2.13 Alteração do período de retorno de secas de 100 anos, baseada na comparação entre o clima e usos atuais (1961-1990) e simulações para os anos de 2020 e 2070 (modelos GCM ECHAM4 e HadCM3; valores calculados com modelo WaterGAP) ...	44
Figura 2.14 Relação entre as anomalias (desvios em relação à média) de caudais e o índice da NAO em três grandes rios ibéricos (Douro, Tejo e Guadiana). Painéis à esquerda: Anomalias mensais nos caudais durante e depois de invernos com elevado índice da NAO (colunas a negro) e com baixo índice da NAO (colunas a cinzento). Figura adaptada de Trigo (2011)	46
Figura 2.15 Curvas de duração do escoamento para as 10 projeções do projeto BINGO e comparação com dados registados para a bacia do Sorraia (Rodrigues, 2018)	46
Figura 3.1 Barragem de Fagilde: a) galgamento; b) aspeto da barragem após galgamento	56

Figura 3.2 Descarregador de cheias da Barragem de Chertioua. Simulação numérica do escoamento (caudal de projeto 465 m ³ /s): a) t=0 s, b) t=76 s, c) t= 116 s (Mendes e Viseu, 2013)	59
Figura 3.3 Descarregador de cheias da Barragem de Fierza. Aspeto geral do escoamento: a) modelo numérico; b) modelo físico (Melo e Mendes, 2017)	60
Figura 3.4 Modelo físico de um descarregador frontal. Abordagem empírica para definição de formas alternativas no caso dos muros-guia na entrada.....	61
Figura 3.5 Descarregador de cheias da Barragem de Chertioua (Caudal de projeto 465m ³ /s): a) e b) modelo físico; c) modelo numérico (Mendes e Viseu, 2013)	62
Figura 3.6 Acidentes em pilares de pontes: a) Ponte Cale da Vila, Gafanha da Nazaré, 1994; b) Ponte Hintze Ribeiro, Entre-os-Rios, 2001.....	63
Figura 3.7 Estrutura do escoamento na proximidade de um pilar cilíndrico (Breusers and Raudkivi 1991).....	64
Figura 3.8 Evolução temporal de cavidades de erosão com e sem transporte sólido generalizado (Couto e Cardoso, 2001)	67
Figura 3.9 Medição de níveis de água: a) piezómetro de coluna de água; b) sonda resistiva; c) sonda acústica	68
Figura 3.10 Medição de pressões: a) sensores Keller; b) medição no modelo físico da bacia de impacto do descarregador da barragem do Sabor; c) função de densidade espectral das flutuações de pressão.....	68
Figura 3.11 Medição de velocidades: a) com molinete OTT; b) aspeto de uma sonda UVP.....	69
Figura 3.12 Resultado do algoritmo de LSPIV aplicado às imagens adquiridas (pré-tratamento de dados)	70
Figura 3.13 Medição da concentração de ar: a) aparelhagem utilizada para a aquisição digital das concentrações de ar; b) sonda de ar em funcionamento	71
Figura 3.14 Sistema de controlo de caudais para realização de ensaios em regime variável: a) aspeto da válvula motorizada e do debitómetro ; b) aspeto do exterior da unidade digital de interface (Fonte: Viseu, 2006).....	72
Figura 3.15 Posicionamento da instrumentação necessária para a aplicação da estimativa direta do caudal efluente da brecha (fonte: Amaral, 2017)	73
Figura 3.16 Esquema da aplicação da estimativa direta do caudal efluente da brecha (Fonte: Amaral, 2017)	74
Figura 3.17 Levantamento do fundo móvel a jusante de um trampolim: a) técnica tradicional; b) representação RGB da alteração do fundo móvel	75
Figura 3.18 Levantamento tridimensional do fundo móvel a jusante de um trampolim: a) sensor Kinect; b) representação RGB da alteração do fundo móvel (8 horas após o início da descarga)	76
Figura 3.19 Grandes turbilhões formados entre degraus. Equações de RANS associadas ao modelo k-ε. Simulação numérica via CFD (Fonte: Arantes,2007)	78
Figura 3.20 Chaminé de equilíbrio de Salamonde II: a) e b) modelo físico; c) e d) resultados do modelo numérico: magnitude da velocidade e linhas de corrente (Viseu et al., 2015).80	
Figura 3.21 Comparação de resultados de modelos numérico e físico no descarregador de Girabolhos: a) e b) escoamento no início do canal; c) e d) escoamento no trampolim de saída (Granell et al., 2015)	80
Figura 3.22 Aspeto geral do Canal de Inclinação Variável	91
Figura 4.1 Gestão do risco nos vales a jusante de barragens (Viseu, 2016)	95
Figura 4.2 Rotura de aterros: a) galgamento; b) piping	98
Figura 4.3 Soleira descarregadora em teclado de piano: a) instalação experimental; b) representação esquemática	108
Figura 4.4 Principais grandezas de uma soleira descarregadora em teclado de piano: a) vista 3D; b) perfil e planta (adaptado de Pralong et al., 2011)	108
Figura 4.5 Representação esquemática dos quatro tipos de soleiras descarregadoras em teclado de piano (adaptado de Erpicum et al., 2017)	109
Figura 4.6 Barragem de Gloriettes (França). Aspeto da soleira PKW	109

Figura 4.7 Coeficiente de vazão para soleiras descarregadoras do tipo PKW com $W_i/W_o = 1,25$ (Anderson and Tulis, 2013).....	111
Figura 4.8 Curvas de vazão das soleiras descarregadoras em teclado de piano e do tipo WES (Pinto et al., 2018).....	112
Figura 4.9 Instrumentação típica em barragens (Fonte: Viseu, 2006).....	113
Figura 4.10 Sistema de medição de pressões da bacia de impacto do descarregador de cheias do AHFT: a) aspeto geral do sensor de pressão LMK 307; b) localização dos transdutores (identificados com os números 1 a 10).....	114
Figura 4.11 Aspeto geral das caixas Tipo 1 e Tipo 3 para instalação dos sensores de medição de pressão e passagem de cabos.....	115
Figura 4.12 Sequência de instalação dos transdutores de pressão LMK 307 e encaminhamento da cablagem até ao ponto de aquisição de dados (autómato). A e B: colocação do transdutor de pressão na câmara de medição da caixa de proteção; C: encaminhamento da cablagem dos diferentes transdutores pela conduta técnica da cota 72,00 até à caixa nº3; D: junção e encaminhamento de toda a cablagem pela conduta técnica da cota 72,00 até à cota 102,50; E: encaminhamento da cablagem da cota 102,50 até à galeria de visita 4 (GV4); F: ligação da cablagem individualizada aos canais predefinidos no autómato de aquisição de sinal.....	115
Figura 4.13 Calibração dos sensores: a) aspeto da bancada de ensaios; b) exemplo de curva de calibração.....	116
Figura 4.14 Variação das pressões máxima e mínima relativamente à média.....	117
Figura 4.15 Ações a implementar pelo Coordenador do PEI (adaptado de Viseu e Marcelino, 2014).....	121
Figura 4.16 Instalação experimental para estudo da rotura de barragens e diques de aterro (Amaral, 2017).....	124
Figura 4.17 Barragens Portuguesas com impacto internacional e área geográfica do Programa de cooperação transfronteiriça INTERREG V-A 2014-2020.....	126
Figura 4.18 Instalação experimental para estudo de novas soleiras: a) vista de jusante e b) aspeto geral da soleira descarregadora do tipo PKW.....	128
Figura 4.19 Modelo físico da Barragem do AHFT. Vista de jusante para montante.....	130
Figura 4.20 Exemplo de janelas de um PEI em ambiente WEBSIG.....	132
Figura 5.1 Interligação de atividades previstas em P2I do LNEC com os Programas de Estudos e projetos propostos.....	134
Figura 6.1 Interligação do Programa de Pós-Graduação com as atividades em P2I do LNEC e com os Programas de Estudos e projetos propostos.....	196
Figura 7.1 Áreas de investigação que constam do presente Programa de Investigação.....	232

Índice de quadros

Quadro 2.1 Cenários de concentração de GEE (IPCC, 2014)	22
Quadro 2.2 Lista de modelos GCM (Costa-Cabral <i>et al.</i> , 2012)	23
Quadro 2.3 Coeficiente de correção das curvas IDF: a) Barcelona (Rodríguez <i>et al.</i> , 2014); b) Nova Zelândia (National Institute of Water and Atmosphere, 2010)	42
Quadro 4.1 Síntese dos principais modelos numéricos de formação da brecha baseados em métodos físicos	103
Quadro 4.2 Síntese das principais características das soleiras descarregadores em teclado de piano existentes e em projeto (fonte: Gomes, 2017, adaptado de Leite Ribeiro <i>et al.</i> , 2013 e Laugier <i>et al.</i> , 2017)	110
Quadro 4.3 Definição da classe da barragem (RSB, 2018)	119
Quadro 5.1 Principais características dos Programas de Estudos propostos	136
Quadro 5.2 Custos associados à rubrica “pessoal”	138
Quadro 5.3 Cronograma do Projeto 1.1	143
Quadro 5.4 Estimativa dos recursos financeiros associados ao Projeto 1.1	145
Quadro 5.5 Cronograma do Projeto 1.2	149
Quadro 5.6 Estimativa dos recursos financeiros associados ao Projeto 1.2	151
Quadro 5.7 Cronograma do Projeto 2.1	156
Quadro 5.8 Estimativa dos recursos financeiros associados ao Projeto 2.1	158
Quadro 5.9 Cronograma do Projeto 2.2	162
Quadro 5.10 Estimativa dos recursos financeiros associados ao Projeto 2.2	164
Quadro 5.11 Cronograma do Projeto 3.1	169
Quadro 5.12 Estimativa dos recursos financeiros associados ao Projeto 3.1	170
Quadro 5.13 Cronograma do Projeto 3.2	175
Quadro 5.14 Estimativa dos recursos financeiros associados ao Projeto 3.2	176
Quadro 5.15 Cronograma do Projeto 4.1	182
Quadro 5.16 Estimativa dos recursos financeiros associados ao Projeto 4.1	184
Quadro 5.17 Cronograma do Projeto 4.2	189
Quadro 5.18 Estimativa dos recursos financeiros associados ao Projeto 4.2	191
Quadro 6.1 Relação entre os projetos dos Programas de Estudos e o Programa de Pós-Graduação	197
Quadro 6.2 Cronograma do doutoramento 1	200
Quadro 6.3 Estimativa dos custos associados à tese de doutoramento 1	200
Quadro 6.4 Cronograma do doutoramento 2	203
Quadro 6.5 Estimativa dos custos associados ao doutoramento 2	203
Quadro 6.6 Cronograma do doutoramento 3	206
Quadro 6.7 Estimativa dos custos associados ao doutoramento 3	206
Quadro 6.8 Cronograma do mestrado 1	209
Quadro 6.9 Estimativa dos custos associados ao mestrado 1	209
Quadro 6.10 Cronograma do doutoramento 4	212
Quadro 6.11 Estimativa dos custos associados ao doutoramento 4	213
Quadro 6.12 Cronograma do doutoramento 5	216
Quadro 6.13 Estimativa dos custos associados ao doutoramento 5	217
Quadro 6.14 Cronograma do mestrado 2	219
Quadro 6.15 Estimativa dos custos associados ao mestrado 2	220
Quadro 6.16 Cronograma do mestrado 3	223
Quadro 6.17 Estimativa dos custos associados ao mestrado 3	223

Quadro 6.18 Cronograma do mestrado 4	226
Quadro 6.19 Estimativa dos custos associados ao mestrado 4	226
Quadro 6.20 Cronograma do mestrado 5	229
Quadro 6.21 Estimativa dos custos associados ao mestrado 5	229

Siglas

AC	Alterações Climáticas
AdP	Águas de Portugal
ADV	Acoustic Doppler Velocimetry
AHFT	Aproveitamento Hidroelétrico de Foz Tua
ANPC	Autoridade Nacional de Proteção Civil
AOGCM	Atmosphere-Ocean General Circulation Models
APA	Agência Portuguesa do Ambiente
BCC	Betão Compactado com Cilindros
CEDEX	Centro de Estudios Y Experimentación de Obras Públicas de Espanha
CIC	Centro de Instrumentação Científica do LNEC
CIV	Canal de Inclinação Variável
CFD	Computational Fluid Dynamics
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos do Brasil
CORDEX	Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment
DG	Departamento de Geotecnia do LNEC
DHA	Departamento de Hidráulica e Ambiente do LNEC
DOI	Digital Object Identifier
EC	European Commission
EDP	Eletricidade de Portugal
ENAAAC	Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas
DHI	Danish Hydraulic Institute
EDP	Eletricidade de Portugal
EU	European Union
FCT	Fundação para a Ciência e Tecnologia
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FLAD	Fundação Luso-Americana para o Desenvolvimento
GCM	General Circulation Models
GEE	Gases de Efeito de Estufa

GTI	Grupo de Tecnologias da Informação em Água e Ambiente do DHA
IA	Investigador Auxiliar
ICOLD	International Commission on Large Dams
IDF	Curvas Intensidade-Duração-Frequência
IP	Infraestruturas de Portugal
IP	Investigador Principal
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera, I. P.
IST	Instituto Superior Técnico
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LES	Large Eddy Simulation
LSPIV	Large-Scale Particle Image Velocimetry
MAR	Managed Aquifer Recharge
MDT	Modelo Digital de Terreno
NAO	North Atlantic Oscillation
NAS	Núcleo de Águas Subterrâneas do LNEC
NEC	Núcleo de Estuários e Zonas Costeiras do LNEC
NPE	Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas do LNEC
NRE	Núcleo de Recursos Hídricos e Estruturas Hidráulicas do LNEC
OMM	Organização Meteorológica Mundial
ONU	Organização das Nações Unidas
P2I	Programa de Investigação e Inovação do LNEC
PEI	Plano de Emergência Interno
PGRH	Planos de Gestão de Região Hidrográfica
PIP	Programa de Investigação Programada do LNEC
PIV	Particle Image Velocimetry
PKW	Piano Key Weir
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PSDI	Palmer Drought Severity Index
RANS	Reynold-Averaged Navier-Stokes

RCM	Regional Climate Models
RCP	Representative Concentration Pathways
RDI	Reconnaissance Drought Index
RSB	Regulamento de Segurança de Barragens
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SO	Sistema de Observação
SPI	Standardized Precipitation Index
SRES	Special Report on Emissions Scenarios
SSV	Seguro Social Voluntário
UC	Universidade de Coimbra
UCantábria	Universidade de Cantábria
UVP	Ultrasound Doppler Velocity Profiling
URL	Uniform Resource Locator (Localizador Uniforme de Recursos)
VOF	Volume of Fluid
WEB	World Wide Web (WWW)

PARTE A – PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO

1 | INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

O Programa de Investigação que se apresenta na parte A deste documento intitula-se “*Contributos para o avanço da investigação em hidráulica de estruturas no LNEC*” e destina-se, em conjunto com o Programa de Pós-Graduação que se apresenta na parte B, à prestação de provas públicas no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) para obtenção do título de “Habilitada para o exercício de funções de coordenação de investigação científica”, nos termos do disposto no Decreto-Lei nº 124/99, de 20 de Abril, que regula o Estatuto da Carreira de Investigação Científica.

Este Programa de Investigação insere-se na Área Científica de “*Engenharia de Recursos Hídricos e Obras Hidráulicas*” do LNEC e liga-se com o trabalho de investigação desenvolvido no Núcleo de Recursos Hídricos e Estruturas Hidráulicas (NRE) do Departamento de Hidráulica e Ambiente (DHA) do LNEC. Destina-se a dar continuidade à estratégia de desenvolvimento científico existente no NRE, identificando os domínios mais carenciados de investigação em hidráulica de barragens e as necessidades nacionais de investigação neste âmbito.

O tema escolhido centra-se essencialmente em aspetos hidráulicos que se relacionam com as barragens na aceção de barragem mais aproveitamento hidráulico, ou seja, em sintonia com o conceito de barragem que consta do Artigo 3.º do Regulamento de Segurança de Barragens (RSB): "conjunto formado pelo corpo da barragem propriamente dita, sua fundação, zona vizinha a jusante, órgãos de segurança e exploração e albufeira".

Assim, o tema foi selecionado com o objetivo de consolidar a posição do LNEC como um pólo de excelência desta temática de modo a que as entidades do setor das barragens possam continuar a contar com o necessário apoio técnico e científico na definição de soluções no projeto, construção, manutenção e exploração de estruturas hidráulicas. Trata-se de um programa essencialmente dirigido para o DHA, mas compreende o estabelecimento de fortes parcerias interdepartamentais e interinstitucionais. O espetro de domínios de investigação considerados abrange os seguintes aspetos (Figura 1.1):

- as barragens e as Alterações Climáticas (AC), envolvendo o sistema bacia hidrográfica e as áreas da modelação hidrológica de cheias e da otimização da exploração de albufeiras em condições de escassez hídrica;
- a modelação numérica avançada em hidráulica de estruturas, envolvendo as áreas da modelação do escoamento, utilizando esquemas *Computational Fluid Dynamics* (CFD) e versando os descarregadores de cheias;
- a modelação experimental de processos erosivos em hidráulica de estruturas com enfoque na rotura de aterros (barragens e diques) e na erosão junto a pilares de pontes e envolvendo

o uso de técnicas avançadas de medição de grandezas e de análise e visualização do escoamento;

- a gestão do risco em barragens e no vale a jusante, envolvendo aspetos do reforço de capacidade de descarregadores, da medição de grandezas em protótipo e do planeamento de emergência.



Figura 1.1 | Sistemas hidráulicos objeto de estudo no NRE e domínios de investigação abordados no presente Programa de Investigação

Associada a estes quatro domínios, apresenta-se uma estratégia de investigação baseada em quatro Programas de Estudos distintos que procuram dar resposta aos problemas identificados, propondo metodologias e identificando os recursos necessários, os objetivos a atingir e os benefícios esperados da sua realização.

Finalmente, descrevem-se as oportunidades de formação pós-graduada associadas aos Programas de Estudos. Neste âmbito, definem-se em particular planos para cinco teses de doutoramento e cinco dissertações de mestrado.

1.2 Razões para a escolha do tema

Os problemas ligados à disponibilidade da água, mormente um aumento temporário da quantidade disponível (cheias) ou uma situação em que as necessidades de água excedam as disponibilidades em condições sustentáveis (seca), afetam hoje numerosas regiões do mundo. A gestão sustentável e integrada de recursos hídricos constitui, na atualidade, uma das prioridades fundamentais das políticas públicas, em todo o mundo, face ao crescimento populacional, à elevada necessidade hídrica para os mais variados fins e ao surgimento, cada vez mais intenso, de conflitos locais, nacionais e até internacionais na disputa pelas limitadas disponibilidades hídricas.

Em Portugal, a Lei da Água (Lei nº58/2005) transpõe para a ordem jurídica nacional a Diretiva nº 2000/60/CE do Parlamento e Conselho Europeu e estabelece as bases e o quadro institucional para a gestão sustentável das águas. Esta gestão, essencial para o desenvolvimento social e económico do território, baseia-se em primeiro lugar na avaliação das disponibilidades de água em bacias hidrográficas que necessita de informação sobre as principais componentes do ciclo da água e na modelação hidrológica, tendo por base a utilização de dados climáticos. Os avanços mais recentes na investigação na área dos recursos hídricos devem-se ao aprofundamento do conhecimento dos processos climáticos e dos sistemas hidrológicos e essencialmente à possibilidade de utilização de meios informáticos potentes para os simular adequadamente. Assim, de entre as várias áreas com avanços mais significativos, destacam-se, do ponto de vista dos recursos hídricos, as que se relacionam com a modelação de vastos sistemas hídricos e a utilização dos Sistemas de Informação Geográfica e das técnicas de análise e otimização de sistemas, como por exemplo a utilização de métodos heurísticos, nomeadamente os algoritmos genéticos e as redes neuronais.

As barragens, das quais as estruturas hidráulicas são parte integrante, têm um papel fundamental na gestão integrada dos recursos hídricos e podem obrigar à definição de políticas de exploração para resolver problemas de repartição, utilização e proteção de recursos hídricos, assim como de segurança de pessoas e bens. No que se refere à situação nacional, Portugal é um país com abundância de água, embora irregularmente distribuída no tempo e no espaço, o que torna necessário o recurso a barragens para o seu aproveitamento. As barragens têm efeitos que se traduzem na modificação do regime de escoamento, nomeadamente em condições meteorológicas e hidrológicas extremas, aumentando as disponibilidades hídricas e os caudais na estiagem e diminuindo os caudais máximos, em períodos de cheia.

Assim, por um lado, uma correta exploração das respetivas albufeiras transforma as barragens num instrumento que permite aumentar o uso eficiente da água, constituindo uma medida alternativa de poupança deste recurso “na fonte” e dando resposta a uma prioridade atual da União Europeia que preconiza o incentivo a uma cultura de poupança e de redução de perdas, recorrendo a tecnologias e práticas de boa eficiência hídrica (European Commission, 2007b). Por outro lado, as barragens podem constituir um instrumento de gestão dos riscos de inundação, dando igualmente resposta ao Decreto-Lei 115/2010 de 22 de outubro, que transpõe para a ordem jurídica nacional a Diretiva nº 2007/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho e estabelece um quadro para a avaliação e gestão dos riscos de inundações, sendo necessário, nos casos aplicáveis, avaliar as alterações de regime induzidas por estas estruturas.

Outro aspeto importante são as alterações climáticas, nomeadamente a subida do nível médio do mar, as mudanças na temperatura e precipitação e o aumento da frequência e da severidade das condições meteorológicas extremas. Assim, as AC podem ter impacto na formação do escoamento e na recarga de aquíferos, no agravar do risco de eventos extremos (secas e cheias) e de inundações, com consequências na vida da população, nas atividades socioeconómicas e nos ecossistemas. Neste âmbito, são de assinalar os avanços significativos da investigação no domínio

das AC, verificando-se desenvolvimentos na avaliação quer dos seus potenciais impactos nos recursos hídricos quer nas estruturas hidráulicas, nomeadamente no seu dimensionamento, exploração e riscos associados.

No que concerne às estruturas hidráulicas, os critérios de dimensionamento, a evolução das metodologias para a verificação da sua funcionalidade e segurança, a experiência adquirida com a observação e avaliação do comportamento das obras existentes, a necessidade crescente de assegurar as suas reabilitações, a adequação das obras às novas exigências de segurança e ambientais e a vantagem económica em se conseguir estender a sua longevidade são, entre outros, aspetos de enorme relevância e que justificam a utilidade da investigação continuada neste domínio. As abordagens existentes podem socorrer-se de instrumentos de modelação físicos e numéricos, devendo-se neste âmbito reconhecer dois aspetos.

Por um lado, tem-se assistido, nos anos mais recentes, a uma evolução da modelação numérica do escoamento rapidamente variável em estruturas hidráulicas, sendo que, em alguns casos, já se conseguem estudos credíveis com base nesta abordagem. Por outro lado, a importância dos estudos em modelo hidráulico reduzido das obras de segurança e exploração de barragens, em particular na modelação do escoamento em descarregadores de cheias, evidenciam que continuam a ser uma ferramenta incontornável para certas condições de funcionamento, de mais difícil modelação.

Também os avanços recentes em termos de instrumentação e meios de medição dos fenómenos permitem dar igualmente uma acrescida robustez aos resultados obtidos pelos modelos reduzidos. Desta forma integrada é possível tirar o máximo partido da elevada quantidade de dados de experimentação com modelos físicos, no sentido de potenciar o estudo de fenómenos através da associação de modelação física e numérica, designadamente em estudos envolvendo escoamentos altamente turbulentos e multifásicos, típicos dos que ocorrem em estruturas hidráulicas de barragens.

É, por fim, de salientar a importância do desenvolvimento de metodologias para apoio à gestão integrada do risco associado a estruturas hidráulicas, envolvendo não só a modelação das ações e dos fenómenos, necessários na avaliação do risco, como também o desenvolvimento de metodologias essenciais na mitigação das consequências decorrentes. Neste âmbito, existem dois tipos de acidentes que decorrem de fenómenos hidráulicos que importa salientar: a rotura de aterros (barragens e diques) devido a galgamentos e a rotura de obras hidráulicas associadas a vias de comunicação na sequência de erosões localizadas em pilares.

No que se refere à rotura de barragens e diques, esta constitui uma temática de grande interesse prático para a proteção da população eventualmente afetada. A nível internacional, é de salientar a rotura dos diques do sistema de proteção contra cheias de Nova Orleães, em agosto de 2005. A rotura deste sistema foi uma das mais pesadas em sistemas de engenharia: cerca de 1600 vítimas mortais, mais de 650 000 desalojados e uma estimativa de danos que ascende a mais de 200 biliões de dólares. Em Portugal, afigura-se, igualmente, que a rotura ou o galgamento de diques daria lugar a inundações e perdas económicas elevadas, como aconteceu recentemente no rio Mondego. No

nosso país e no caso das barragens, a aplicação do Regulamento de Segurança de Barragens (RSB, 2007¹) permitiu identificar um número significativo de barragens classificadas de risco mais elevado (classe I), verificando-se existir um grande número de pessoas a residir em zonas vulneráveis a inundações associadas a acidentes neste tipo de estruturas.

No que se refere a obras hidráulicas associadas a vias de comunicação será dada particular importância às erosões localizadas em fundações de pontes construídas em leitos aluvionares, as quais constituem uma causa frequente de danos estruturais ou de colapso destas obras de arte. O custo de reabilitação de pontes danificadas ou destruídas devido a fenómenos de infraescavação pode ascender a centenas de milhares de euros. Em Portugal é de salientar a rotura da ponte de Entre-os-Rios, que ocorreu em 2001 e causou 59 vítimas mortais. Acima de tudo, impõe-se evitar as perdas humanas e os custos de reposição das obras acidentadas. A prevenção de colapsos passa pela previsão rigorosa das profundidades das cavidades de erosão localizada e pela conceção de medidas estruturais de mitigação do processo erosivo.

1.3 Enquadramento do tema no LNEC

1.3.1 Áreas de investigação do NRE

A investigação em recursos hídricos e estruturas hidráulicas é realizada no NRE numa ótica de intervenção global e integrada no ciclo de água, abordando não só os aspetos quantitativos, mas também os qualitativos. Estas áreas contemplam os sistemas fluviais e os sistemas aquíferos, integrados ao nível da bacia hidrográfica, bem como as estruturas e circuitos hidráulicos. As áreas de competência do NRE são as seguintes (<http://www.lnec.pt/pt/>):

- hidrologia de águas superficiais e hidrogeologia;
- recursos hídricos superficiais e subterrâneos;
- dinâmica fluvial e qualidade da água;
- estruturas, obras e equipamentos hidráulicos associados a barragens e vias de comunicação.

A abordagem e as metodologias aplicadas no NRE incluem a modelação numérica, a modelação física experimental em laboratório e *in situ*, a monitorização e avaliação de parâmetros de campo e as inspeções e peritagens, nomeadamente:

- modelação numérica em hidrologia e hidrogeologia (balanços sequenciais para avaliação das disponibilidades hídricas, modelação precipitação-escoamento e do fluxo em aquíferos, previsão de cheias e gestão de secas); modelação numérica da dinâmica fluvial (escoamento e transporte sólido), da qualidade da água em rios, albufeiras e aquíferos e do escoamento em estruturas hidráulicas;

¹ A nova legislação de segurança de barragens, que foi publicada em 2018, altera o critério de classificação deste tipo de estruturas, mas afigura-se que mantenha o número das barragens classificadas como de maior risco que foi estimado de acordo com os critérios da legislação de 2007.

- modelação física e experimental em laboratório e *in situ* para caracterização do escoamento em descarregadores e circuitos hidráulicos e do escoamento e transporte de poluentes em aquíferos porosos, bem como o estudo de aspetos específicos de dinâmica fluvial (escoamento em leitos compostos e aluvionares, sedimentação em albufeiras, erosões localizadas junto a pilares de pontes em leitos aluvionares e a jusante de barragens); modelação visando igualmente a conceção de obras associadas a barragens e de proteção contra erosões e inundações, bem como para estudo de soluções de requalificação e reabilitação fluvial (passagens de peixes e outras medidas);
- monitorização, avaliação de parâmetros de campo e tratamento de informação de base envolvendo técnicas de medição e amostragem, metodologias de aquisição e processamento de dados hidro-meteorológicos, bem como desenvolvimento e aplicação de ferramentas estatísticas;
- inspeções e peritagens no âmbito da segurança, desempenho e conservação de obras e equipamentos hidráulicos.

1.3.2 Lacunas de investigação

Com o presente Programa de Investigação pretende-se dar um contributo para a investigação no domínio dos recursos hídricos superficiais e das estruturas hidráulicas. Este contributo visa ultrapassar algumas áreas onde se identificou haver carência de investigação no NRE. Tal como já foi referido, este núcleo tem atualmente quatro grandes áreas de competência: i) hidrologia de águas superficiais e hidrogeologia; ii) recursos hídricos superficiais e subterrâneos; iii) dinâmica fluvial e qualidade da água; e iv) estruturas, obras e equipamentos hidráulicos associados a barragens e vias de comunicação.

Dado este vasto domínio de intervenção do NRE, que resultou nomeadamente de reestruturações que conduziram à integração, no ano de 1997, de dois núcleos (Núcleo de Hidrologia e Hidráulica Fluvial (NHFF) e Núcleo de Hidráulica de Estruturas (NHE)) e a junção, mais recente (em 2013) de um terceiro núcleo (Núcleo de Águas Subterrâneas (NAS)), e das inevitáveis limitações de recursos humanos, foi necessário privilegiar a investigação nos anos mais recentes em algumas áreas em prejuízo de outras igualmente importantes. Assim, uma reflexão estratégica interna permitiu detetar um desequilíbrio de conhecimentos técnicos e científicos e de capacidade de resposta entre as diversas áreas de competência.

Em primeiro lugar, por razões conjunturais de evolução da equipa, verificou-se que embora os aspetos relacionados com a hidrogeologia e os recursos hídricos subterrâneos tivessem sido objeto de estudos de investigação mais recentes, os aspetos da hidrologia e dos recursos hídricos superficiais se apresentavam deficitariamente cobertos. Com efeito, a criação do NAS, nos finais dos anos 1990 impulsionou a investigação em águas subterrâneas que abrangeu os domínios mais tradicionais da modelação do escoamento e da dispersão de poluentes em aquíferos e temáticas mais recentes como a recarga de aquíferos e o impacto das AC nos recursos hídricos subterrâneos (Leitão, 1997; Oliveira, 2004; Novo, 2007). O NAS desenvolveu ainda uma intensa atividade de

investigação em projetos de investigação programada nacionais e internacionais (FCT, 5º, 6º e 7º Programas Quadro da EU, etc.) e um recente Programa de Investigação para habilitação para o exercício de funções de coordenação de investigação científica que contribuiu para o estabelecimento de uma estratégia de desenvolvimento científico no domínio dos recursos hídricos subterrâneos (Leitão, 2009).

No que diz respeito ao domínio da hidrologia e dos recursos hídricos superficiais, assistiu-se a uma forte atividade desde a década de 1970. As duas últimas décadas do século XX foram particularmente fecundas, assistindo-se à publicação de teses e memórias do LNEC no domínio da modelação hidrológica, da caracterização de eventos extremos e ainda aos primeiros passos na utilização de ferramentas de deteção remota como fonte não convencional de aquisição de dados. No entanto, desde o início do século XXI, assistiu-se a um abrandamento da atividade de investigação neste domínio, tendo as últimas teses neste âmbito sido publicadas na década de 1990 (Gonçalves Henriques, 1993; Rodrigues, 1995; Rocha, 1997 e Barbosa, 1999). Estas duas últimas referências constituíram as únicas teses em qualidade da água superficiais realizadas por investigadores do NRE.

No que diz respeito a outras áreas, nomeadamente a dinâmica fluvial, o investimento em investigação revelou-se adequado e com níveis compatíveis com a investigação realizada a nível internacional, tendo a atividade no LNEC sido sempre contínua ao longo dos anos. Com efeito, nos anos mais recentes e em termos de investigação, tem-se assistido no NRE a um volume significativo de investigação no domínio da hidráulica fluvial, salientando-se o desenvolvimento de teses de doutoramento no estudo:

- das erosões localizadas junto de pilares e de encontros de pontes e das respetivas medidas de proteção (Couto, 2000; Moreno, 2016);
- da sedimentação em albufeiras por correntes de turbidez (Alves, 2007; Nogueira, 2014);
- dos escoamentos em canais de secção composta, incluindo áreas urbanas em leitos de cheia (Fernandes, 2013);
- dos escoamentos que derivam da rotura de barragens (Franco, 1996; Viseu, 2006; Amaral, 2017).

Todas estas teses tiveram uma forte abordagem experimental.

Por fim, na área de competência das estruturas hidráulicas foi identificado um claro desajustamento entre a investigação por contrato, com uma intensa atividade em modelação física e experimental, e a investigação programada, com reduzida atividade em modelação numérica. Com efeito, os escoamentos caracterizados por alta velocidade, macroturbulência, acentuada tridimensionalidade e que, além disso, ocorrem em trechos de dimensões relativamente restritas, adequam-se particularmente bem à modelação física. Assim, os estudos em modelo reduzido de obras hidráulicas e de órgãos hidráulicos de barragens têm tido, desde 1950, uma forte implantação no NRE que se mantém atualmente, no âmbito da investigação por contrato.

De igual forma, tem-se assistido ao desenvolvimento de teses de doutoramento e projetos de investigação, centrados na abordagem experimental, compreendendo aspetos que se relacionam, designadamente, com flutuações de pressão em bacias de dissipação por ressalto e *plunge pools*, ações hidrodinâmicas provocadas por jatos livres, descarregadores não convencionais e outras estruturas hidráulicas, sendo de citar as teses de doutoramento envolvendo estudos de caracterização do escoamento nos seguintes tipos de obras hidráulicas:

- soleiras poligonais (Lopes, 2011);
- descarregadores em degraus e descarregadores não convencionais sobre barragens de aterro (Matos, 1999; Relvas, 2008; Meireles, 2011);
- estruturas de dissipação de energia por ressalto hidráulico e por jatos livres (Pinheiro, 1995; Melo, 2001);
- passagens para peixes por bacias sucessivas (Silva, 2010; Branco, 2013).

Note-se que também neste domínio, os estudos tiveram uma componente marcadamente experimental.

1.3.3 O Programa de Investigação e Inovação (P2I) 2013-2020

1.3.3.1 Enquadramento

O atual Programa de Investigação e Inovação (P2I) do LNEC agrega, no que diz respeito ao DHA, cinco grandes temas de Investigação, Desenvolvimento e Inovação (I&D&I)² que foram definidos na sequência de uma reflexão realizada internamente pelo conjunto do departamento e que estão a ser desenvolvidos ao longo do período 2013-2020 (Matos *et al.*, 2013):

- Tema 1: Gestão do Risco e Segurança em Hidráulica e Ambiente
- Tema 2: Infraestruturas em Hidráulica e Ambiente
- Tema 3: Ambiente e Sistemas Aquáticos
- Tema 4: Cidades do Futuro
- Tema 5: Tecnologias de Informação e de Apoio à Decisão

Dentro destes temas existe um conjunto de atividades que são desenvolvidas de forma integrada pelos diversos núcleos e grupos de trabalho do DHA. O NRE desenvolve investigação nas sete seguintes atividades:

- Atividade 1.1 - Alterações climáticas e riscos associados
- Atividade 1.3 - Risco em estruturas e infraestruturas hidráulicas
- Atividade 1.4 - Gestão de recursos hídricos num contexto de incerteza
- Atividade 1.5 - Hidrogeologia urbana (gestão do uso e ocupação do solo)
- Atividade 2.5 - Obras hidráulicas associadas a barragens e vias de comunicação

² Cada um destes temas deu posteriormente origem a um Programa de Investigação e Inovação (P2I) do DHA.

- Atividade 3.1 - Qualidade da água (em rios, albufeiras e aquíferos) e dinâmica de ecossistemas
- Atividade 3.4 - Proteção, reabilitação e requalificação fluvial e de aquíferos

O presente Programa de Investigação gerará contributos essencialmente para as atividades 1.1, 1.3 e 2.5 que são seguidamente identificados.

1.3.3.2 Alterações climáticas e riscos associados

O objetivo desta atividade é desenvolver ferramentas e metodologias para avaliar o impacto das alterações climáticas nos recursos hídricos e zonas costeiras e a resposta destes sistemas a medidas de adaptação. A atividade está inserida no Tema 1 (*Gestão do Risco e Segurança em Hidráulica e Ambiente*) e agrega projetos de investigação do NRE, do Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas (NPE) e do Núcleo de Estuários e Zonas Costeiras (NEC). No que se refere ao NRE, as prioridades de investigação são as seguintes:

1. avaliação dos impactos das AC nos regimes de precipitação e de escoamento superficial bem como nos eventos de precipitação extrema;
2. avaliação do efeito das AC nas cheias e secas e nas inundações fluviais, incluindo: i) caracterização do escoamento em situações de cheias fluviais e avaliação do impacto das AC e das respetivas medidas de minimização do risco de inundação; ii) desenvolvimento de metodologias para a caracterização e previsão de secas e análise dos efeitos das AC na duração, severidade e frequência das mesmas;
3. avaliação do efeito das AC nos recursos hídricos subterrâneos, incluindo: i) análise da variação da recarga e dos volumes de água subterrânea disponíveis para a atividade humana e para a dinâmica natural dos ecossistemas; ii) análise dos impactos da alteração da vegetação na recarga e evapotranspiração; iii) melhoramento e implementação das metodologias de avaliação da vulnerabilidade de aquíferos às AC;
4. avaliação do efeito das AC na estabilidade de taludes (naturais ou construídos) – do ponto de vista da alteração das condições de infiltração, evapotranspiração e percolação;
5. desenvolvimento de metodologias e de aplicações para o acoplamento de modelos hidrodinâmicos para simulação da inundação das bacias hidrográficas às zonas costeiras, incluindo as zonas urbanas e tendo em consideração a incerteza nos vários níveis da cascata de modelos e nas estimativas dos efeitos das AC.

Serão dados contributos do presente Programa de Investigação para os pontos 1 e 2.

1.3.3.3 Risco em estruturas e infraestruturas hidráulicas

O objetivo desta atividade é desenvolver ferramentas e metodologias para a gestão do risco em sistemas de exploração de águas subterrâneas, em estruturas fluviais (barragens e diques) e marítimas (costeiras, portuárias e emissários submarinos) bem como em infraestruturas de águas urbanas. Esta atividade está inserida no Tema 1 (*Gestão do Risco e Segurança em Hidráulica e Ambiente*) e agrega temas de investigação do NRE, NPE e NEC. Os que se referem a prioridades

de investigação do NRE relacionam-se naturalmente com as estruturas fluviais e os aquíferos, agregando os seguintes aspetos:

1. inundações em áreas urbanizadas: avaliação do risco tendo em consideração diferentes fontes de risco e tipos de consequências; identificação e avaliação de medidas para a minimização desses riscos; abordagem integrada considerando diversos atores e suas interações;
2. sobre-exploração de águas subterrâneas e subsidência, incluindo a análise numérica do risco de subsidência de terrenos devido à sobre-exploração de águas subterrâneas;
3. modelação experimental da rotura por galgamento de aterros (barragens homogéneas e zonadas e diques) e formulação de modelos conceptuais da evolução temporal da brecha e do caudal escoado (hidrograma de cheia);
4. desenvolvimento de modelos numéricos, baseadas nos modelos conceptuais construídos, que descrevam a evolução temporal da brecha e do caudal escoado através de aterros em rotura;
5. modelação numérica 2D da propagação de cheias em vales a jusante de barragens e de cheias resultantes da rotura de estruturas de proteção fluvial (diques);
6. desenvolvimento de metodologias e de aplicações para o acoplamento de modelos de formação de brechas e de propagação das cheias resultantes;
7. desenvolvimento e aplicação de técnicas experimentais inovadoras para a medição das variáveis que caracterizam a evolução da brecha e do caudal proveniente da rotura de aterros em laboratório³;
8. desenvolvimento e aplicação de métodos simplificados para simulação do processo de formação e propagação de cheias provocadas pela rotura de barragens e de ferramentas para quantificação do dano nas áreas de inundação a jusante;
9. desenvolvimento e aplicação de sistemas de apoio à gestão de emergência em barragens, em particular sistemas de aviso e alerta, planos de emergência e exercícios para implementação dos mesmos e treino da população.

Serão dados contributos do presente Programa de Investigação para os pontos 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9.

1.3.3.4 Obras hidráulicas associadas a barragens e vias de comunicação

O objetivo desta atividade é desenvolver ferramentas e metodologias para garantir o adequado comportamento e segurança das obras hidráulicas associadas a barragens e vias de comunicação. A atividade está inserida no Tema 2 (*Infraestruturas em Hidráulica e Ambiente*), envolve a participação do NRE e considera duas grandes áreas que se inferem do próprio título: i) barragens e ii) obras hidráulicas associadas a vias de comunicação.

No que se refere às barragens a atividade envolve os seguintes aspetos:

1. caracterização de escoamentos em descarregadores de cheias não convencionais;

³ Esta atividade foi posteriormente incluída noutra P2I do LNEC ("Reestruturação e Inovação Tecnológica nos Estudos de Estruturas Hidráulicas em Modelo Reduzido")

2. aplicação de modelos numéricos a escoamentos em estruturas e infraestruturas hidráulicas;
3. ecohidráulica, com ênfase para a continuação dos estudos sobre dispositivos para peixes destinados à transposição de obstáculos transversais em cursos de água⁴;
4. construção de modelos laboratoriais de estruturas hidráulicas e instalações experimentais com recurso a tecnologias de produção com base em CAD/CAM, impressão 3D e corte automático de peças de grande dimensão;
5. reabilitação de obras de segurança e de exploração;
6. avaliação dos impactos das AC em obras de segurança e exploração de barragens;
7. estudo de medidas estruturais e operacionais com vista à mitigação dos impactos ambientais das barragens.

No que se refere às obras hidráulicas associadas a vias de comunicação, entende-se poder vir a contribuir para o conhecimento técnico-científico na área da segurança de pontes, em particular, com o estudo dos seguintes aspetos:

8. caracterização experimental das erosões localizadas junto de pilares de pontes, incluindo na abordagem campanhas de medições do campo de velocidades do escoamento, necessárias para a modelação numérica do fenómeno;
9. avaliação do impacto das intervenções humanas em rios e definição de medidas de mitigação desses impactos, incluindo o impacto da extração de inertes no funcionamento e segurança de obras hidráulicas associadas a vias de comunicação;
10. avaliação do impacto do movimento aluvionar em períodos de cheia e da instabilidade do leito nas obras hidráulicas associadas a vias de comunicação;
11. avaliação de ações ambientais com influência no risco de segurança de obras hidráulicas associadas a vias de comunicação: deslizamentos e alterações na vegetação;
12. avaliação de ações acidentais com influência no risco de segurança de obras hidráulicas associadas a vias de comunicação: sismos, embate e vandalismo;
13. avaliação dos impactos das AC em obras de drenagem de infraestruturas de transportes;
14. desenvolvimento de medidas mitigadoras de risco e soluções de reabilitação em obras hidráulicas associadas a vias de comunicação.

Serão dados contributos do presente Programa de Investigação para os pontos 1, 2, 5, 6, 8, 10, 13 e 14.

1.4 Identificação de prioridades de investigação

1.4.1 Prioridades de investigação e interligação com o P2I do LNEC

Da análise realizada nos pontos anteriores afigura-se que, de uma forma geral, devam surgir novos desenvolvimentos no NRE nas áreas que têm por objeto: i) a hidrologia de águas superficiais a nível da bacia hidrográfica (aprofundando o conhecimento de diversos fenómenos como, por exemplo,

⁴ Esta atividade foi posteriormente incluída noutra P2I do LNEC (DHA-AMBIENTE: “Ambiente e Sistemas Aquáticos”)

as cheias e as secas); ii) os rios (dinâmica fluvial); iii) as estruturas hidráulicas neles localizadas (aprofundando o conhecimento do seu dimensionamento e comportamento); iv) o vale a jusante (mormente pelo impacto da exploração ou da existência dessas estruturas no meio hídrico).

Na área da hidrologia e dos recursos hídricos superficiais, optou-se pelo aprofundamento do conhecimento dos fenómenos extremos em associação com cenários de mudança climática: i) cheias e AC, contemplando a análise e geração de variáveis hidrométricas usando cenários de AC e fazendo uso de modelação hidrológica baseada em *softwares* livres e Sistemas de Informação Geográfica; ii) secas e AC, contemplando a otimização da exploração de albufeiras em situação de escassez da água. Nestes contextos, a hidrologia desempenha um papel importantíssimo ao fornecer dados e análises que servem de base para o dimensionamento e exploração destas obras.

Na área da dinâmica fluvial optou-se pela investigação no domínio dos processos erosivos, considerando dois aspetos. Em primeiro lugar, dá-se continuidade a um projeto já existente de modelação da rotura de barragens, mas dando enfoque na caracterização do processo de formação de brechas devidas ao galgamento de diques. Em segundo lugar, dá-se igualmente continuidade a uma linha de investigação existente – a erosão em pilares de pontes - com base essencialmente na modelação experimental avançada. Com a abordagem experimental do estudo destes fenómenos pretende-se concretizar o duplo objetivo de estudar a fenomenologia dos processos erosivos, mas visa-se igualmente o ganho de experiência no NRE no uso de novas técnicas de análise e visualização do escoamento, ou sejam técnicas experimentais de medição de escoamentos turbulentos, que permitam o conhecimento do campo de velocidades com instrumentação “não invasiva”.

Também na área das estruturas hidráulicas se elegeram essencialmente duas temáticas: a primeira é pioneira em termos de investigação no NRE e traduz-se na modelação CFD do escoamento em estruturas hidráulicas. A segunda, totalmente experimental, consiste no estudo do comportamento de estruturas hidráulicas, caracterizando as ações hidrodinâmicas que efetivamente atuam sobre as fronteiras sólidas do escoamento e na análise do escoamento bifásico ar-água. Também aqui se pretende contribuir para o investimento atual do NRE no ganho de experiência em novas técnicas de medição e visualização de grandezas hidráulicas.

Finalmente, pretende-se igualmente dar continuidade à investigação realizada desde há algumas décadas na temática do risco associado às barragens e aos vales a jusante, incluindo a observação *in situ* de estruturas hidráulicas e o planeamento de emergência, do qual o NRE foi pioneiro na condução da investigação em Portugal.

A relação entre os sistemas que são estudados no NRE (bacia hidrográfica, estrutura hidráulica e vale a jusante) com algumas das atividades previstas no desenvolvimento de P2I do LNEC e com as prioridades de investigação que serão tratados neste Programa de Investigação são apresentados na Figura 1.2.

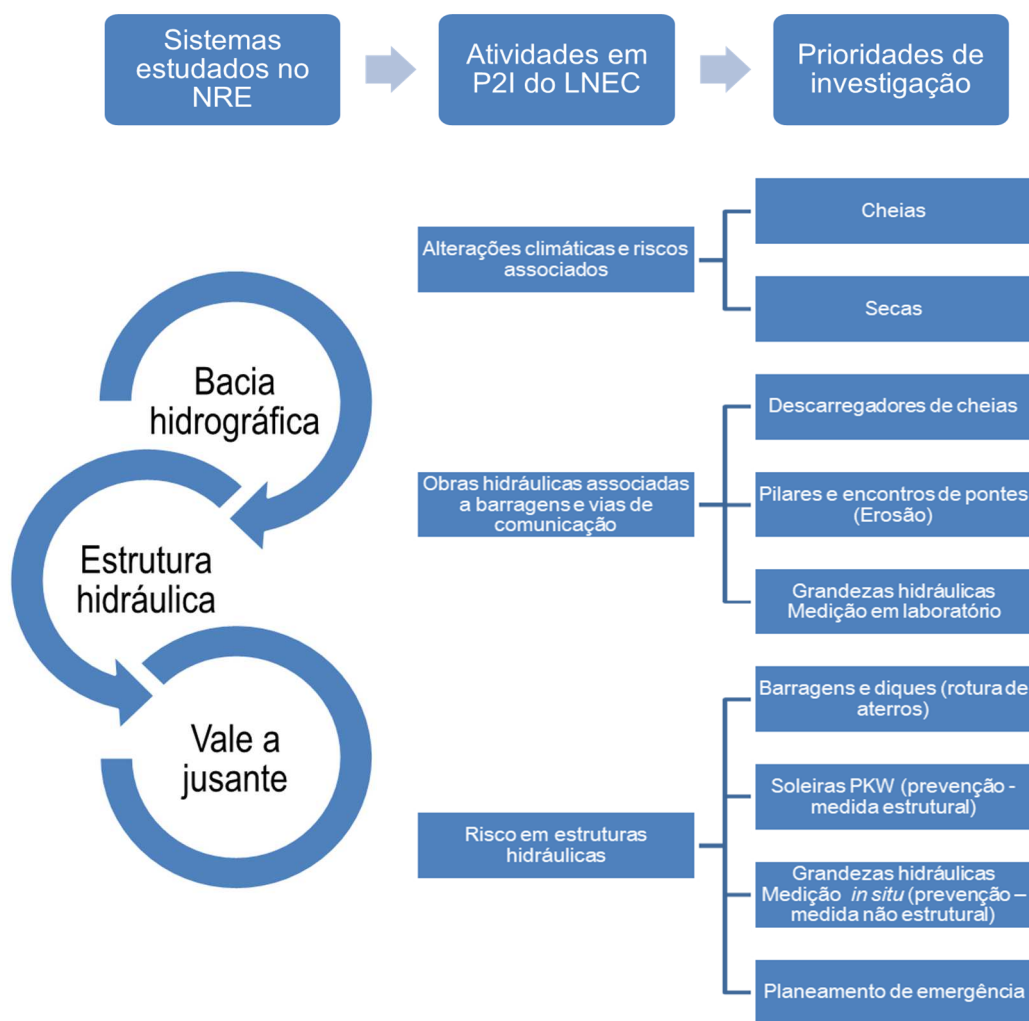


Figura 1.2 | Interligação entre os sistemas hidráulicos objeto de estudo no NRE, as atividades previstas em P2I do LNEC e as prioridades de investigação identificadas no NRE

1.4.2 Prioridades de investigação e interligação com os Programas de Estudos propostos

De uma forma geral, pretende-se que as prioridades de investigação conduzam aos diversos Programas de Estudos a propor. Assim, estas prioridades foram organizadas em quatro grupos, os quais, como se verá no Capítulo 5, correspondem, na prática, aos quatro Programas de Estudos propostos pelo presente Programa de Investigação (Figura 1.3).

O primeiro Programa de Estudos aborda a temática dos eventos extremos na sua relação com o sistema barragem em dois aspetos distintos: i) o primeiro aborda a questão das AC e o seu impacto no dimensionamento dos descarregadores de barragens, com enfoque no fenómeno extremo das

cheias e ii) o segundo aborda a questão das secas e da mitigação dos seus efeitos na ótica da otimização da exploração de albufeiras.

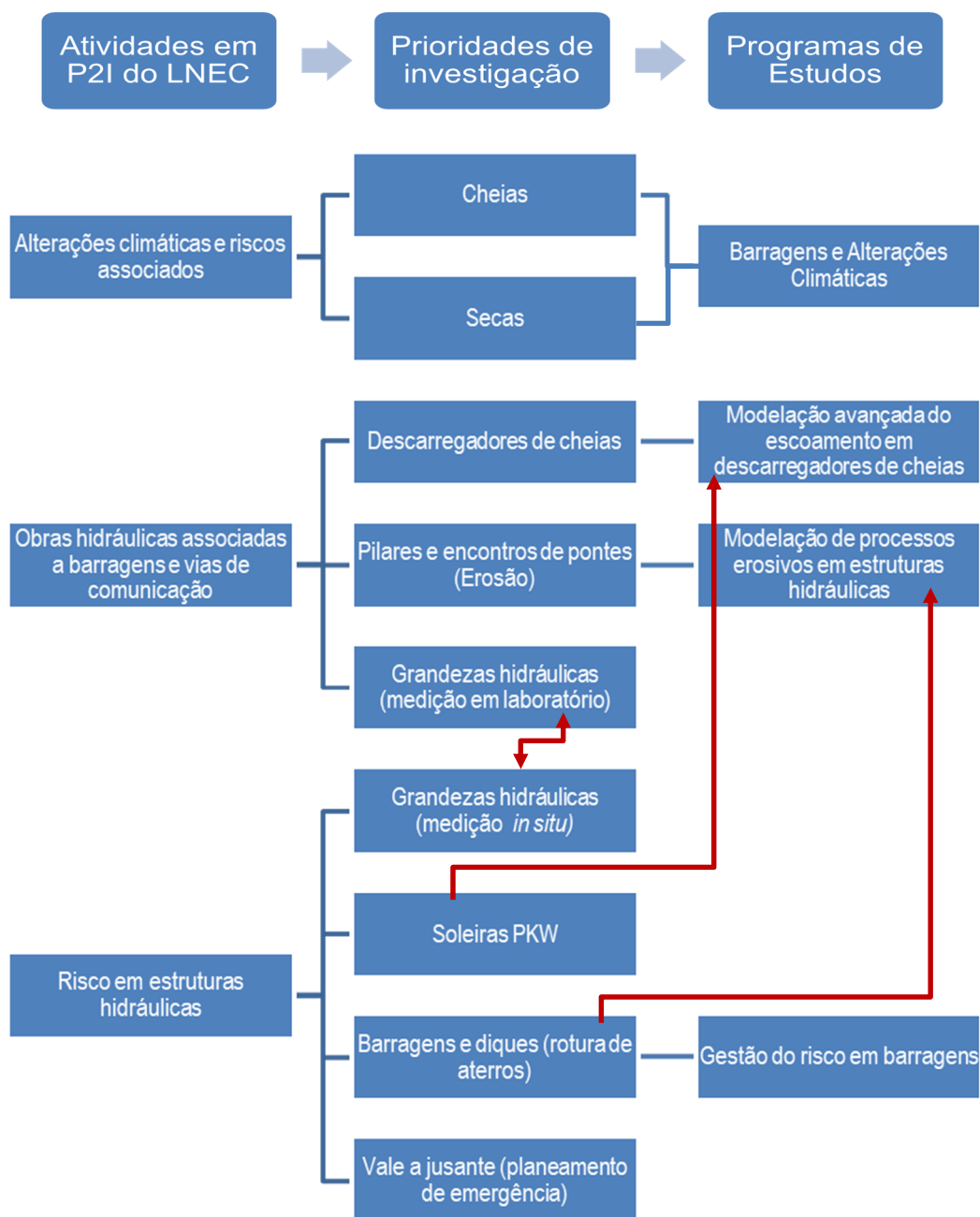


Figura 1.3 | Interligação das atividades previstas em P2I do LNEC com as prioridades de investigação identificadas e com os Programas de Estudos propostos

O segundo Programa de Estudos incide particularmente numa abordagem baseada na modelação numérica CFD do escoamento em estruturas hidráulicas, tendo como objeto de estudo os descarregadores de cheias. Visa a implementação, no NRE, deste tipo de ferramenta, permitindo ultrapassar uma lacuna existente, que resulta dos modelos numéricos existentes do NRE serem

essencialmente modelos hidrológicos/hidrogeológicos e fluviais e não modelos de simulação do escoamento em estruturas hidráulicas.

O terceiro Programa de Estudos tem como abordagem de investigação principal a modelação experimental de processos erosivos nas barragens (e os diques) e junto a pilares de pontes. Para além do aprofundamento do conhecimento destes fenómenos, este Programa de Estudos visa ainda a utilização de novas técnicas de análise e visualização do escoamento que permitam aprofundar o conhecimento de grandezas hidráulicas (campo de velocidades, pressões e flutuações de pressão, concentrações de ar, etc.), recorrendo a instrumentação essencialmente “não invasiva”, e melhorar o conhecimento do NRE em novas técnicas de medição em modelação física.

O quarto e último Programa de Estudos visa agrupar várias ferramentas para a mitigação do risco em barragens atuando em dois aspetos. Primeiro, pelo investimento em práticas do controlo de segurança, como, por exemplo, a identificação de deteriorações em obras hidráulicas e a medição de grandezas hidráulicas em protótipo. Segundo, pela consolidação de metodologias de planeamento e gestão de emergências provocadas por rotura de barragens, nomeadamente por recurso à definição de meios envolvendo a informatização de Planos de Emergência e de procedimentos para a execução de exercícios de simulacro da rotura de barragens.

Assim, tal como ilustrado na Figura 1.3, o primeiro Programa de Estudos, intitulado “*Barragens e Alterações Climáticas*”, provem diretamente da Atividade 1.1 “Alterações climáticas e riscos associados” do Tema/P2I do DHA “Gestão do Risco e Segurança em Hidráulica e Ambiente”.

Por outro lado, a Atividade 2.4 “Obras hidráulicas associadas a barragens e vias de comunicação” do Tema/P2I do DHA “Infraestruturas em Hidráulica e Ambiente” conduz a dois Programas de Estudos:

- “*Modelação avançada do escoamento em descarregadores de cheias*”, que integra, para além da modelação CFD do escoamento em descarregadores, o estudo de soleiras PKW para aumento da capacidade de vazão;
- “*Modelação de processos erosivos em estruturas hidráulicas*”, que integra, para além da modelação da erosão junto a pilares de pontes, a modelação da rotura de aterros (esta última está integrada na Atividade 1.3 do P2I “Gestão do risco e segurança em Hidráulica e Ambiente”).

A Atividade 1.3 “Risco em estruturas e infraestruturas hidráulicas” do Tema/P2I “Gestão do Risco e Segurança em Hidráulica e Ambiente” conduz a um Programa de Estudos “*Gestão do risco em barragens*” que integra as restantes prioridades de investigação (medição de grandezas hidráulicas *in situ*, planeamento de emergência, etc.).

Por fim, note-se que a investigação no âmbito do tema “Medição de grandezas em laboratório” será naturalmente realizada em diversos projetos dos três últimos Programas de Estudos, nomeadamente todos os de cariz mais experimental (Projetos 2.2, 3.1, 3.2 e 4.1, como se verá no Capítulo 5).

1.5 Estrutura do Programa de Investigação

O Programa de Investigação está dividido em sete capítulos. O presente capítulo é introdutório e apresenta os antecedentes, definindo os objetivos do trabalho, assim como a forma como está organizado o texto.

Os capítulos 2 a 4 abordam as vertentes identificadas como áreas de intervenção nos vários domínios das águas superficiais, da hidráulica fluvial e das estruturas, incorporando novos avanços no que se refere às AC, à modelação numérica e experimental bem como à gestão do risco. Incluem, tal como disposto no nº 3 do art. 30º do Decreto-Lei nº 124/99, uma síntese dos conhecimentos existentes sobre os temas abordados, uma apresentação crítica dos problemas já tratados e dos problemas em aberto bem como propostas de investigação a realizar nos próximos anos no NRE.

Em particular, o Capítulo 2 aborda as barragens e as alterações climáticas e relaciona-se com as duas vertentes identificadas como área de atuação nas águas superficiais: i) o impacto das AC na segurança das obras hidráulicas, no que se refere a cheias e ao dimensionamento de descarregadores de cheias e ii) a modelação hidrológica e a gestão dos recursos hídricos superficiais num cenário de AC, envolvendo a escassez hídrica e a seca.

O Capítulo 3 apresenta a área de atuação em estruturas hidráulicas com base em abordagens numéricas e experimentais avançadas. Incide, em particular, na modelação CFD do escoamento em descarregadores de cheias e na modelação do processo erosivo junto a pilares de pontes. Para além do aprofundamento do conhecimento destes fenómenos, este capítulo trata também da questão das novas técnicas de análise e visualização do escoamento que permitem aprofundar o conhecimento de grandezas hidráulicas em laboratório.

O Capítulo 4 apresenta a gestão do risco em barragens, agrupando a análise do risco (modelação da rotura de barragens e diques) e o desenvolvimento de medidas de redução do risco tais como medidas de deteção (medições de grandezas em protótipo e *in situ*, nomeadamente em bacias de impacto de descarregadores), soluções inovadoras de controlo do risco (aumento da capacidade de vazão de descarregadores) e ferramentas para a mitigação do risco em barragens, tais como o planeamento de emergência.

No Capítulo 5 apresenta-se o programa de estudos e no Capítulo 6 descrevem-se as oportunidades de formação pós-graduada associadas ao Programa de Investigação.

Por fim, no Capítulo 7 são apresentadas considerações finais.

2 | BARRAGENS E ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

2.1 Considerações iniciais

A mudança climática corresponde a uma variação estatística significativa das médias que caracterizam o clima e/ou das suas variabilidades durante um período suficientemente grande, da ordem das décadas (SIAM, 2002). A Convenção Quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas define “mudança climática” como aquela que resulta direta ou indiretamente das atividades humanas⁵; a mesma convenção define “variabilidade climática” como a alteração do clima atribuível a causas naturais. Com efeito, de uma forma geral considera-se que as modificações do clima resultem de causas naturais ou antropogénicas, sendo possível distinguir três tipos de causas: i) causas externas naturais (por exemplo, alterações na atividade solar ou na órbita terrestre e queda de meteoritos); ii) causas internas naturais (erupções vulcânicas, por exemplo) ou; iii) causas internas antropogénicas que correspondem a alterações na composição da atmosfera essencialmente devido à emissão de gases de efeito de estufa (GEE).

Como resultado das atividades antropogénicas tem-se vindo a registar o aumento das concentrações não só de alguns gases naturais de efeito de estufa, em particular o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O), como também de novos gases não-naturais de efeito de estufa, nomeadamente os clorofluorcarbonetos que provêm de aerossóis. O *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC)⁶, através dos seus sucessivos relatórios de avaliação (1^o ao 5^o), tem vindo a salientar as evidências científicas relativas à influência da atividade humana sobre o sistema climático (IPCC, 1990 e 1992; 1996; 2001; 2007 e 2014)⁷. Estes relatórios destacam o facto de as emissões de GEE serem a causa dominante do inequívoco aquecimento global observado ao longo do século XX e salientam a relação entre a manutenção dos níveis atuais de emissões de GEE e o aumento da temperatura que se afigura conduzir à modificação dos padrões da precipitação e ao aumento da frequência de ocorrência de eventos extremos.

Os dados históricos à escala global corroboram estas evidências já que indicam a ocorrência de alterações desde meados do século XIX e durante todo o século XX, tendo-se nomeadamente verificado (SIAM, 2002):

⁵ No presente trabalho consideram-se as duas expressões (“mudança climática” e “alteração climática”) como equivalentes; a segunda será a adotada no seguimento deste texto pois é, de uma forma geral, de uso mais frequente em Portugal.

⁶ O IPCC é uma organização científico-política criada em 1988 no âmbito da Organização das Nações Unidas (ONU) por iniciativa do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e da Organização Meteorológica Mundial (OMM). Tem como objetivo principal sintetizar e divulgar o conhecimento mais avançado sobre as alterações climáticas que hoje afetam o mundo, especificamente o aquecimento global, apontando as suas causas, efeitos e riscos para a humanidade e o meio ambiente e sugerindo soluções para mitigar os problemas associados.

⁷ Os relatórios do IPCC são emitidos em ciclos de cerca de seis anos, sendo ainda produzidos alguns relatórios específicos no período intermédio. Assim, em outubro de 2018, o IPCC emitiu um destes últimos relatórios intitulado “*Special report on global warming of 1.5°C*”, que se relaciona com o objetivo de manter o aquecimento global abaixo dos 2°C, tal como definido no Acordo de Paris (2015).

- o aumento da temperatura: a temperatura média global da atmosfera à superfície aumentou durante o século XX em $0,6^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$;
- a subida do nível da água do mar: o degelo de glaciares provocou nos últimos 50 anos uma subida do nível médio do mar de 10 a 20 cm;
- a ocorrência de condições do tempo mais extremas: tem aumentado a frequência de condições extremas, tanto no inverno, com maior número de tempestades e inundações nos países do Norte, como nos períodos de seca, com uma maior ocorrência de incêndios florestais nos países do Sul.

Os impactos das AC no ciclo da água podem ser avaliados a nível da bacia hidrográfica e relacionam-se, no que diz respeito aos recursos hídricos, com a disponibilidade da água (quantidade e qualidade da água) e na ocorrência de cheias. Estes impactos podem adicionalmente gerar mudanças no uso do solo, nas cargas de poluição e nas necessidades da água. As alterações a nível da disponibilidade e dos usos têm efeitos nos setores socioeconómicos e nos sistemas biofísicos, designadamente na agricultura, energia, florestas e biodiversidade etc. (Figura 2.1).

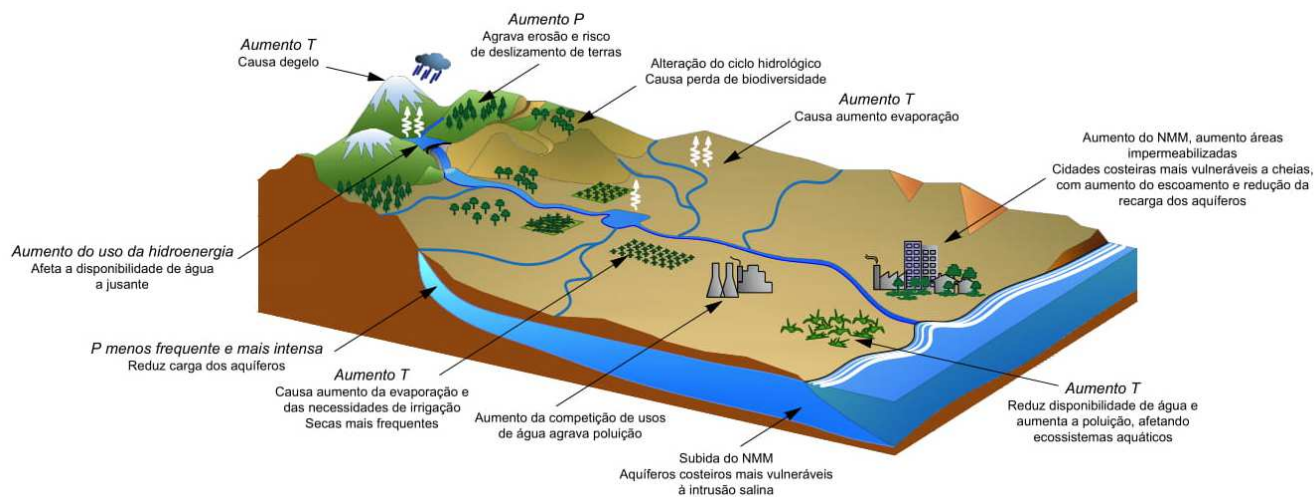


Figura 2.1 | Impacto das AC a nível da bacia hidrográfica (adaptado de World Bank, 2010)

Em Portugal, e no que diz respeito aos recursos hídricos, estudos de avaliação do impacto das AC determinam modificações nos valores médios de todas as componentes do ciclo hidrológico nas bacias hidrográficas ibéricas que terão, em particular, um impacto grande na disponibilidade de água. Nesta realidade, as projeções para Portugal indicam um risco de aumento das condições de aridez que pode resultar num aumento da escassez de água nos ecossistemas naturais e agrícolas, bem como no potencial para produção de hidroeletricidade (Gao and Giorgi, 2008). De acordo com o projeto SIAM, são de esperar em Portugal os seguintes impactos a nível da bacia hidrográfica que se relacionam com as barragens:

- alteração dos regimes de escoamento;
- degradação da qualidade da água, sobretudo durante o verão, no Sul;
- aumento das necessidades de abastecimento público e de rega, devido ao aumento de temperatura, assim como a diminuição generalizada dos caudais de verão;

- afetação no setor energético, com a possibilidade de aumento de produção nas centrais hidroelétricas na região do Norte e redução nas centrais do Sul.

Para fazer face ao problema das AC existem essencialmente duas linhas de atuação: mitigação e adaptação. Enquanto a mitigação é o processo que visa reduzir a emissão de GEE para a atmosfera, a adaptação procura minimizar os efeitos negativos dos impactos das AC nos sistemas biofísicos e socioeconómicos. Sem prejuízo da importância estratégica da primeira abordagem, face à consciência generalizada de que as AC estão já em curso, e que em certa medida os seus impactos são inevitáveis, tem vindo a dar-se crescente atenção à vertente da adaptação.

Portugal afigura-se ser um país particularmente vulnerável às AC, que resulta da sua extensa frente marítima a cotas baixas, que potencia a erosão das zonas costeiras devido ao aumento do nível médio das águas do mar, e ao facto de estar numa posição de proximidade com a linha de avanço da desertificação. Em Portugal, foi publicada, em 2010, em Diário da República, a Resolução do Conselho de Ministros n.º 24/2010, de 1 de abril, que aprova a Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas (ENAAAC).

Esta estratégia foi posteriormente revista, em 2015, pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 56/2015, de 30 de julho que aprovou a ENAAAC 2020, enquadrando-a no Quadro Estratégico para a Política Climática (QEPIIC), o qual estabeleceu a visão e os objetivos da política climática nacional no horizonte de 2030, reforçando a aposta no desenvolvimento de uma economia competitiva, resiliente e de baixo carbono e contribuindo para um novo paradigma de desenvolvimento em Portugal.

Estes instrumentos têm em vista um país adaptado aos efeitos das AC, através da contínua implementação de soluções baseadas no conhecimento técnico-científico e em boas práticas, na melhoria do nível de conhecimento sobre as AC e na promoção da integração nas diversas políticas públicas e instrumentos de operacionalização, colocando maior ênfase na implementação de medidas de adaptação.

2.2 Enquadramento e principais conclusões de projetos no domínio das AC

2.2.1 Clima e projeções climáticas no século XXI

2.2.1.1 Previsões globais dos GCM

Para simular o clima atual e prever o futuro são usados modelos da circulação geral da atmosfera (modelos GCM ou AOGCM, da terminologia anglo-saxónica *Atmosphere-Ocean Global Climate Models*) que incorporam uma representação do sistema climático, simulando a evolução do vento, temperatura, precipitação, humidade do solo, área coberta de neve, extensão das calotes polares e circulação oceânica para todo o globo para períodos da ordem das décadas ou séculos. Para estabelecer as projeções futuras, estes modelos simulam cenários para as concentrações futuras

de GEE que são reconhecidamente consideradas como representativos do futuro (Carter *et al.*, 2000).

O IPCC, através do seu último relatório (IPCC, 2014), selecionou quatro cenários de concentração de GEE (Representative Concentration Pathways – RCP) que procuram traduzir o aumento de temperatura em função de possíveis alterações antropogénicas no futuro (Quadro 2.1):

- Cenário RCP 2.6 assume que as emissões globais anuais de GEE apresentam um pico em 2010-2020, com decréscimo posterior;
- Cenário RCP 4.5 assume que o pico ocorre em 2040 e posterior decréscimo;
- Cenário RCP 6.0 assume que o pico ocorre em 2080 e posterior decréscimo;
- Cenário RCP 8.5 assume que as emissões continuam a subir ao longo de todo o século XXI.

Quadro 2.1 | Cenários de concentração de GEE (IPCC, 2014)

	2046-2065	2081-2100
Cenário	Aumento da temperatura global (°C) Média (banda mais provável)	
RCP2.6	1,0 (0,4 a 1,6)	1,0 (0,3 a 1,7)
RCP4.5	1,4 (0,9 a 2,0)	1,8 (1,1 a 2,6)
RCP6.0	1,3 (0,8 a 1,8)	2,2 (1,4 a 3,1)
RCP8.5	2,0 (1,4 a 2,6)	3,7 (2,6 a 4,8)

Note-se que o IPCC no seu 3º relatório (IPCC, 2000), já havia identificado seis cenários, estes de emissão de GEE (Special Report on Emissions Scenarios - SRES), com a seguinte nomenclatura: B1, B2, A1T, A1B, A2 e A1FI, por ordem crescente da influência do aumento da temperatura, no século XXI (IPCC, 2000), pelo que o presente documento apresenta alguns estudos com projeções para estes últimos cenários.

A avaliação do nível de confiança das projeções futuras obtidas pelos modelos GCM pode ser feita testando a respetiva capacidade para simular o clima passado e presente, pelo que têm sido empreendidas comparações entre os resultados de diversos modelos tanto no que diz respeito à simulação do clima presente (processo de validação do modelo) como do clima futuro (projeções climáticas) (Gates, *et al.*, 1999; IPCC, 1996 e 2007; Meehl *et al.*, 2007 a) e b)). Devido às incertezas quanto à formulação do modelo e ao estado inicial, qualquer simulação individual representa apenas uma das realizações possíveis do sistema climático. Para permitir uma avaliação destas incertezas, é necessário efetuar um conjunto de simulações com vários modelos ou um conjunto de simulações com um único modelo, mas com diferentes condições iniciais, usando, assim, um “ensemble” de simulações.

Assim, estudos conduzidos com GCM para a Europa, indicam aumentos de temperatura variando entre 3,5°C e 6°C para uma duplicação do CO₂. Destes estudos, salientam-se as análises realizadas no âmbito do projeto “CMIP3 - Coupled Model Inter-comparison Project (Phase III)” que utilizou sistematicamente dezasseis modelos de circulação geral da atmosfera (Quadro 2.2), tendo estado na base do quarto relatório de avaliação da Comissão para as Alterações Climáticas criada no seio do IPCC (IPCC, 2007).

Quadro 2.2 | Lista de modelos GCM (Costa-Cabral et al., 2012)

Grupo de modelação, País	Código do modelo do IPCC	Referência Principal
1. Bjerknes Centre for Climate Research	BCCR-BCM2.0	(Furevik et al., 2003)
2. Canadian Centre for Climate Modeling & Analysis	CGCM3.1 (T47)	(Flato and Boer, 2001)
3. Météo-France / Centre National de Recherches Météorologiques, France	CNRM-CM3	(Salas-Mélia et al., 2005)
4. CSIRO Atmospheric Research, Australia	CSIRO-Mk3.0	(Gordon et al., 2002)
5. US Dept. of Commerce / NOAA / Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	GFDL-CM2.0	(Delworth et al. 2006)
6. US Dept. of Commerce / NOAA / Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	GFDL-CM2.1	(Delworth et al., 2006)
7. NASA / Goddard Institute for Space Studies, USA	GISS-ER	(Russell et al., 2000)
8. Institute for Numerical Mathematics, Russia	INM-CM3.0	(Diansky and Volodin, 2002)
9. Institut Pierre Simon Laplace, France	IPSL-CM4	(IPSL, 2005)
10. Center for Climate System Research (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies and Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC), Japan	MIROC3.2 (medres)	(K-1 model developers, 2004)
11. Meteorological Institute of the University of Bonn, Meteorological Research Institute of KMA	ECHO-G	(Legutke and Voss, 1999)
12. Max Planck Institute for Meteorology, Germany	ECHAM5/MPI-OM	(Jungclaus et al., 2006)
13. Meteorological Research Institute, Japan	MRI-CGCM2.3.2	(Yukimoto et al., 2001)
14. National Center for Atmospheric Research, USA	PCM	(Washington et al., 2000)
15. National Center for Atmospheric Research, USA	CCSM3	(Collins et al. 2006)
16. Hadley Centre for Climate Prediction and Research / Met Office, UK	UKMO-HadCM3	(Gordon et al., 2000)

Os modelos provaram ter uma boa capacidade de simulação das características do clima atual, sendo os desvios iguais a 1,1^o e a 10%, respetivamente para a temperatura e precipitação médias globais. No que diz respeito às estimativas das variáveis climáticas no futuro, as projeções médias destes 16 modelos GCM calculadas para o último quartel do século XXI (2075-2099) apontam, para a grande região da Europa e Mediterrâneo, um aumento da temperatura média de 2°C, no caso de um cenário B1 de emissão de GEE mais otimista (Figura 2.2); no caso de um cenário A2⁸ mais pessimista, este aumento atinge 3°C a 4°C (IPCC, 2000).

⁸ O cenário B1 é um cenário mais cauteloso, com mais baixas emissões de GEE, ou seja, do qual advêm menores alterações climáticas. O cenário A2, embora não seja o mais extremo de todos os considerados pelo IPCC, é o cenário para o qual a maior parte dos modelos fizeram simulações.

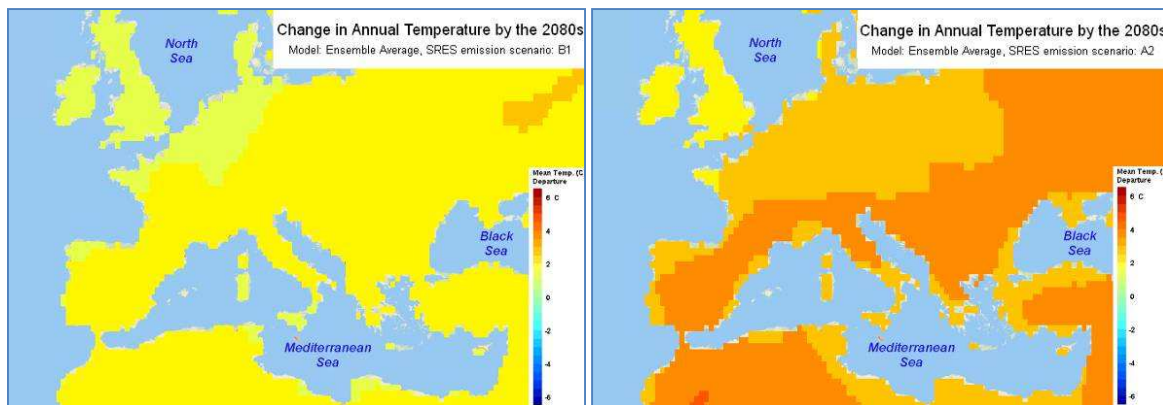


Figura 2.2 | Projeções para a temperatura (ano de 2080) para dois cenários de emissão de GEE: B1 (Esq.) e A2 (Dir.). Os dados plotados são, para cada pixel colorido, a média obtida pelos 16 modelos GCM listados no Quadro 2.2 (Maurer *et al.*, 2007, citado em <http://www.climatewizard.org>)

As previsões da magnitude das alterações futuras dos valores médios e extremos de precipitação revestem-se de maior incerteza, dada a enorme complexidade dos processos físicos envolvidos e a grande escala dos modelos climáticos (IPCC, 1996; Kittel *et al.*, 1998).

Assim, no que diz respeito à alteração da precipitação média são previstas alterações variando entre -35% a +120%, com grandes diferenças à escala regional (Figura 2.3): no sul da Europa e região do Mediterrâneo, as projeções apontam no sentido de uma diminuição da precipitação, acompanhando a estimada subida da temperatura prevista para o século XXI. Esta tendência é mais demarcada nas regiões do Sul: em Beja, por exemplo, a precipitação média projetada para o final do século XXI apresenta diminuições de 17% (Cenário B1) e 31% (Cenário A2). Também projeções realizadas em estudos mais recentes continuam a apontar para uma forte diminuição da precipitação média anual na região do Mediterrâneo (Rajczak *et al.*, 2013; Alfieri *et al.*, 2015).

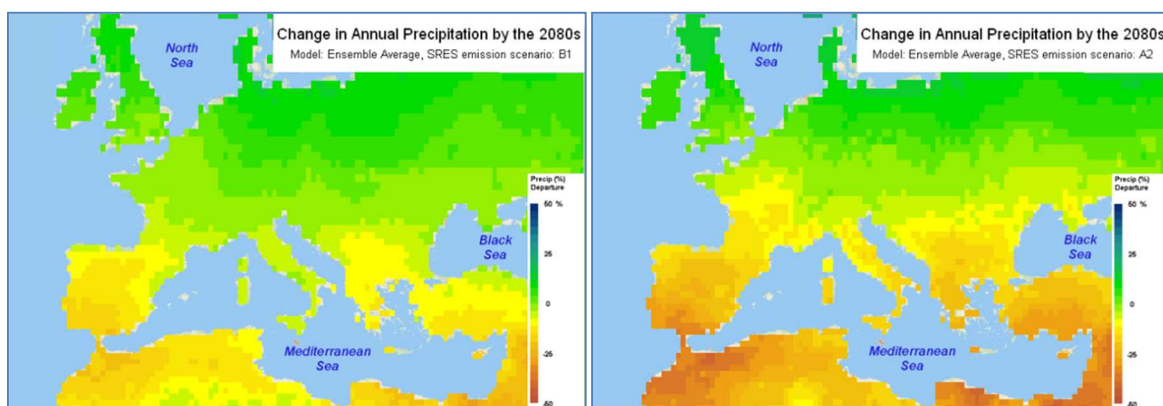


Figura 2.3 | Projeções para a precipitação (ano de 2080) para dois cenários de emissão de GEE: B1 (Esq.) e A2 (Dir.). Os dados plotados são, para cada pixel colorido, a média obtida pelos 16 modelos GCM listados no Quadro 2.2 (Maurer *et al.*, 2007, citado em <http://www.climatewizard.org>)

2.2.1.2 Projeções climáticas para Portugal

Em Portugal, a temática dos impactos devidos às AC tem sido objeto de vários projetos de investigação, sendo de destacar a contribuição dada pelo Projeto SIAM⁹ (“*Climate Change in Portugal, Scenarios, Impacts and Adaptation Measures*”), entre 1999 e 2006, e pelo projeto CLIMAAT (“*Clima e Meteorologia dos Arquipélagos Atlânticos*”). Este último projeto CLIMAAT, desenvolvido no âmbito da iniciativa comunitária INTERREG_III B, visava a implementação da cooperação científica destinada ao desenvolvimento de metodologias específicas para a abordagem do estudo da meteorologia e do clima das regiões insulares atlânticas.

Foi, no entanto, o Projeto SIAM que consistiu na primeira avaliação integrada dos impactos e medidas de adaptação às AC em Portugal Continental no século XXI. Os estudos realizados basearam-se em cenários do clima futuro prevendo os respetivos impactos. Estes últimos incidiram sobre um conjunto de setores socioeconómicos e sistemas biofísicos, designadamente: recursos hídricos, zonas costeiras, agricultura, saúde humana, energia, florestas e biodiversidade e pescas. Assim, as primeiras projeções realizadas no âmbito deste projeto apontava no sentido de um aumento da temperatura em consequência das AC, à semelhança do que se estima vir a ocorrer à escala mundial (Figura 2.4).

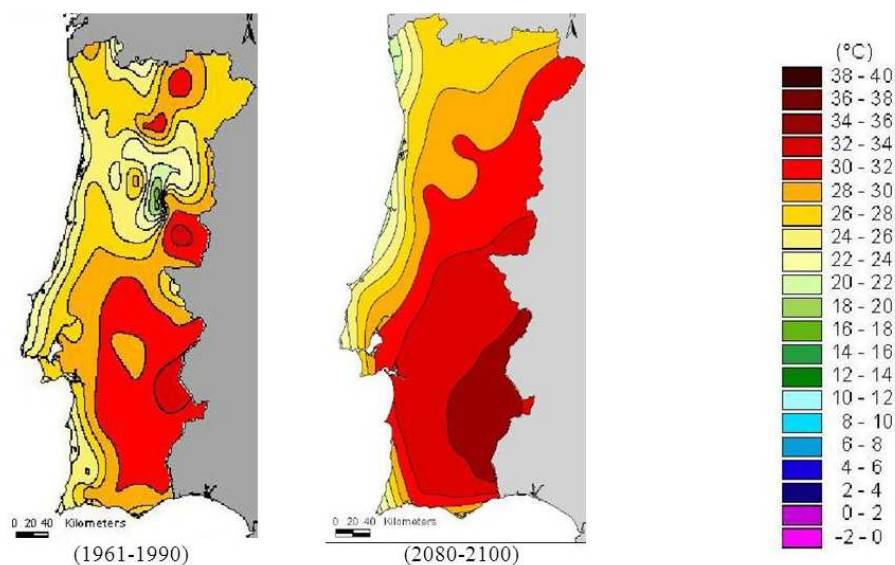


Figura 2.4 | Temperatura máxima de verão em Portugal Continental obtida com o modelo regional de clima HadRm (Fonte: SIAM, 2002): a) simulação de controle com observações entre 1961 e 1990; b) simulação com aumento de emissão de GEE (no período 2080-2100)

Foi ainda concluído que todos os índices climáticos relacionados com a temperatura exibiam também alterações. Assim, foi verificada uma tendência geral para um acréscimo da precipitação no semestre húmido e um decréscimo de precipitação anual e no semestre seco. Na Figura 2.5

⁹ O projeto, com o financiamento da Fundação Calouste Gulbenkian e da Fundação para a Ciência e a Tecnologia, foi desenvolvido em duas fases: a Fase I (SIAM), entre 1999 e 2001 (SIAM, 2002) e a FASE II (SIAM II), entre 2002 e 2006, que se focou no estudo de caso do Estuário do Sado, tendo os estudos sido alargados às Regiões Autónomas da Madeira e dos Açores (SIAM, 2006).

apresentam-se as alterações previstas para a precipitação anual para dois cenários (A2 e B2, o primeiro correspondendo a maiores emissões de GEE), verificando-se que a precipitação média projetada para o final do século XXI poderia apresentar diminuições até 50%, para um cenário mais gravoso e para a zona sul de Portugal. Os padrões espaciais para ambos os cenários são idênticos entre si e em relação às observações 1961 – 1990, apontando para o Sul mais quente, com menos geadas e precipitação do que o Norte (Santos *et al.*, 2001; Veiga da Cunha *et al.*, 2002).

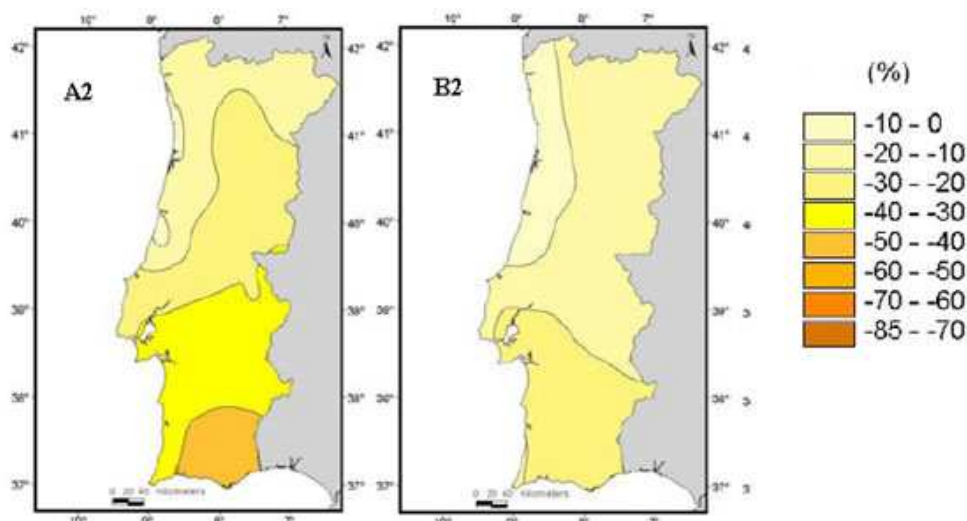


Figura 2.5 | Anomalia da precipitação anual para o cenário A2 e B2 em 2100 obtida com o modelo regional de clima HadRm (Fonte: SIAM, 2002)

Miranda *et al.*, 2002 verificaram que os diversos Modelos Regionais do Clima (*Regional Climate Models* – RCM – da terminologia anglo-saxónica) usados no projeto SIAM realizaram projeções dos valores de precipitação muito mais irregulares do que as da temperatura e verificou-se uma determinada dispersão nos resultados. No entanto, a generalidade dos modelos usados apontou para uma diminuição da precipitação anual em Portugal Continental como resultado do aumento da concentração de GEE. Contudo, esta tendência nem sempre é clara ou evidente (por exemplo, para a região Sul, no caso do modelo HadCM2) e a diminuição de precipitação média anual apresenta uma magnitude bastante variável no território nacional (podendo diminuir, por exemplo, na região Norte, entre 50 mm a 200 mm por ano, em função dos modelos e cenários adotados).

A ação concertada ACACIA¹⁰ constitui uma primeira iniciativa a larga escala para prever o clima considerando cenários de AC para diferentes regiões da Europa; os resultados desta ação encontram-se patentes em Parry (2000). Assim, esta última publicação previu uma diminuição anual da precipitação no Sul da Europa, da ordem de 1% por década, ao longo do século XXI).

¹⁰ Esta ação intitulada “*Assessment of potential Effects and adaptations for Climate Change in Europe*” foi financiada pela Comissão Europeia.

Mais recentemente, as projeções dos modelos globais de clima apresentados no último relatório do IPCC (2014), corroboram, igualmente para Portugal, a diminuição da precipitação para o período 2050-2074 (Figura 2.6 e Figura 2.7).

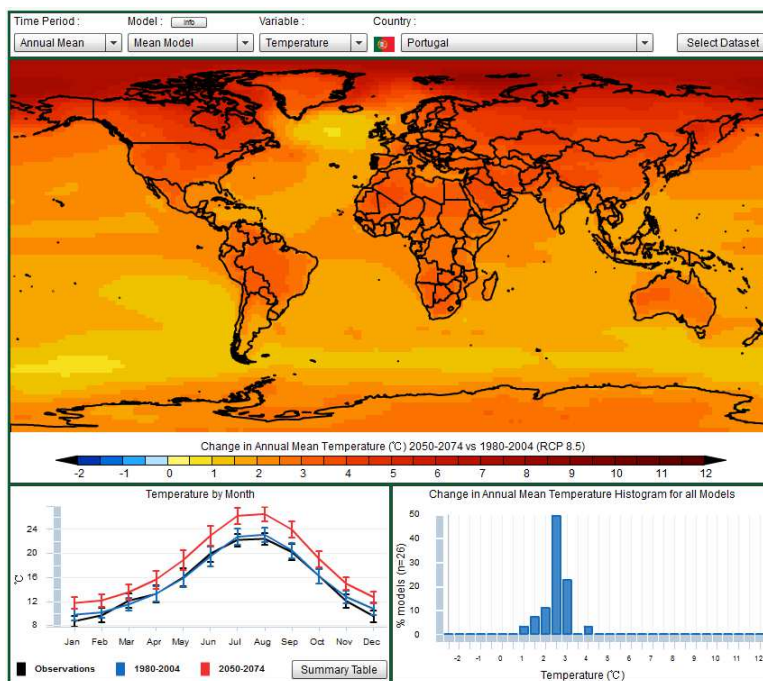


Figura 2.6 | Alteração de variáveis climáticas para Portugal para o cenário RCP 8.5. Temperatura média anual no período 2050-2074 (<http://regclim.coas.oregonstate.edu/visualization/gccv/cmip5-global-climate-change-viewer/index.html>, consultado em 21 de abril de 2018)

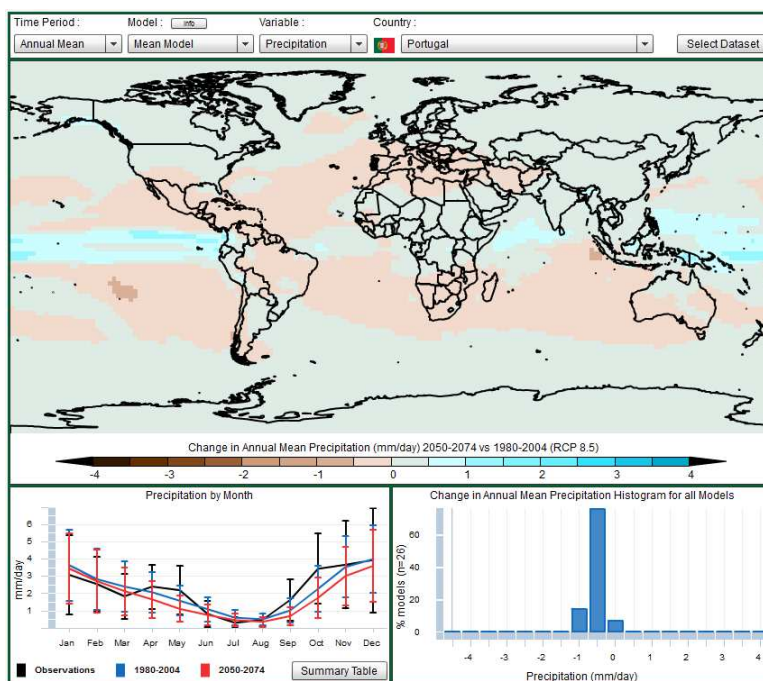


Figura 2.7 | Alteração de variáveis climáticas para Portugal para o cenário RCP 8.5. Precipitação média anual no período 2050-2074 (<http://regclim.coas.oregonstate.edu/visualization/gccv/cmip5-global-climate-change-viewer/index.html>, consultado em 21 de abril de 2018)

Também em 2014, e no âmbito da realização dos Planos de Gestão de Região Hidrográfica (PGRH) do 2º ciclo foram analisadas as perspetivas de evolução do clima ao longo do século XXI, tendo por base os cenários desenvolvidos no âmbito dos Projetos SIAM e ENSEMBLES. No caso da Região do Tejo e Ribeiras do Oeste (RH5), verificou-se que as projeções preveem, para 2100, um aumento da temperatura do ar entre 4 e 6°C, no período de verão, e entre 2 e 3°C, no período de inverno. No que diz respeito à precipitação, estas previsões preveem ainda: i) o aumento da precipitação durante os meses de inverno (que poderá atingir os 10%); ii) a diminuição acentuada da precipitação no período de verão e outono (que poderá atingir os 60%); iii) uma maior incidência de fenómenos extremos, com o aumento de episódios de precipitação intensa durante curtos períodos no inverno (APA, 2014).

Em 2015, o IPMA, I.P., em parceria com o Instituto Dom Luiz da Universidade de Lisboa e integrado no projeto "localwarming" do programa ADAPT¹¹, desenvolveu o "Portal do Clima" que é uma plataforma da rede WEB (World Wide Web - WWW) que contém informação do clima e dos riscos associados às AC em Portugal (<http://portaldoclima.pt/pt/>). O portal contém um conjunto de dados climáticos observados e modelados, que definem igualmente projeções com tendência de redução para a precipitação (Figura 2.8).

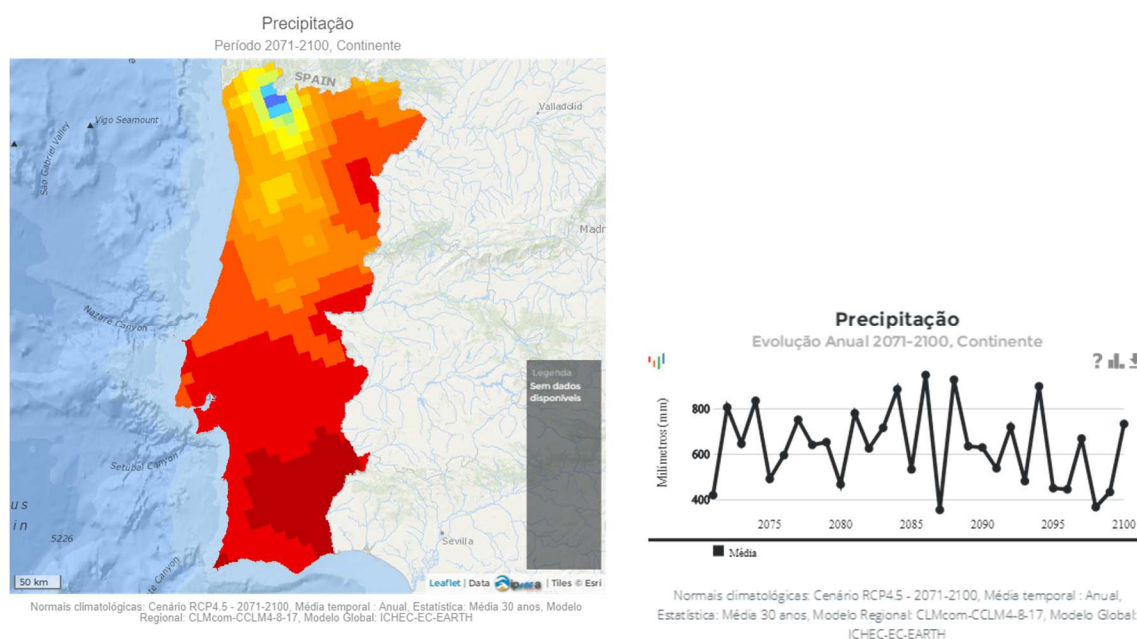


Figura 2.8 | Precipitação para Portugal prevista pelo Programa ADAPT no período 2071-2100: a) Projeções para o cenário RCP4.5; b) Evolução anual da precipitação no continente (Fonte: <http://portaldoclima.pt/pt/#>, consultado a 28 de maio de 2018)

¹¹ O programa ADAPT é guiado pelos termos estabelecidos no Memorando de Entendimento entre Portugal, Noruega, Islândia e Liechtenstein, no âmbito do Mecanismo Financeiro do Espaço Económico Europeu (MFEEE/EEA-Grants) para apoiar financeiramente a atuação na área de "Adaptação às Alterações Climáticas" em Portugal. Posteriormente o programa contou com contribuições do grupo de coordenação da ENAAC (Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas).

Os primeiros resultados deste projeto, correspondentes ao clima previsto até ao final do século, estão disponíveis no portal identificando as anomalias em relação à normal de referência 1971-00 e utilizando dois cenários socioeconómicos contrastantes. Foi utilizado como menos gravoso o cenário RCP 4.5 correspondente a uma evolução socioeconómica que controla o aumento das emissões com gases de efeito de estufa, atingindo um máximo na concentração em meados do séc. XXI. Em contraste, o cenário mais gravoso RCP 8.5 representa um crescimento contínuo nas emissões durante o séc. XXI (*vide* Quadro 2.1).

2.2.2 Importantes projetos a nível europeu neste domínio

FP6 ENSEMBLES, "*Climate change and its impacts at seasonal, decadal and centennial time scales*", (2004-2009), www.ensembles-eu.metoffice.com. O projeto faz projeções do clima para diversos cenários de AC com base nos resultados das simulações de um vasto conjunto (*ensemble*) de modelos GCM e RCM de alta resolução, diminuindo a incerteza inerente às projeções de cada um dos modelos na representação física, química e biológica do Sistema Terra. Na prática foram, pela primeira vez, feitas previsões com um conjunto alargado de modelos para uma variedade de escalas de tempo (sazonais, decenais e mais longas) e de escalas espaciais (globais, regionais e locais). Este *ensemble* de modelos foi igualmente usado para estudar cenários de usos futuros da água integrados com cenários de AC, incluindo cenários de não-intervenção e de estabilização de usos. O projeto relacionou as previsões do *ensemble* de modelos com os impactos a nível de agricultura, saúde, segurança alimentar, energia, recursos hídricos, seguros e gestão de riscos associados às AC; abordou também os extremos climáticos, incluindo mudanças da intensidade da precipitação e na frequência de secas (Van der Linden and Mitchell, 2009). Esta abordagem forneceu uma base para avaliação quantitativa do risco das AC e da variabilidade climática. Igualmente importante foi o processo exaustivo de validação dos modelos. Assim, para controle de qualidade, as estimativas geradas pelo *ensemble* de modelos para o século XX foram comparadas com dados climatológicos históricos (a escalas de tempo sazonais e decenais) existentes para a Europa. Resultou deste projeto um importante acervo de projeções climáticas com 25 km de resolução e cobrindo os períodos de 1951-2050 e de 1951-2100 para o cenário SRES A1B, disponível para a comunidade técnica e científica.

O esforço de modelação do clima a nível europeu e a implementação de um arquivo de dados com projeções realizados no âmbito do projeto ENSEMBLES teve a sua génese no projeto PRUDENCE "*Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects*", (2001-2004) e prossegue com a iniciativa CORDEX "*Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment*". Esta última, de que se falará em 2.3.2, constitui um programa de investigação do clima global (World Climate Research Programme – WCRP) com um arquivo de projeções climáticas em expansão contínua.

FP6 CECILIA, “*Central and Eastern Europe Climate Change Impact and Vulnerability Assessment*”, (2006-2009), <http://www.cecilia-eu.org/>. O Projeto teve por objetivo melhorar a compreensão das AC no clima da Europa Central Oriental e seus impactos em diversos setores (floresta, agricultura, hidrologia e qualidade do ar). Dada a complexidade da região em estudo, foram realizadas simulações de alta resolução, usando modelos climáticos regionais (com uma resolução de 10 km), tendo, em particular, sido modelado o impacto das AC em grandes áreas urbanas e industriais¹². O projeto desenvolveu: i) estudos hidrológicos, de qualidade da água e de gestão dos recursos hídricos (centrando-se em bacias hidrográficas de dimensão média e na zona costeira do mar Negro); ii) estudos da qualidade do ar em áreas urbanas no denominado Triângulo Negro (região fortemente poluída junto às fronteiras da República Checa, Polónia e Alemanha); iii) estudos do impacto das AC na agricultura e na floresta. Adicionalmente foram desenvolvidos métodos estatísticos de *downscaling* para verificação dos resultados dos modelos RCM e foi feita uma comparação dos resultados obtidos por diversas técnicas de *downscaling* estatístico.

FP6 WATCH, “*Water and Global Change*”, (2007-2011), <http://www.eu-watch.org/nl/25222705-Home.html>. Tratou-se de um projeto que reuniu comunidades de investigadores e técnicos nas áreas do clima, da hidrologia e dos recursos hídricos para avaliação dos impactos das AC nos recursos hídricos e nos principais setores económicos e sociais com eles relacionados. Assim, o projeto analisou, quantificou e estimou os valores atuais e futuros das diversas variáveis do ciclo da água e dos recursos hídricos, avaliando ainda as incertezas destas estimativas. O projeto incidiu, em particular, nos seguintes aspetos: i) análise do atual ciclo global da água, incluindo as alterações observáveis nos extremos (secas e inundações); ii) avaliação da forma como o ciclo global da água e os extremos respondem no futuro a alterações, considerando as emissão de GEE e mudanças no uso do solo; iii) avaliação das incertezas nas previsões da modelação integrada do clima, da hidrologia e do uso do solo, usando um *ensemble* de modelos e um conjunto extenso de observações meteorológicas e hidrológicas; iv) desenvolvimento de uma *framework* de modelação para avaliar a vulnerabilidade futura do recurso água e os riscos dos principais setores relacionados (agricultura, natureza, energia, abastecimento e indústria da água potável) e v) realização de estimativas quantitativas e qualitativas abrangentes e de previsões da vulnerabilidade dos recursos hídricos para o século XXI.

FP6 SCENES, “*Water scenarios for Europe and neighbouring countries*”, (2006-2011), www.environment.fi/syke/scenes. O projeto desenvolveu e analisou um vasto conjunto de cenários futuros sobre a disponibilidade de água doce na Europa até 2025, cobrindo todo o continente até ao Cáucaso e os Montes Urais bem como o Mediterrâneo, incluindo os países do norte da África e do Próximo Oriente. Estes cenários tiveram por objetivo: i) traçar uma referência para o planeamento estratégico a longo prazo do desenvolvimento dos recursos hídricos da Europa; ii) alertar os

¹² Para a avaliação dos impactos das AC nos extremos na região em estudo foram decisivas não só a alta resolução espacial e temporal das simulações dos RCM como também a informação proveniente das densas redes de observação existentes.

decisores políticos e *stakeholders* para os problemas emergentes e iii) permitir, às autoridades de gestão de bacias hidrográficas, o desenvolvimento de planos de bacia considerando as incertezas que existem num processo estratégico de planeamento a longo prazo. O projeto desenvolveu um conjunto de cenários em termos qualitativos e quantitativos. Os cenários qualitativos (*storylines*) forneceram uma imagem internamente consistente da evolução dos recursos hídricos em diferentes partes da Europa até 2025. Esta análise qualitativa também se focou em cenários de qualidade da água, aspetos ecológicos e hidrológicos, dedicando especial atenção às exigências da DQA. Os cenários quantitativos, produzidos por modelos de *estado-da-arte*, complementaram as *storylines*, fornecendo informação numérica e mostrando tendências não aparentes nos cenários qualitativos.

FP7 ACQWA “*Assessment of climatic change and impacts on the quantity and quality of water*”, (2008-2014), <http://www.acqwa.ch/>. O projeto avaliou os impactos das AC nos recursos hídricos (quantidade e qualidade da água) em regiões montanhosas, cujas condições ambientais específicas foram consideradas ser particularmente afetadas pelo rápido aumento das temperaturas, secas prolongadas e extremos de precipitação. Foram usadas técnicas de modelação para estudar a influência das AC nos escoamentos de rios a várias escalas de tempo e espaço. Assim, o uso de modelos climáticos regionais forneceu informações essenciais sobre a mudança de padrões de temperatura, precipitação, neve e gelo e alimentaram modelos hidrológicos para avaliar as alterações na sazonalidade, quantidade e incidência de eventos extremos em várias bacias hidrográficas de montanha. Foram analisadas as respostas às alterações dos regimes hidrológicos dos ecossistemas aquáticos e dos setores (hidroeletricidade, turismo, agricultura), bem como as implicações para a saúde da alteração da qualidade da água. Também foram analisadas as interações entre alterações do uso do solo e da água, tendo sido proposto um conjunto de medidas para adaptação às AC.

FP7 REFRESH, “*Adaptive Strategies to Mitigate the Impacts of Climate Change on European Freshwater Ecosystems*”, (2010-2013), <http://www.refresh.ucl.ac.uk/>. O projeto desenvolveu uma *framework* que permite aos gestores de recursos hídricos o desenvolvimento de políticas e estratégias para a conceção de programas de restauro de ecossistemas de água doce por forma a: i) conseguir o bom estado ecológico das massas de água; ii) manter espécies prioritárias em conformidade com as diretivas da EU; iii) adaptar-se aos impactos das AC e aos futuros usos do solo e da água, à escala local e da bacia hidrográfica. O projeto contribuiu, em particular, para a compreensão de como os ecossistemas responderão às AC, baseando-se na análise de três componentes do clima que agem como pressões: i) aumento da temperatura; ii) alterações nos níveis de água e dos regimes de escoamento e iii) excesso de nutrientes. O projeto permitiu o avanço na investigação, nomeadamente nos seguintes aspetos: i) compreensão de como o funcionamento dos ecossistemas de água doce é afetado pelas AC; ii) modelação integrada de processos hidrológicos e ecológicos e iii) desenvolvimento de uma estratégia e de medidas de adaptação às AC no contexto europeu que devem ser adotadas para minimizar as consequências negativas destas, em combinação com mudanças no uso do solo e da água, na carga de poluição, na biodiversidade e na qualidade e quantidade de água doce.

FP7 PREPARED, “*Adaptation of water supply and sanitation systems to cope with climate change*”, (2010-2014), <http://www.prepared-fp7.eu/>. O projeto, que envolveu doze entidades gestoras de água europeias, pretendeu avaliar o impacto das AC na “indústria da água”, ou seja nos sistemas de abastecimento de água e de drenagem de águas pluviais e residuais. Em termos de investigação pretendeu-se usar os cenários de AC do IPCC (que têm uma perspetiva global e necessitam ser desagregados para o nível local) por forma a fornecer informação aos decisores que têm que avaliar os custos dos investimentos para adaptação aos riscos das AC. As soluções de adaptação basearam-se em abordagens da gestão do risco no ciclo urbano da água, envolvendo, nomeadamente, o desenvolvimento de planos de segurança inovadores. O resultado do projeto consistiu no desenvolvimento de uma plataforma para otimizar a gestão integrada dos sistemas de abastecimento de água e de drenagem de águas residuais e pluviais capaz de lidar melhor com novos cenários de AC. O projeto incluiu igualmente; i) o desenvolvimento de sistemas complexos de monitorização e de sensores de observação visando a exploração das infraestruturas existentes através de sistemas de controle em tempo real; ii) a integração e manipulação de dados complexos; iii) novos conceitos de dimensionamento e de diretrizes mais flexíveis e robustas para operação de infraestruturas. O projeto envolveu a comunidade local na identificação de problemas e na definição de soluções de adaptação aceitáveis, nomeadamente através de processos de aprendizagem interativos (*e-learning*).

FP7 MARSOL, “*Demonstrating Managed Aquifer Recharge as a Solution to Water Scarcity and Drought*”, (2013-2016), <http://www.marsol.eu/>. O principal objetivo deste projeto foi demonstrar que a Recarga Artificial de Aquíferos (Managed Aquifer Recharge (MAR), da terminologia anglo-saxónica) constitui uma abordagem viável para lidar com a escassez de água prevista a longo prazo, podendo igualmente constituir uma solução para combater a intrusão salina em zonas costeiras e proporcionar a reutilização de águas residuais com um tratamento final da qualidade da água através da infiltração no solo. Assim, o projeto definiu uma estratégia inovadora de gestão da água que prevê a recolha de água em períodos de abundância e no seu armazenando em aquíferos para uso em períodos de escassez. O projeto empreendeu modelação física e numérica dos processos e a análise da viabilidade técnica das soluções; enfrentou igualmente desafios na implementação destas soluções, que se relacionaram com o direito administrativo da EU. A abordagem do projeto consistiu na escolha de oito locais de demonstração (Grécia, Portugal, Espanha, Malta, Itália e Israel), caracterizados por diferentes origens e qualidades de água (água do mar dessalinizada, água de rios e águas residuais tratadas) e analisou diferentes técnicas e soluções de armazenamento de água no solo. Os resultados obtidos nos diferentes locais de demonstração permitiram o desenvolvimento de diretrizes para identificação dos locais mais indicados para MAR bem como para monitorização das estratégias implementadas.

Horizon 2020 BINGO, “*Bringing INnovation to onGOing water management - a better future under climate change*”, (2015-2019), <http://www.projectbingo.eu/>. O projeto BINGO pretende desenvolver soluções para uma série de desafios específicos relacionados com o clima, em particular para os que dizem respeito aos recursos de água altamente vulneráveis e de importância estratégica. Em particular, o projeto tem os seguintes objetivos específicos: i) desenvolver para o setor da água

melhores previsões do clima, nomeadamente tendo em conta os cenários do *5th Assessment Report* do IPCC do ano de 2014; ii) reduzir a incerteza de previsões de clima e desenvolver estratégias de resposta para ajudar a sociedade a gerir esta incerteza; iii) construir cenários do clima no futuro próximo e avaliar os seus impactos no ciclo da água; iv) gerar e disponibilizar o acesso a informações sobre cenários de clima a gestores de água e outros *stakeholders*, permitindo-lhes agir a diversos níveis (local, regional e europeu), usando estratégias de gestão de risco. O projeto envolve centros de investigação, autoridades e utilizadores do setor da água, bem como indústrias e empresas do mesmo setor, e estende-se por seis casos de estudo do Norte ao Sul da Europa, contemplando um conjunto diferenciado de condições climáticas bem como usos da água e tipologias de pressões díspares. Em particular, o projeto BINGO visa os seguintes resultados: i) elaboração, para diferentes cenários climáticos, das previsões das características climáticas (condições médias de precipitação, temperatura, evapotranspiração) para os próximos 15 anos, incluindo eventos extremos (frequência, intensidade, áreas afetadas, etc.); ii) avaliação dos balanços hídricos e consequentes alterações na recarga e no escoamento superficial e, em consequência, efeitos sobre os recursos hídricos superficiais e subterrâneos disponíveis para as diferentes atividades socioeconómicas; iii) avaliação dos impactos dos eventos extremos (cheias e secas) sobre os recursos hídricos, incluindo as cheias estuarinas; iv) avaliação da evolução da intrusão salina, incluindo os efeitos devidos à subida global do nível do mar; v) avaliação dos cenários socioeconómicos e impactos associados sobre a qualidade dos recursos hídricos sob as novas condições climáticas, considerando diferentes fontes poluentes associadas aos diferentes setores socioeconómicos; vi) identificação e avaliação de conflitos no uso da água, para diferentes cenários socioeconómicos, nas novas condições climáticas e vii) desenvolvimento de um portfolio de estratégias de adaptação às AC e de gestão adaptativa da água que vise a preservação da qualidade e quantidade dos recursos hídricos, para diferentes contextos e problemas.

2.3 Estado da arte nas alterações climáticas em barragens

2.3.1 Impactos das alterações climáticas nas barragens

As barragens, que têm como finalidade a criação de reservas nos períodos de excesso hídrico para uso posterior nos períodos mais secos, constituem uma solução para combater a escassez de água. A otimização da exploração de albufeiras permite uma melhor gestão do recurso “água”. As AC e o aumento da frequência e da severidade das condições meteorológicas extremas, incluindo cheias e secas, permite que uma correta exploração da albufeira seja uma solução para aumentar o uso eficiente da água, constituindo uma medida alternativa de poupança deste recurso “na fonte” e dando resposta a uma prioridade atual da União Europeia que preconiza o incentivo de uma cultura de poupança e redução de perdas recorrendo a tecnologias e práticas de boa eficiência hídrica (European Commission, 2007 a)).

As AC podem colocar também problemas na exploração das estruturas hidráulicas existentes: no setor hidroelétrico, por exemplo, as projeções apontam uma redução de 20–50% do potencial

hidroenergético nos países da bacia do Mediterrâneo, para o ano de 2070 (Alcamo *et al.*, 2007; Kundzewicz *et al.*, 2007). Estes impactos negativos sentir-se-ão naturalmente na operação e exploração de estruturas hidráulicas existentes.

Por outro lado, os descarregadores de cheia das barragens constituem um exemplo de infraestrutura importante, cujo sub-dimensionamento pode ter impacto na segurança de pessoas e bens. Com efeito, o aumento dos valores de caudais em consequência das AC pode resultar no agravamento das cheias efluentes a jusante, e mesmo, no caso mais gravoso, conduzir ao galgamento e rotura da barragem. Na prática, os descarregadores das barragens são dimensionados numa hipótese de estacionariedade (Kundzewicz *et al.*, 2007; Milly *et al.*, 2008) e, do ponto de vista do dimensionamento com base em situações meteorológicas extremas, uma projeção do aumento da frequência de precipitações mais intensas implica a diminuição do período de retorno dos escoamentos (e do do caudal de dimensionamento) e, conseqüentemente, o tempo de vida da obra encurta (Figura 2.9).

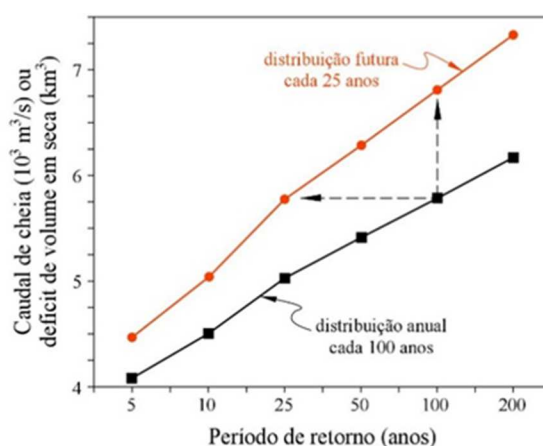


Figura 2.9 | Relação característica entre a alteração do período de retorno e a correspondente variação na intensidade de cheias e secas (adaptado de Lehner *et al.*, 2006)

As variáveis climáticas importantes para as barragens relacionam-se essencialmente com a precipitação, a evaporação e a sua relação com o escoamento que aflui às albufeiras. No que diz respeito aos escoamentos, os impactos das AC costumam ser avaliados à escala da bacia hidrográfica. Assim, as projeções das variáveis climáticas provenientes dos modelos de GCM são posteriormente desagregadas para escalas hidrológicas e são usadas como *input* para os modelos hidrológicos no sentido de avaliar o impacto das mudanças climáticas na hidrologia à escala da bacia hidrográfica. Os primeiros estudos realizados neste âmbito a nível mundial surgiram em meados da década de 1980, com Gleick (1987). Este autor usou vários cenários (hipotéticos e derivados de projeções de modelos GCM) e o modelo hidrológico do rio Sacramento para avaliar o impacto das AC na Califórnia. Para todos os 18 cenários estudados, estimou o aumento nos escoamentos de inverno e decréscimo nos de verão.

Abordagens semelhantes foram conduzidas para a Europa a partir da década de 1990 (Bélgica, Suíça e Grécia), na sequência das quais se verificou uma tendência para o decréscimo dos caudais nas últimas décadas nos rios do Sul da Europa. Em Portugal, a análise feita no âmbito dos PGRH

do 2º ciclo permitiu verificar a redução do escoamento médio anual praticamente em todas as regiões. No caso da Região do Tejo e Ribeiras do Oeste (RH5), e a acompanhar as alterações de temperatura e precipitação, previu-se a redução do escoamento médio anual, entre 10 e 50%, que corresponde a uma diminuição desta grandeza entre 1213 hm³/ano e 6066 hm³/ano (APA, 2014; Oliveira *et al.*, 2010).

Note-se que nas bacias internacionais ibéricas, embora as alterações com a precipitação tenham sido associadas a decréscimos no escoamento (López-Moreno *et al.*, 2010), há muito provavelmente diversas causas para estas mudanças, nomeadamente o elevado nível de influências antropogénicas (Cudennec *et al.*, 2007; López-Moreno *et al.*, 2008).

De uma forma geral, nos estudos existentes, não são realizadas análises para os extremos. Com efeito, verifica-se que a maior parte dos estudos de mudanças climáticas se concentram nos escoamentos médios à escala da bacia hidrográfica sendo a análise de eventos extremos, tais como as cheias, tipicamente confinados a menores áreas e casos de estudo.

No entanto, apesar dos impactos das AC nas barragens derivarem das mudanças expectáveis sobre o regime de caudais afluentes, nomeadamente em períodos de seca, eles podem ser igualmente agravados nos períodos de cheia. Em particular, e tal como já referido, alterações na frequência, intensidade e duração da precipitação acarretam consequências para o dimensionamento dos descarregadores das barragens, bem como para a estimativa do volume reservado para armazenamento de segurança.

2.3.2 Cheias e dimensionamento de obras hidráulicas

2.3.2.1 Alterações observadas e projeções

Atualmente, o número de estudos que investigam o impacto das AC nas cheias à escala europeia continua a ser escasso.

Lehner *et al.* (2006) apresentam uma abordagem continental dos possíveis impactos de mudanças globais (não só climáticas, mas também nas alterações do uso da água) na frequência futura da ocorrência de cheias na Europa, usando o modelo hidrológico integrado WaterGAP. Os resultados identificam “regiões críticas” para as quais é prevista a ocorrência de mudanças significativas nas cheias como consequência de cenários de AC. As regiões mais vulneráveis ao aumento da frequência da ocorrência de cheias são as regiões do Norte e Nordeste da Europa (Suécia, Finlândia, norte da Rússia), mas nos territórios a Sul, nomeadamente na Península Ibérica, verifica-se, igualmente, uma tendência para o aumento da frequência da ocorrência de cheias. Em algumas regiões críticas, eventos hoje com períodos de retorno de 100 anos podem vir a ocorrer cada 10–50 anos em 2070 (Figura 2.10).

Esta conclusão está em concordância com as tendências das projeções no caso de Portugal, onde se têm registado longos períodos de seca seguidos de precipitações curtas, mas muito intensas. Estes eventos pluviosos de curta duração podem indiciar um risco acrescido de cheias. Também os estudos realizados para o território nacional no princípio do século XXI concluíram que, para além

da concentração da precipitação nos meses de inverno, haverá uma tendência para aumento da ocorrência de chuvadas e do risco de cheias, especialmente na região do norte de Portugal, onde as cheias se tornarão mais frequentes e intensas em consequência das AC (SIAM, 2002). É de esperar ainda que as inundações provocadas pelas cheias nos troços dos rios nas regiões costeiras possam ser agravadas pela subida do nível do mar associada às AC.

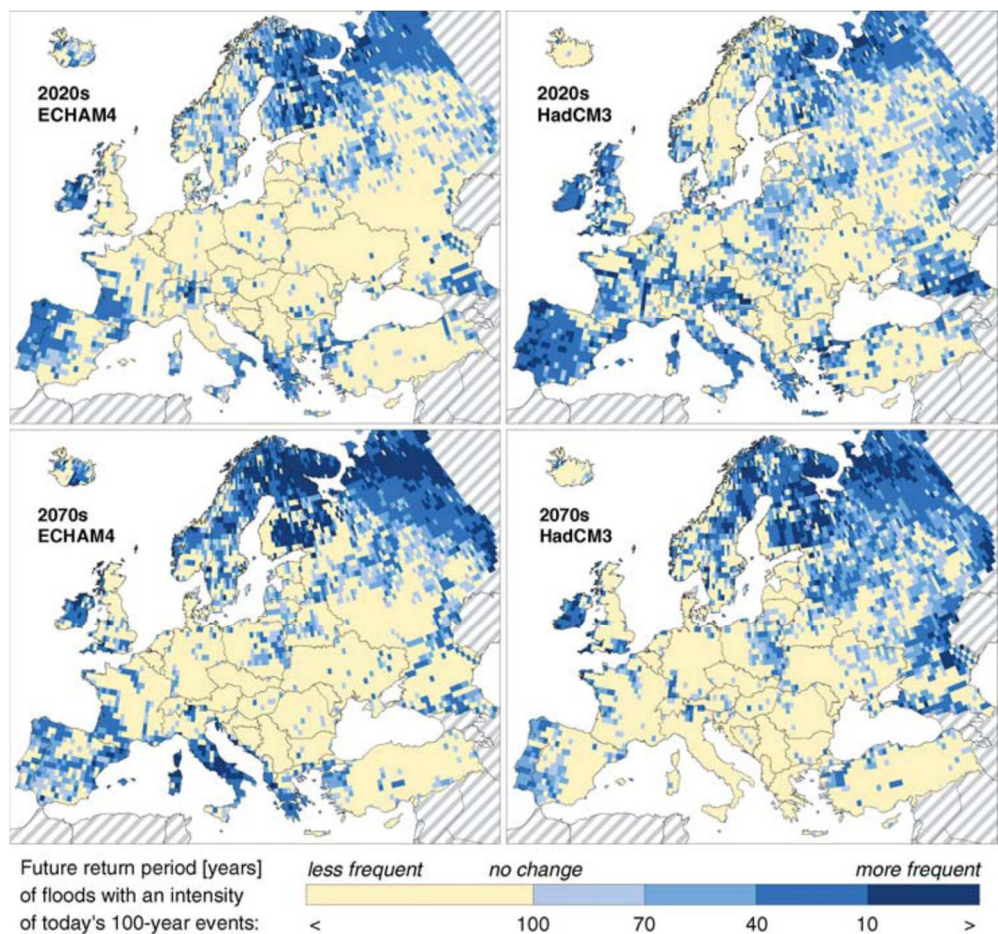


Figura 2.10 | Alteração do período de retorno de 100 anos, baseada na comparação entre o clima atual (1961-1990) e simulações para os anos de 2020 e 2070 (modelos GCM ECHAM4 e HadCM3; valores calculados com modelo WaterGAP)

Estas são igualmente as conclusões de Fowler *et al.* (2007) que, a partir do cenário SRES A2 e de seis modelos RCM integrando resultados do projeto PRUDENCE, estimaram as alterações na precipitação extrema na Europa para o período 2070-2100. Segundo estes autores, vários modelos preveem, para o Noroeste da Península Ibérica, a ocorrência de maiores valores de precipitação diários com período de retorno (T) de 5 anos. Para precipitações diárias com T da ordem de 5 e 25 anos, apesar de, pontualmente, alguns modelos preverem diminuições da ordem de 10% a 20% em algumas partes do Alentejo e na região de Lisboa, a generalidade dos modelos prevê aumentos variando entre 0% e 20% para todo o país, podendo suplantar os 20% na região norte. Para precipitações de 10 dias, para os referidos T, a generalidade dos modelos prevê aumentos de valores para Portugal Continental, com alguma variabilidade de resultados entre os vários modelos.

Acero *et al.* (2011) constataram que eventos extremos raros, de longo período de retorno, estão a aumentar em frequência, especialmente no outono nas regiões do Sul e do Centro Oeste da Península Ibérica. Estas tendências não foram ainda atribuídas com confiança ao aumento da concentração atmosférica de gases de estufa e não podem ser extrapoladas para o futuro.

Existem, no entanto, outras projeções em desacordo com esta tendência do aumento da magnitude das cheias na Península Ibérica e, em especial, em Portugal não é claro neste momento o que se deve esperar em termos de precipitação intensa. Vários estudos observam uma tendência para o aumento da precipitação intensa extrema, mas apresentam diferenças regionais. Tal como referido, Fowler *et al.* (2007) constataram que apesar de alguns modelos RCM preverem aumentos significativos no Noroeste da Península Ibérica (um deles, mais de 20%), outros há que preveem pequenos aumentos (inferiores a 10%) ou mesmo decaimento para a mesma região. García *et al.* (2007) documentaram uma diminuição das precipitações intensas nas regiões ocidentais e do Sudoeste da Península Ibérica.

Hall *et al.* (2014) apresentam um estado da arte abrangente dos mecanismos que provocam a alteração dos padrões de cheias na Europa, nomeadamente considerando a influência das AC. De uma forma geral, estimaram que, no fim do século XXI, as AC tenham modificado o padrão das cheias que ocorrem na Europa de forma complexa:

- decréscimos nos picos de cheia reportados no Norte da Europa, causados pelo aumento da temperatura que reduz a acumulação de neve no inverno conduzindo a menos água na primavera (Andréasson *et al.*, 2004; Arheimer and Lindström, 2015; Alfieri *et al.*, 2015; Roudier *et al.*, 2016; Donnelly *et al.*, 2017);
- forte decréscimo na precipitação anual no Mediterrâneo com redução da magnitude das cheias nesta região (Rojas *et al.*, 2012; Rajczak *et al.*, 2013; Alfieri *et al.*, 2015);
- projeções com sinais contrários são reportadas para a Europa Central e Ilhas Britânicas (Kay and Jones 2012; Alfieri *et al.*, 2015).

Na atual década e essencialmente após a publicação dos últimos relatórios do IPCC, têm sido conduzidos estudos que apresentam resultados concordantes com estas últimas projeções. Estes utilizam os cenários RCP que, tal como já foi referido, cobrem uma gama de aquecimento global que varia de 0,3-1,7°C para o cenário RCP 2.6 e de 2,6-4,1°C para o cenário RCP 8.5 (Collins *et al.*, 2013; James *et al.*; 2017).

Em particular, Gosling *et al.* (2016) reportam resultados divergentes para a Europa Central e região do Mediterrâneo (nomeadamente na bacia do rio Tejo). As projeções realizadas concluíram a ocorrência, por exemplo no caso do rio Reno, de pequenas alterações positivas e negativas (atingindo menos de 10% para 1°C, 2°C e 3°C de aquecimento global) para os escoamentos máximos (representados por 5% de probabilidade de não excedência). Pelo contrário, no caso do rio Tejo, foram previstas fortes reduções destes escoamentos (até 30% para 3°C de aumento da temperatura global). Estas projeções de redução da magnitude das cheias na região do Mediterrâneo estão em linha de concordância com as conclusões de outros estudos que realizam projeções com a mesma tendência de redução (Rojas *et al.*, 2012 e Alfieri *et al.*, 2015).

Também, muito recentemente, Thober *et al.* (2017) investigaram o impacto das AC nas cheias na Europa na hipótese do aumento global da temperatura de 1,5°C, 2°C e 3°C. Estes são avaliados usando *ensemble* de simulações com três modelos hidrológicos (HMs, Noah-MP, PCR-GLOBWB) forçados por cinco modelos GCM para três cenários RCP (2.6, 6.0 e 8.5). Os impactos das AC são quantificados para escoamentos máximos e eventos de cheia, representados por 10% de probabilidade de excedência e escoamentos diários máximos anuais, respetivamente. Os resultados apontam a região do Mediterrâneo como extremamente sensível às AC, particularmente a Península Ibérica e os Balcãs, com redução dos escoamentos máximos de 11% (1,5°C) a 30% (3°C). As regiões Atlântica e Continental podem ser consideradas como de transição entre a redução no Sul e o aumento no Norte da Europa; nestas últimas zonas, as mudanças são normalmente inferiores a 10% em magnitude. No que diz respeito a cheias, as projeções apontam para mudanças pouco significativas (de uma forma geral, inferior em 10% em magnitude) mas reduções mais significativas são previstas para o Mediterrâneo (17% em magnitude).

2.3.2.2 Modelos e métodos para estimar os riscos de cheias englobando as alterações climáticas

Do ponto de vista da Engenharia Hidráulica é importante conhecer os potenciais impactos das AC nos escoamentos à escala da bacia hidrográfica, nomeadamente para dimensionamento das obras hidráulicas. De acordo com a prática corrente, os modelos hidrológicos matemáticos para a análise de cheias e cálculo do caudal de ponta para dimensionamento de descarregadores de cheias de barragens são, essencialmente, de dois tipos: i) modelos probabilísticos, que utilizam séries hidrológicas de escoamentos; ii) modelos determinísticos baseados nos processos físicos, que procuram reproduzir as leis físicas que regem os fenómenos, em particular da precipitação e do escoamento.

A via usual para empreender o estudo do impacto das AC nos escoamentos à escala da bacia hidrográfica baseia-se no uso dos resultados de modelos GCM para obter projeções do clima para uma série de cenários de emissões de GEE. Basicamente, as projeções futuras do clima obtidas dos modelos GCM são sujeitas a um *downscaling*¹³ para o local de estudo (tipicamente à escala da bacia hidrográfica) e são introduzidas num modelo hidrológico para avaliar os escoamentos futuros. Trata-se à partida de uma abordagem adequada para incorporar os efeitos das alterações climáticas, mas levanta questões.

¹³ *Downscaling* é a denominação técnica do processo de usar a informação gerada para largas escalas e fazer previsões para escalas locais. Existem duas abordagens para fazer o *downscaling* de informação climatológica: dinâmica e estatística. A primeira requer o uso de modelos climáticos de alta resolução num sub-domínio regional, usando dados observados ou resultados de modelos climáticos de baixa-resolução como condições de fronteira. Estes modelos usam princípios físicos para reproduzir o clima local, mas são computacionalmente exigentes. O *downscaling* estatístico é um processo a duas fases e consiste em: i) o desenvolvimento de relações estatísticas entre grandezas climatológicas locais (e.g., temperatura e precipitação) e *large-scale predictors* (e.g., campo de pressões), e ii) a aplicação destas relações aos resultados das simulações de GCM para simular as características do clima local no futuro.

Em primeiro lugar, as ferramentas que existem para o estudo dos impactos das AC nos processos hidrológicos e hidráulicos ainda envolvem uma grande incerteza, dada a não consideração (por razões de viabilidade computacional) de uma escala espacial suficientemente fina dos processos físicos envolvidos, a sua complexidade e a sensibilidade dos resultados dos modelos à representação matemática específica desses processos.

Assim, e tal como já referido, existem diferenças nas projeções à escala global, nomeadamente da precipitação que ocorre para muitas regiões do mundo, dos diferentes modelos GCM não só na magnitude, mas também no sinal (aumento ou redução). Por outro lado, não é só o modelo GCM adotado que gera incerteza; também o procedimento para fazer o *downscaling* dos dados climatológicos e o modelo hidrológico contribuem substancialmente para o somatório da incerteza total, conduzindo a resultados muito diferentes em termos dos impactos estimados (Arnell and Reynard, 1996; Bates *et al.*, 2008; Bosshard *et al.*, 2014).

De uma forma genérica há que atender a incompatibilidades entre as escalas temporais e espaciais dos modelos GCM e dos modelos hidrológicos. Em particular e no que diz respeito a eventos de cheias, a incompatibilidade das escalas de tempo entre os modelos globais de clima e os modelos hidrológicos surge devido a dois fatores:

- primeiro, porque os modelos GCM não podem simular eventos de precipitação de curta duração e elevada intensidade com a precisão adequada, pois existe elevada incerteza nas previsões de modelos globais para escalas de tempo inferiores a um mês;
- segundo, porque os modelos hidrológicos para simular o processo precipitação-escoamento e, em particular, para estudar situações de cheia obrigam a usar a escala diária ou mesmo escalas de tempo inferiores.

Assim, para contornar esta limitação, é feita uma desagregação temporal dos valores mensais que resultam dos modelos GCM até se obterem escalas de tempo menores e assume-se que a alteração no valor de precipitação média mensal é representativo da alteração de precipitação média relativa a intervalos de tempo inferiores (Schreider *et al.*, 1996; Reynard *et al.*, 1998; Reynard *et al.*, 2004). Alguns autores demonstraram que, no entanto, o resultado da distribuição dos eventos extremos obtida é amortecida, mostrando (como é de esperar) uma variabilidade nos eventos de precipitação extrema inferior à verificada dos valores observados (Prudhomme *et al.*, 2002).

A diferença entre as escalas espaciais dos modelos GCM e dos modelos hidrológicos surge porque os primeiros têm uma resolução horizontal típica muito significativa¹⁴, sendo os pontos da malha de cálculo muitas vezes insuficientes para avaliar os impactos das AC à escala da bacia hidrográfica. Tal facto faz com que os efeitos da variabilidade local não sejam devidamente capturados (Mearns *et al.*, 1995).

¹⁴ Até muito recentemente esta resolução era da ordem dos 300 km (Hartmann, 1994), a qual, no caso de Portugal Continental, implicava a existência de apenas 2 pontos da grelha global. Presentemente a informação dos modelos globais do clima GCM têm tipicamente uma resolução espacial na banda dos 100-300 km e uma resolução temporal variando usualmente entre médias mensais e dados horários (6 horas), dependendo da grandeza climática em análise (precipitação, temperatura., etc.) (<https://climate4impact.eu/impactportal/general/index.jsp?q=resolution>, consultado a 1 junho 2018).

A limitação dos modelos GCM não conseguirem representar adequadamente o clima histórico à escala local tem sido ultrapassada de duas formas: ou gerando resultados de modelos GCM com uma menor resolução ou usando, tal como já referido, Modelos Regionais do Clima (RCM). No que diz respeito à primeira abordagem, têm-se obtido nos anos mais recentes resultados de GCM com uma menor resolução espacial, como por exemplo com o modelo do National Center for Atmospheric Research que apresenta uma resolução de 50 km, i.e., um detalhe espacial até recentemente apenas conseguido pelos RCM.

É, no entanto, mais corrente, o uso de modelos RCM que permitem obter séries de precipitação e temperatura no futuro com base nas séries históricas a nível local, para empreender estudos de vulnerabilidade, impactos e adaptação às AC. Os RCM permitem o estudo de processos regionais e são normalmente forçados pelos GCM¹⁵, permitindo resolver processos físicos a escalas mais pequenas, ou seja, permitem obter, numa área mais limitada, uma resolução espacial menor (até muito recentemente da ordem de 50km x 50 km)¹⁶ - Figura 2.11.

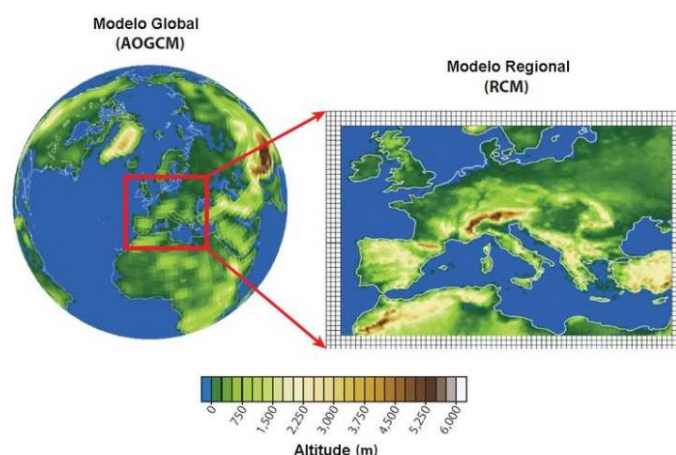


Figura 2.11 | Domínio RCM incorporado em uma grelha GCM. (Fonte da imagem: Giorgi and Gutowski, Regional Downscaling and the CorDEX Initiative 2015, consultado em <http://portaldoclima.pt/pt/o-projeto/metodologia/modelos-climaticos/>)

A nível da Europa, de citar a iniciativa CORDEX (“*Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment*”) que fornece informação climática de alta resolução obtida por regionalização estatística ou dinâmica de modelos globais (<http://www.cordex.org/>). No âmbito desta iniciativa foi empreendido um conjunto de simulações regionais para o domínio europeu (EURO-CORDEX), estando disponíveis variáveis climáticas para: i) o período histórico (1971-2005) e para o período de controlo (1989-2008); ii) projeções para o período (2006-2100) para dois cenários de emissão do

¹⁵ Na prática, os GCM descrevem os efeitos a larga escala e os processos de circulação atmosférica, determinando a sequência de eventos meteorológicos que caracterizam o clima de uma determinada região (características que são o resultado da emissão de gases de estufa, variação da atividade solar e das erupções vulcânicas); os RCM utilizam os resultados dos GCM para definição das condições iniciais, condições-fronteira variáveis no tempo e condições-fronteira na superfície.

¹⁶ A resolução dos RCM está tipicamente na banda dos 10–50 km e a resolução temporal varia usualmente entre médias mensais e dados horários (3 horas). Para algumas grandezas também os valores máximo e mínimo de um dado intervalo de tempo é guardado.

IPCC (RCP 4.5 e RCP 8.5). Para o período histórico e respetivo cenário futuro existem nove simulações e cinco para o cenário de avaliação. As simulações têm duas resoluções espaciais diferentes: i) a geral do modelo CORDEX de 0.44° degree (EUR-44, ~50 km) e uma mais fina adicional de 0.11° (EUR-11, ~12.5km) e uma resolução temporal diária.

Também no domínio da aplicação dos modelos probabilísticos, baseados no ajustamento de distribuições estatísticas de extremos a séries observadas de precipitações ou escoamentos, há limitações. Com efeito, nestes métodos puramente estatísticos, as estimativas de precipitações (ou de caudais) geradas usando séries históricas não incorporam o efeito das AC.

No que diz respeito à precipitação e para ultrapassar esta fragilidade, é necessário determinar quantitativamente curvas IDF (intensidade, duração, frequência) para as futuras condições de AC, recomendado diversos autores a “atualização” destas curvas com base em séries de projeções do valor máximo anual da precipitação com diversas durações¹⁷ obtidas por modelos GCM para vários cenários RCP 2.6, 6.0 e 8.5 (Alam, 2015; Kuo *et al.*, 2014; Fadhel, 2017).

Assim, existem cada vez mais exemplos destas novas curvas IDF para muitas zonas do Mundo com propostas para diversos períodos de retorno (2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos) e curtas durações (Mirhosseini *et al.*, 2013 e 2014; Rodríguez *et al.*, 2014; Tesfay and Quraishi, 2017).

Alguns estudos sugerem a utilização de fatores de correção das curvas IDF existentes e determinadas com base em registos históricos (em Portugal são utilizadas as curvas que constam de Brandão *et al.* (2001)), propondo, no dimensionamento de novas obras hidráulicas, que estas curvas sejam afetadas por um “fator de alterações climáticas” (Climate Change Factor (CCF)) de acordo com a terminologia anglo-saxónica) de modo a traduzir como estas afetam a precipitação extrema (Quadro 2.3):

$$IDF_{Future} = CCF \times IDF \quad (2.1)$$

Esta é a abordagem proposta nomeadamente por diversas Agências da Água internacionais, como por exemplo, na Malásia, o National Hydraulic Research Institute (Ghazvinei *et al.*, 2016) ou, na Nova Zelândia, o National Institute of Water and Atmosphere (2010). Estes fatores são obtidos na sequência de estudos prévios que contemplam o *downscaling* dinâmico de projeções de precipitação para diversos cenários RCP de GCM por RCM, a desagregação temporal das mesmas, a análise de frequências e a comparação de IDF futuras e históricas.

¹⁷ Note-se que é necessário garantir uma elevada resolução temporal dos dados de precipitação, i.e., precipitação com duração inferior à diária, horária e muitas vezes sub-horária (15 min, 30 min, 45 min, 1h, 2h, 3h, 6h, 12h, 24h, 48 h, por exemplo); esta alta resolução raramente é providenciada pelos modelos GCM e raros são os estudos na literatura que apresentam durações inferiores à horária (Tabari *et al.*, 2016); uma alternativa mais comum consiste na obtenção de projeções de precipitações diárias para diversos períodos de retorno e usar técnicas de *downscaling* temporal para estimar intensidades de precipitação para durações inferiores a 24 h (Rodríguez, 2014).

Quadro 2.3 | Coeficiente de correção das curvas IDF: a) Barcelona (Rodríguez et al., 2014); b) Nova Zelândia (National Institute of Water and Atmosphere, 2010)

Table I. Climate change factors for the expected daily rainfall in the 21st century with return periods from 1 to 500 years under the four climate change scenarios considered.

Scenario	Return period (years)						
	1	5	10	20	50	100	500
2000–2032							
A1B	1.02	1.02	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03
A2	1.00	0.99	0.98	0.98	0.98	0.98	0.97
B1	1.04	1.03	1.03	1.03	1.02	1.02	1.02
B2	0.99	1.02	1.02	1.03	1.04	1.04	1.05
2033–2065							
A1B	1.00	1.03	1.04	1.05	1.06	1.06	1.08
A2	1.00	1.00	1.01	1.01	1.01	1.01	1.02
B1	1.01	1.02	1.02	1.03	1.03	1.04	1.05
B2	1.00	1.01	1.01	1.01	1.02	1.02	1.03
2066–2099							
A1B	1.04	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.06
A2	1.00	1.02	1.03	1.04	1.05	1.06	1.07
B1	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01
B2	1.00	1.05	1.07	1.08	1.10	1.11	1.14

Table 1: Factor of percentage adjustment per 1°C to apply to extreme rainfall, for use in deriving extreme rainfall information for screening assessments

Duration	ARI (years)						
	2	5	10	20	30	50	100
< 10 minutes	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
10 minutes	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
30 minutes	7.2	7.4	7.6	7.8	8.0	8.0	8.0
1 hour	6.7	7.1	7.4	7.7	8.0	8.0	8.0
2 hours	6.2	6.7	7.2	7.6	8.0	8.0	8.0
3 hours	5.9	6.5	7.0	7.5	8.0	8.0	8.0
6 hours	5.3	6.1	6.8	7.4	8.0	8.0	8.0
12 hours	4.8	5.8	6.5	7.3	8.0	8.0	8.0
24 hours	4.3	5.4	6.3	7.2	8.0	8.0	8.0
48 hours	3.8	5.0	6.1	7.1	7.8	8.0	8.0
72 hours	3.5	4.8	5.9	7.0	7.7	8.0	8.0

No Quadro 2.3, e no caso da Nova Zelândia, os fatores de correção são traduzidos por percentagens a aplicar aos valores de precipitação extrema para um leque de períodos de retorno em termos de graus Celsius de aquecimento na temperatura média anual. Foram calculados para o Cenário de Emissão de GEE A2 e permitem alterar a precipitação estimada com base nos registos históricos, sendo os caudais posteriormente obtidos por modelos hidrológicos. No caso de Barcelona os fatores são apresentados para diversos cenários SRES. Desta forma, ultrapassa-se a desvantagem anteriormente descrita e garante-se que os caudais de ponta são determinados com base em curvas IDF projetadas para o futuro.

2.3.3 Secas e exploração de barragens

2.3.3.1 Alterações observadas e projeções

Os problemas ligados à disponibilidade da água, mormente uma redução temporária da quantidade disponível devida a precipitação insuficiente (seca) ou uma situação duradoura, em que as necessidades de água excedam as disponibilidades em condições sustentáveis (escassez hídrica), afetam numerosas regiões da Europa. As AC poderão agravar o problema, visto que a escassez da água terá tendência para aumentar. De acordo com os cenários estudados, a diminuição da precipitação acompanhada por um aumento da evapotranspiração potencial, devido ao aumento da temperatura, tenderá a provocar uma diminuição da disponibilidade anual de água. Por outro lado, os cenários climáticos disponíveis sugerem uma tendência generalizada de agravamento das secas.

Na União Europeia, as secas aumentaram dramaticamente em número e em intensidade, nos últimos trinta anos. Em Portugal, 60% do território incorre em risco moderado de desertificação (Figura 2.12). As AC, que poderão induzir o aumento de escassez da água, terão tendência a agravar este problema. Estudos recentes estimam que a região do Sul da Europa e toda a bacia mediterrânica – incluindo Portugal, Espanha, Sul de França, Itália, Eslovénia, Grécia, Malta, Chipre, Bulgária e Sul da Roménia – sejam as regiões mais afetadas pela seca. Estas estimativas apontam para uma redução da precipitação em cerca de 40% em 2080 em relação aos valores atingidos em 1990. Estima-se que as temperaturas nestas regiões sejam 4 a 5 °C superiores às atuais.

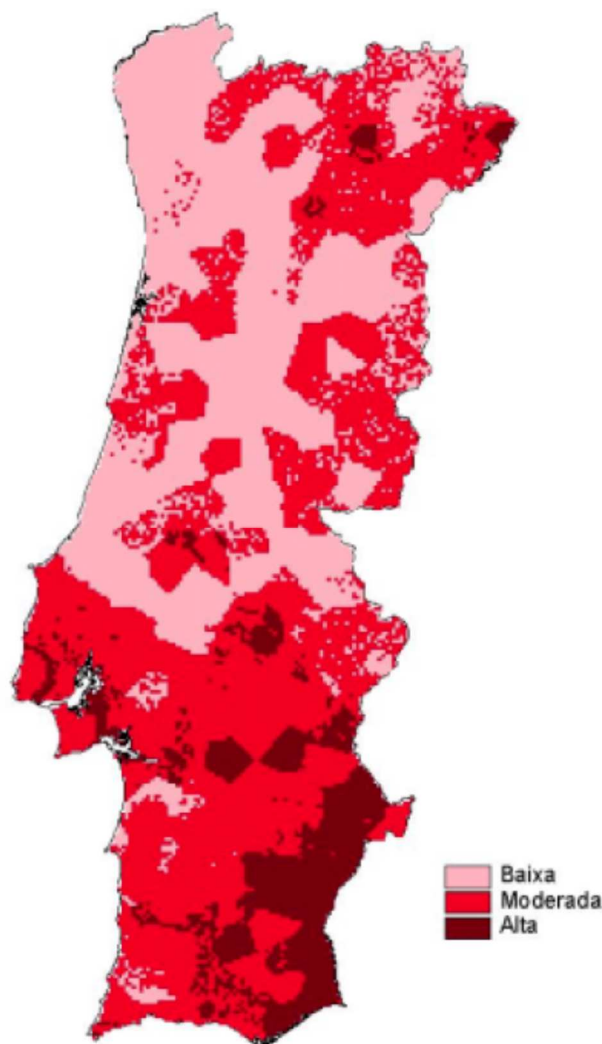


Figura 2.12 | Suscetibilidade à desertificação em Portugal (Pimenta *et al.*, 2017)

Assim, as situações de seca e de escassez constituem problemas de elevada complexidade, cujos impactos bastante significativos têm levado a uma preocupação crescente entre os diferentes estados-membro da União Europeia (European Commission, 2007a). Por outro lado, é expectável que as AC venham a impor pressões adicionais, tanto na afetação das disponibilidades globais, como na severidade e frequência de ocorrência de secas (European Commission, 2007b; European Commission, 2007a).

Com efeito, as projeções climáticas no que se refere a secas são, igualmente, visíveis em tendências verificadas nos registos históricos das séries de variáveis climáticas que indiciam, para a Península Ibérica, condições mais secas: por um lado, nos últimos 50 anos, as secas ocorrem com maior frequência (Brunet *et al.*, 2007; Garcia-Herrera *et al.*, 2007; Rodrigo, 2009; Russo *et al.*, 2015); por outro, observa-se uma tendência geral para uma redução da precipitação (Goodess and Jones, 2002; Rodrigo and Trigo, 2007), apresentando as tendências mensais uma grande variabilidade espacial e temporal (Gonzalez-Hidalgo *et al.*, 2009). Estes registos são igualmente indicativos de mudanças na grande região do Mediterrâneo (De Castro *et al.*, 2005; Beniston *et al.*, 2007)).

O estudo conduzido por Lehner *et al.* (2006), usando o modelo hidrológico integrado WaterGAP, corrobora igualmente esta situação, identificando a região da Península Ibérica como tendo tendência para o aumento da frequência da ocorrência de secas (Figura 2.13).

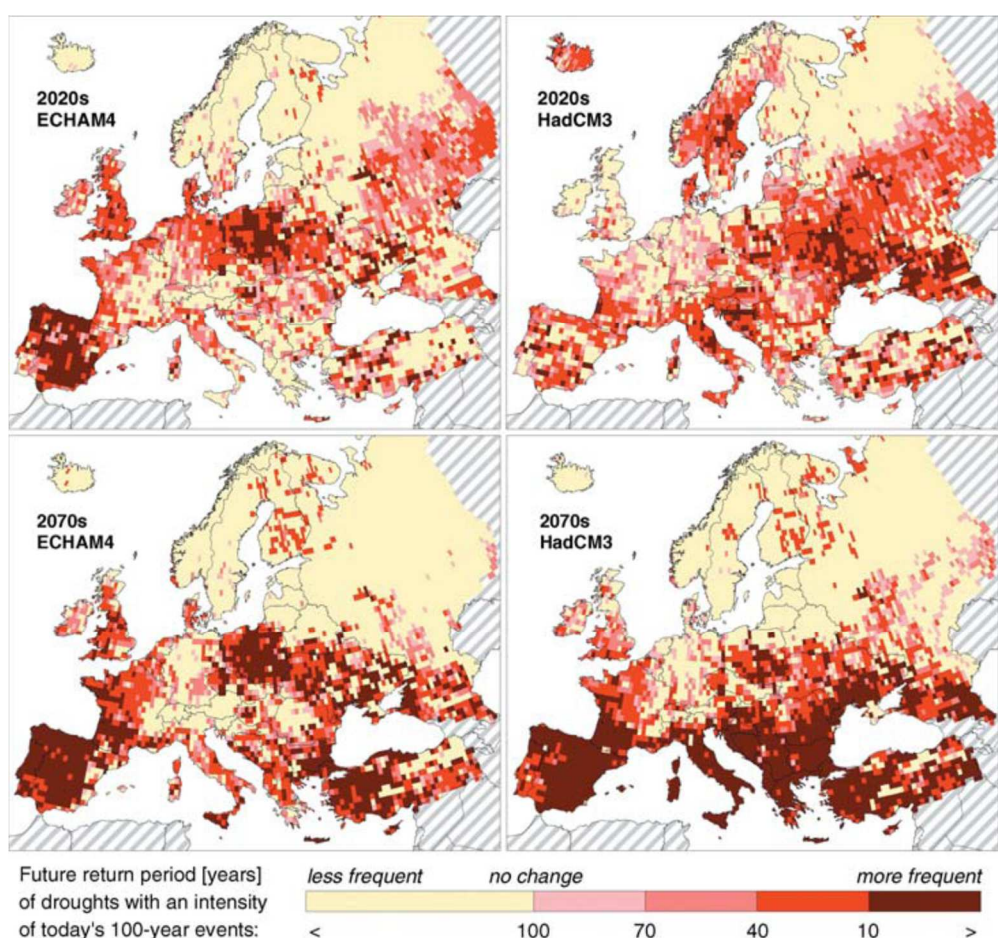


Figura 2.13 | Alteração do período de retorno de secas de 100 anos, baseada na comparação entre o clima e usos atuais (1961-1990) e simulações para os anos de 2020 e 2070 (modelos GCM ECHAM4 e HadCM3; valores calculados com modelo WaterGAP)

Note-se que, tal como já foi referido, as projeções de precipitação pelos GCM estão sujeitas a grande incerteza, podendo verificar-se um desacordo entre projeções dos diferentes modelos (para um dado cenário de emissões de GEE), tanto na sua magnitude como no sinal - aumento ou diminuição - (Bates *et al.*, 2008). Esta situação, habitual em muitas regiões do planeta, também se verifica para a região Sul da Europa, onde se inclui a Península Ibérica. No entanto, trata-se de uma região que

se faz notar pelo facto de a maior parte dos modelos GCM estarem de acordo em que haverá reduções acentuadas de precipitação média anual, com poucas exceções que preveem fracas alterações.

Esta diminuição da precipitação média anual na região mediterrânica e na Península Ibérica é o resultado dos modelos GCM simularem um futuro deslocamento para Norte das trajetórias de tempestade do Nordeste Atlântico. São estas trajetórias que transportam a precipitação de inverno para a Península Ibérica e para outras regiões europeias. No passado, foi muitas vezes observado o deslocamento destas trajetórias para Norte, quando a Oscilação do Atlântico Norte (NAO, “*North Atlantic Oscillation*”) está na fase positiva, observando-se então invernos mais secos. De acordo com os modelos GCM, a fase positiva da NAO ganhará proeminência no século XXI.

O índice da NAO é um forte previsor de precipitação (e escoamento superficial) de inverno na Península Ibérica, conforme demonstrado em numerosos estudos (Goodess and Jones, 2002; Muñoz-Dias and Rodrigo, 2004; Rodrigo and Trigo, 2007; Lopez-Moreno and Vicente-Serrano, 2008; Trigo, 2011; Vicente-Serrano and Trigo, 2011).

Assim, na última década, foram publicados diversos trabalhos sobre o impacto da NAO nos regimes fluviais de bacias hidrográficas mediterrânicas (p.e. Struglia et al., 2004; Trigo *et al.*, 2004; López-Moreno *et al.*, 2007). Apesar do significado estatístico dos resultados obtidos variar entre bacias, estes estudos apontam para a tendência para a redução dos escoamentos quando a NAO se encontra na fase positiva e para o seu aumento durante a fase negativa.

A Figura 2.14 representa as irregularidades nos escoamentos mensais durante e logo a seguir a invernos associados a valores máximos (barras pretas) e mínimos (barras cinzentas) do índice NAO, para três principais rios ibéricos: Douro, Tejo e Guadiana. Está patente na figura que os escoamentos dos três rios apresentam irregularidades distintas consoante o índice NAO é negativo ou positivo. No caso do rio Douro, as diferenças entre as duas fases da NAO são significativas entre janeiro e abril (com um nível de significância de 95%), enquanto nos rios Tejo e Guadiana as diferenças são significativas entre janeiro e setembro.

Também muito recentemente e no âmbito do projeto BINGO, as projeções do projeto MiKlip¹⁸ para a década de 2015-2024 foram dinamicamente desagregados para uma resolução espacial de 12 km e uma resolução temporal diária para dois subdomínios Europeus. O primeiro cobrindo a Ibéria e o segundo a Europa Central, tendo sido feitas 10 realizações das projeções para a década de 2015-2024, criando 100 anos de dados no total de dados climáticos (Ulbrich and Rust, 2015). Estas resoluções demonstraram ser suficientes para a análise das secas, que obrigam a considerar períodos longos de tempo, mas não para as cheias, eventos de curta duração, e para as quais foram produzidas projeções de eventos de precipitação extrema com 2,2 km/1h (Ulbrich and Rust, 2017).

Para Portugal, a modelação hidrológica das projeções realizadas, permitiu verificar que no caso das bacias estudadas do rio Tejo (Figura 2.15) não há alterações significativas do padrão de secas e de

¹⁸ Trata-se de um projeto de investigação nacional alemão que tem por objetivo melhorar as projeções do clima decenais.

cheias se se considerarem as projeções decenais, estando em fase de análise as alterações para as previsões climáticas até 2100 (Novo, 2018; Novo *et al.*, 2018; Rodrigues, 2018).

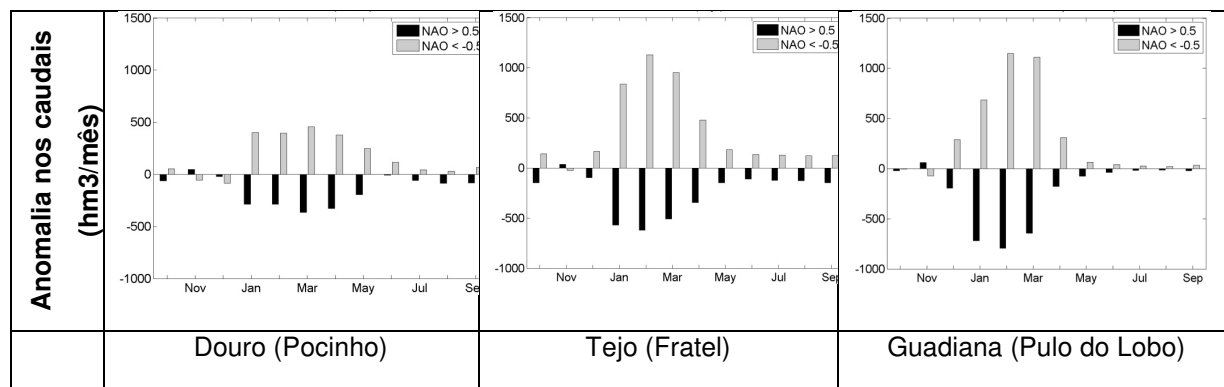


Figura 2.14 | Relação entre as anomalias (desvios em relação à média) de caudais e o índice da NAO em três grandes rios ibéricos (Douro, Tejo e Guadiana). Painéis à esquerda: Anomalias mensais nos caudais durante e depois de invernos com elevado índice da NAO (colunas a negro) e com baixo índice da NAO (colunas a cinzento). Figura adaptada de Trigo (2011)

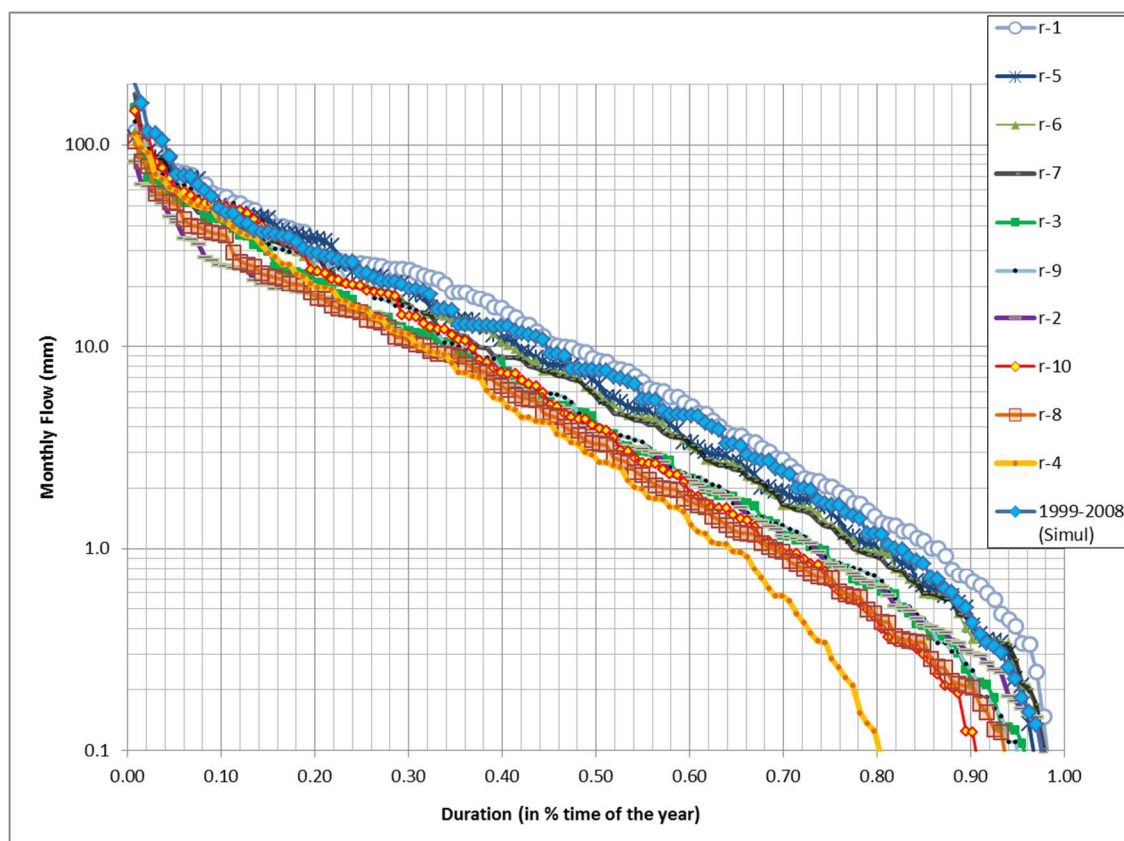


Figura 2.15 | Curvas de duração do escoamento para as 10 projeções do projeto BINGO e comparação com dados registados para a bacia do Sorraia (Rodrigues, 2018)

2.3.3.2 Modelos e métodos para adaptação a secas em cenários de alterações climáticas

2.3.3.2.1 Consideração inicial

A gestão dos recursos hídricos superficiais em condições de escassez deve assentar no conhecimento aprofundado das secas nas regiões em estudo e na caracterização dos fenómenos extremos, necessitando, em particular, de indicadores de previsão de secas que se adaptem a estas regiões. Por outro lado, nos tempos atuais, esta gestão deverá ainda atender a cenários de AC, com projeções das variáveis climatológicas e hidrológicas em contexto de escassez e cenários dos usos de água futuros. Por fim, é de notar que as medidas de adaptação para o evento das secas passam necessariamente pela otimização da exploração de albufeiras em situação de escassez da água.

Com efeito, o estabelecimento de políticas de operação de albufeiras para o armazenamento de água antes e depois dos períodos de seca é um dos aspetos mais críticos da gestão do recurso água. Para ultrapassar com sucesso estas situações existe uma necessidade de avaliar continuamente as condições meteorológicas e hidrológicas e de estimar o risco de seca. Esta estimativa e o nível de severidade da seca esperada determinam um conjunto específico de descargas, abstrações de água e ainda de decisão referentes aos usos da água.

Assim, o estudo de secas considerando as AC tem de atender aos seguintes aspetos: i) representar as diferentes características da relação complexa entre meteorologia e hidrologia em cenários de AC e ter em consideração a redução expectável da disponibilidade da água; ii) fazer uso das projeções meteorológicas e hidrológicas disponíveis e das informações sobre volumes disponíveis de armazenamento de água; iii) avaliar, de forma clara, a severidade das condições de seca, a fim de apoiar os decisores na ativação de medidas de mitigação através de regras eficientes de exploração de albufeiras.

2.3.3.2.2 Estudo das secas

Uma situação de seca depende de inúmeros fatores, nomeadamente associados à disponibilidade (precipitação, por exemplo), como também dos usos e necessidades de água (abastecimento de água, rega, etc.); a alocação de água em condições de escassez é frequentemente também influenciada por questões económicas e políticas de planeamento e de gestão da água. Tallaksen and Van Lanen (2004) definem seca como “uma ocorrência sustentada e com uma expressão regional que se traduz em disponibilidades de água inferiores às necessidades”.

A caracterização de uma situação de seca pode exigir diferentes indicadores para detetar condições de seca e *triggers* para ativar a resposta apropriada, não sendo expectável que um indicador único seja suscetível de cobrir todo o tipo de secas. Note-se que os indicadores mais comuns são normalmente baseados em variáveis meteorológicas e hidrológicas, tais como o escoamento, a humidade do solo, a precipitação, os níveis de água subterrânea e o armazenamento em reservatórios, tendo em consideração as disponibilidades de água e os seus usos. Assim, estas

variáveis são frequentemente usadas como instrumentos de gestão de secas (Steinmann *et al.*, 2005); na verdade, existem mais de 150 indicadores de secas publicados (Wilhite and Glantz, 1995). Um dos métodos mais comuns para avaliar secas consiste no agrupamento de vários indicadores num indicador único, muitas vezes apelidado de índice de secas, e no uso de uma escala quantitativa para definir a gravidade da mesma (Carbone *et al.*, 2008).

Ao longo dos anos, têm sido desenvolvidos vários índices para quantificação de secas, sendo uns mais indicados do que outros para determinados usos ou regiões. O índice de severidade de seca de Palmer (PSDI, Palmer, 1965) é dos mais difundidos internacionalmente, sendo muitas vezes usado para caracterizar as secas em diversas zonas do mundo. No entanto, este indicador considera as condições do ambiente e das culturas característicos das Grandes Planícies dos EUA, para as quais foi desenvolvido. Uma modificação do índice PSDI para ambientes mediterrânicos (MedPSDI) foi desenvolvida por Pereira *et al.* (2007) que propuseram as oliveiras como cultura de referência no balanço de água (em vez dos cereais típicos das Grandes Planícies).

Existem outros indicadores que têm vindo a ser propostos como mais adequados, como, por exemplo, o *Standardized Precipitation Index* (SPI), frequentemente usado para monitorizar secas (McKee *et al.*, 1993) ou, mais recentemente, o *Reconnaissance Drought Index* (RDI, proposto por Tsakiris *et al.* (2007), com base na relação entre precipitação e evapotranspiração.

Em Portugal, diversos autores, como, por exemplo, Santos *et al.* (2010), estudaram os padrões espaciais e temporais de secas usando o índice SPI e identificaram três regiões espacialmente bem definidas com uma evolução das secas temporal específica (Norte, Centro e Sul de Portugal). Também foi testada a correlação entre o índice SPI aplicado ao escoamento e a dados de precipitação em algumas bacias portuguesas (Santos e Portela, 2010); as melhores correlações foram obtidas para as escalas de tempo mais longas do índice SPI, sugerindo que é possível detetar secas hidrológicas com base em registos de precipitação. Mais recentemente, Vicente-Serrano *et al.* (2010) propuseram o Índice de Evapotranspiração e Precipitação Padronizado, que combina a sensibilidade do índice PDSI a mudanças na evaporação (devido a variações de temperatura) com a natureza multi-temporal do índice SPI.

2.3.3.2.3 Otimização da exploração de albufeiras

Na análise da gestão de aproveitamentos hidráulicos, nomeadamente os de fins múltiplos, é de grande utilidade dispor da possibilidade de simular o seu comportamento durante o período de exploração. Esta simulação pode ser desenvolvida com recurso a modelos computacionais que incorporam, entre outras, as restrições físicas (curva de volumes armazenados na albufeira, características dos descarregadores e das turbinas ou dos grupos reversíveis), as restrições relativas ao uso da água e um conjunto de regras, a definir pelo utilizador, que constituem o algoritmo de exploração do empreendimento.

A gestão da exploração de albufeiras integra assim diversas variáveis, objetivos e restrições envolvendo processos complexos de tomada de decisão aos quais estão associados riscos e incertezas (Oliveira and Loucks, 1997). Nas últimas décadas, as técnicas de análise de sistemas

para a definição de regras de operação de albufeiras foram crescentemente utilizadas, dando origem a modelos de simulação e de otimização. O estado da arte do desenvolvimento destes modelos aplicados a sistemas de exploração de albufeiras de fins múltiplos encontra-se patente em Yeh (1985) e em Labadie (2004).

Os modelos de simulação, como por exemplo os modelos HEC RESSIM (Klipsch, 2003) e WRAP (Wurbs, 2010), assim como o uso de folhas de cálculo, como o STELLA (Stein *et al.*, 2001), baseados na análise da dinâmica de sistemas, permitem simular com precisão a operação de albufeiras. As análises do tipo Monte-Carlo efetuadas com base nestes modelos permitem também definir estratégias de operação (Labadie, 2004). Contudo, a utilização deste tipo de modelos apresenta desvantagens, não só devido à necessidade de especificações a nível da política de operação do sistema, mas também porque a solução ótima é obtida por um processo de tentativa e erro, dificultando a sua aplicação (Mays and Tung, 1992).

A otimização é um procedimento matemático que ajusta as variáveis de decisão até ser encontrada a melhor solução, envolvendo técnicas de programação linear (e.g. Needham *et al.*, 2000) e dinâmica (e.g. Labadie, 1999), bem como a utilização de métodos heurísticos, como os algoritmos genéticos e as redes neuronais (e.g. Oliveira and Loucks, 1997; Chang *et al.*, 2010). Os métodos heurísticos inspirados no comportamento das colónias de formigas têm ganho popularidade no meio científico, existindo alguns exemplos deste tipo de aplicação a problemas de otimização da exploração de albufeiras (Kumar and Reddy, 2006; Dariane and Moradi, 2009).

Os modelos para otimizar a gestão de albufeiras são utilizados com maior frequência em sistemas hidráulicos para produção de energia. Existem também exemplos da sua aplicação a albufeiras para minimização do impacto das secas. A otimização da exploração de albufeiras em situação de escassez hídrica pode ser realizada através de: i) minimização de perdas, em particular as devidas a evaporação; ii) estabelecimento de critérios para definição de *triggers* para a implementação de medidas de mitigação do impacto das secas, iii) definição de regras para restringir os usos ou definir a melhor política de transferência de água entre usos concorrentes (rega versus abastecimento público), assegurando a minimização dos prejuízos decorrentes da escassez de água ou dos custos económicos do não abastecimento devido ao racionamento de água e iv) definição da função objetivo que represente os critérios e as regras supracitadas.

Assim, Shih and ReVelle (1995) desenvolveram, com base em técnicas de otimização de sistemas de programação linear e não-linear, regras para minimizar o valor máximo do défice de água e maximizar o número de meses em que não há restrições ao consumo de água. (Chang *et al.*, 1995) desenvolveram um modelo para a otimização de albufeiras em períodos de seca com aplicação ao rio Scioto (EUA). Tu *et al.* (2003) aplicaram técnicas de programação linear para otimização da gestão de sistemas de distribuição de água, considerando regras de restrição durante a ocorrência de secas.

Constituem ainda exemplos da aplicação destas técnicas os estudos de Karamouz and Araghinejad (2008) realizados para albufeiras iranianas e de Cardoso da Silva *et al.* (2003). Estes últimos autores desenvolveram um modelo para operação de albufeiras brasileiras em situações de escassez

recorrendo a técnicas não lineares. Sechi and Sulis (2010) aplicaram modelos de simulação a um sistema em Itália com restrições de abastecimento de água devido às secas, demonstrando a capacidade destes modelos em simular estas situações.

2.4 Oportunidades de investigação

2.4.1 Considerações iniciais

Em Portugal, e tal como verificado em 2.2.1.2, existem já estudos sobre o impacto das AC na disponibilidade dos recursos hídricos. Em particular, da consulta dos PGRH do 2º ciclo, que foram vigentes até 2015, verifica-se que é feita uma breve análise do impacto das AC no clima (temperatura e precipitação) e nos diversos sectores da economia. Em termos gerais, são ainda estimadas as alterações nos valores dos escoamentos médios (que preveem uma redução em praticamente todas as oito regiões hidrográficas): Minho e Lima; Cávado, Ave e Leça; Douro; Vouga, Mondego e Lis; Tejo e Ribeiras do Oeste; Sado e Mira; Guadiana e Ribeiras do Algarve (<https://www.apambiente.pt/?ref=16&subref=7&sub2ref=9&sub3ref=834>).

A previsão da influência das AC nas situações extremas, nomeadamente cheias e secas, ainda não foi, tanto quanto se conhece, suficientemente tratada.

A não existência de um conhecimento fundamentado dos impactos possíveis das AC nas cheias e secas representa incertezas no que diz respeito à segurança das barragens e à exploração das respetivas albufeiras. Os principais aspetos a ter em atenção são:

- não existência de uma base de dados com dados meteorológicos relativos a situações extremas produzidos por GCM e a projeções devidamente desagregadas a nível local;
- necessidade de dispor de um maior número de resultados hidrológicos da modelação destas projeções (clima-escoamento) à escala das principais bacias hidrográficas portuguesas;
- necessidade de aprofundar o conhecimento da influência das AC nas cheias nas principais bacias hidrográficas portuguesas e em particular nas consequências que podem ter no dimensionamento dos descarregadores de barragens e no controlo de cheias;
- necessidade de aprofundar o conhecimento para avaliar a influência das AC nos caudais mínimos nas principais bacias hidrográficas portuguesas, e, em particular, as consequências que podem ter na exploração e gestão de albufeiras;
- necessidade de elaborar recomendações para adaptação e proteção de cheias, nomeadamente nos aspetos de segurança de barragens (estimativa do caudal de projeto) e para operação de albufeiras em sistemas hídricos impactados pelas AC.

Note-se que existem no NRE ferramentas para modelação de cheias (como por exemplo os modelos Hec-HMS, Hec-RAS, Myke Flood, etc.) que permitem modelar cheias e estimar caudais de dimensionamento de descarregadores. No entanto, a situação é diferente no que se refere a ferramentas de modelação hidrológica do ciclo da água, de modelação da alocação de recursos hídricos a nível da bacia hidrográfica integrando aspetos qualitativos, qualitativos, de usos e de oferta da água ou de modelação da exploração de barragens, nomeadamente em situação de cheia. Para ultrapassar tal lacuna, será necessário identificar, analisar, usar e melhorar modelos existentes que adicionalmente servirão para modelar as consequências das AC nas atuais praticas operativas e de exploração de albufeiras existentes, nomeadamente em cenários de escassez de água.

Em particular, afigura-se ser necessário investir no conhecimento de novas ferramentas, essencialmente de *softwares* livres e comerciais de larga aplicação a nível mundial (como por exemplo, os modelos VIC, Weap ou Hydro Basin). Estes modelos hidrológicos, conjuntamente com outros que permitam a simulação da operação de albufeiras, são ferramentas essenciais para a previsão de escoamentos, e assim, das disponibilidades de água a nível da bacia hidrográfica.

2.4.2 Cheias e segurança de barragens

Os riscos de inundações têm ganho uma importância crescente nas últimas décadas, nomeadamente devido ao aumento da intervenção humana em zonas inundáveis e de fenómenos de precipitação extrema em curtos períodos de tempo. A União Europeia, através da Diretiva 2007/60/CE, de 23 de outubro de 2007, estabeleceu um quadro para a avaliação e gestão dos riscos de inundações, que os Estados Membros devem seguir com a “...elaboração de cartas de zonas inundáveis e de cartas de riscos de inundações indicativas das potenciais consequências prejudiciais associadas a diferentes cenários de inundações...”. Em Portugal, as inundações têm sido responsáveis por avultadas perdas patrimoniais e económicas e de vidas, esperando-se ainda alterações nos regimes de precipitação, frequência e intensidade de fenómenos meteorológicos e climáticos extremos, tais como eventos de precipitação intensa em períodos curtos.

Por outro lado, existe atualmente um amplo consenso científico de que as AC, provocadas pela intensificação do efeito de estufa, se vão agravar ao longo do século XXI, sendo as AC, a par das mudanças da ocupação do solo, uma causa da modificação dos impactos das inundações extremas e uma das razões para a necessidade de reavaliação das cheias por forma a definir medidas para minimizar e mitigar os seus efeitos adversos, evitando consequências potencialmente catastróficas para as populações e bens económicos e ambientais.

Note-se que, tal como já foi referido, não é claro se o risco de inundações é em Portugal maior ou menor em consequência das AC. No entanto, a variabilidade climática dos últimos 40 anos em Portugal, já se traduz na observação de uma tendência de diminuição da precipitação média anual e uma tendência mais clara de aumento da variabilidade da precipitação acumulada no inverno, com maior frequência de invernos muito secos e de invernos muito chuvosos.

Por outro lado, os descarregadores de cheia das barragens são dimensionados numa hipótese de estacionaridade e do ponto de vista do dimensionamento com base em situações meteorológicas extremas, a projeção do aumento da frequência de precipitações mais intensas implica, tal como foi referido, a diminuição do período de retorno do caudal de dimensionamento das obras hidráulicas.

Existem diferentes métodos e ferramentas para determinar cheias de projeto de descarregadores de cheias e os resultados dependem dos dados e das metodologias existentes bem como dos critérios de dimensionamento usados. A definição da capacidade de vazão dos descarregadores é tradicionalmente baseada em registos históricos; ou seja, muitas das estruturas atualmente em exploração foram projetadas para condições climatológicas e hidrológicas que remontam a várias décadas atrás, i.e., sem considerar a influência das AC¹⁹.

Assim, tal como já foi referido, no LNEC deve ser reforçado o papel da investigação para melhor compreensão e modelação da modificação das cheias pelas AC, bem como dos impactos sobre a segurança de barragens, usando ferramentas que facilitem a abordagem integrada de avaliação e de medidas de mitigação e adaptação. Em particular, é necessário aprofundar a quantificação do risco de cheias devido às AC e analisar as alterações expectáveis nos regimes de cheias em bacias específicas onde existam barragens, os seus impactos e possíveis abordagens de adaptação. Assim, afigura-se necessário:

- introduzir nos modelos hidrológicos contingências em associação com cenários de mudança climática, traduzindo as tendências que se têm vindo a reconhecer nos valores de algumas variáveis hidrológicas e que apontam no sentido de um futuro “estatisticamente diferente” do passado;
- melhorar o conhecimento entre as variações de precipitação e variações de caudais nas bacias onde se localizam barragens e estudar os reflexos sobre a segurança dos respetivos descarregadores de cheia;
- definir medidas de adaptação deste tipo de estrutura hidráulica às AC.

Assim, devem ser analisados os problemas das inundações nas grandes bacias internacionais, tendo em atenção as AC e os regimes de exploração dos aproveitamentos em Espanha, e ainda nas bacias intermédias, em particular, a dos afluentes das bacias do Douro, Tejo e Guadiana. Esta análise permitirá retirar recomendações sobre eventuais alterações das regras de exploração dos aproveitamentos existentes e adaptação do dimensionamento de novos aproveitamentos.

Das três grandes bacias internacionais, a do rio Tejo, com uma bacia total de 80 629 km² (sendo a área em Portugal de 24 860 km²) é a que origina as cheias com impacto mais significativo. Quer no rio Douro, quer no rio Guadiana, ocorrem cheias importantes, mas devido à morfologia dos vales, as inundações não são, de um modo geral, tão preocupantes tanto em termos da dimensão das áreas inundáveis como no que diz respeito aos custos económicos associados a danos e perdas.

¹⁹ Note-se que, no caso de as AC se traduzirem em cheias mais significativas, a segurança de tais estruturas é menor do que a prevista a nível de projeto.

Assim, considera-se prioritário analisar em particular o efeito das AC nas cheias das bacias hidrográficas dos afluentes portugueses do rio Tejo: Ponsul, Ocreza e Zêzere, na margem direita, e Sorraia, na margem esquerda.

Para as bacias intermédias, são de destacar as bacias dos rios Vouga, Mondego e Sado. De norte para sul, estas bacias apresentam áreas respetivamente de 3635 km², 6644 km² e 7640 km².

Destas três salienta-se a importância das cheias no rio Mondego, que exigiram obras de regularização e de controlo que fizeram diminuir fortemente os riscos de inundação, mas no qual cheias recentes permitiram identificar vulnerabilidades. O estudo da influência das AC nas cheias nesta bacia com impacto em zonas urbanas muito importantes (Coimbra) e afetação de um importante setor da atividade económica (a agricultura) afigura-se muito interessante.

Na bacia do rio Vouga, encontram-se em exploração, desde 2014, as barragens de Ribeiradio e da Ermida, a primeira das quais com algum controlo de cheias, bem como um conjunto de diques longitudinais de defesa na zona inferior. Também neste caso se afigura importante avaliar estas diferentes condições num contexto do impacto das AC nas cheias.

Os escoamentos do rio Sado são controlados por barragens essencialmente para rega, apresentando a bacia uma grande capacidade de amortecer as cheias. Estas nunca tiveram uma importância económica significativa, a não ser a de restrição da agricultura tradicional na parte inferior do rio. No entanto, afigura-se igualmente ser um caso em que se poderia investir na análise do impacto das AC nas respetivas cheias.

2.4.3 Secas e exploração de barragens em condições de escassez

As barragens são um meio para armazenar e assegurar o fornecimento de água e constituem uma solução eficaz para ultrapassar a seca e situações de escassez de água. Contudo, os custos económicos e ambientais destas infraestruturas limitam fortemente a utilização destas soluções.

Assim, uma medida de adaptação às AC muito popular consiste em promover o aumento significativo da eficiência das albufeiras existentes, na medida em que uma melhor estratégia de gestão da água constitui uma medida alternativa de poupança de água e de redução de perdas, através do uso de tecnologias e práticas de boa eficiência hídrica. A mitigação do risco de seca pela otimização da exploração de albufeiras contribui para a gestão integrada dos recursos hídricos superficiais, podendo, igualmente, ser considerada como uma medida de adaptação à AC.

Em particular, nas regiões mais suscetíveis à escassez de água, a exploração de albufeiras tem, usualmente, de responder à questão de como operar durante o período de seca de modo a que os consumos sejam garantidos durante o maior período de tempo possível. Nos períodos de estiagem, a imprevisibilidade da chuva leva a adoção de medidas de racionalização do uso da água de modo a economizá-la e a poder utilizá-la durante um maior período de tempo. Esta restrição pode ser ineficaz em virtude da perda por evaporação direta da albufeira. Com efeito, em regiões de clima mais seco, a precipitação média anual é muitas vezes concentrada em poucos meses e os níveis de evaporação são muito elevados ao longo de todo o ano.

A integração no processo de decisão dos vários e diferentes constrangimentos da bacia hidrográfica e do sistema da barragem requer o auxílio de ferramentas de modelação numérica para fornecer informação para uma gestão racional e para a tomada de decisões. Em condições de escassez hídrica, as simulações dos modelos fornecem uma forma eficiente para prever interações entre as necessidades da água o impacto das alterações das regras de operação, ao longo do tempo, de forma a estabelecer as medidas de mitigação de seca mais apropriadas. Os modelos de otimização avaliam as diferentes alternativas e indicam a que satisfaz todos os constrangimentos e otimiza a função objetivo pré-definida.

No LNEC considera-se ser uma lacuna a não existência deste tipo de modelos e considera-se prioritário o desenvolvimento e aplicação de uma metodologia para otimizar a exploração de albufeiras de barragens de múltiplos usos, com o intuito de minimizar os conflitos entre usos de água concorrentes (abastecimento público, rega e produção de energia), dando prioridade às barragens localizadas em regiões de alta suscetibilidade à desertificação do território por fatores físicos. Nestas regiões, a ocorrência de secas, as significativas perdas de água por evaporação das albufeiras e a imprevisibilidade que caracteriza as chuvas, nomeadamente em cenários de AC, obrigam, para garantir um abastecimento ótimo de água, à adoção de regras para restringir o uso de água.

Por outro lado, os níveis de água e descargas de vários rios portugueses são controlados por barragens. A operação de comportas e de centrais hidroelétricas baseiam-se em determinadas regras indicadas nos licenciamentos emitidos por autoridades nacionais. No caso das bacias internacionais, existem acordos que definem algumas regras adicionais. As regras são baseadas em necessidades públicas e privadas, considerando diferentes usos como navegação, recreação, pesca, abastecimento de água e produção de energia hidroelétrica. Estas regras que definem descargas dependem da época do ano. As AC podem originar discrepâncias entre regras existentes e as condições de escoamento alteradas.

Assim, nas bacias internacionais deveriam igualmente ser analisados os escoamentos mínimos num contexto de AC, tendo em vista outros usos de água e os regimes de exploração dos aproveitamentos em Espanha. Esta análise permitira retirar recomendações sobre eventuais alterações das regras de exploração dos aproveitamentos portugueses existentes por forma a mitigar os riscos de seca.

Em conclusão, a alteração no clima terá impactos significativos nos recursos hídricos, havendo projeções que apontam para a diminuição das disponibilidades hídricas, o aumento dos eventos meteorológicos extremos, a degradação da qualidade da água e o aumento do consumo de água. Os riscos das AC terão, por conseguinte, que ser considerados de forma sistemática no planeamento dos recursos hídricos, no projeto das obras hidráulicas e na gestão e exploração destas últimas, devendo ser desenvolvidas e implementadas medidas de adaptação destinadas a minimizar os respetivos impactos.

3 | ESTRUTURAS HIDRÁULICAS ASSOCIADAS A BARRAGENS E VIAS DE COMUNICAÇÃO

3.1 Introdução

No presente Programa de Investigação, as estruturas hidráulicas em foco são os descarregadores de cheias de barragens e os pilares de pontes fundados em leitos aluvionares. A abordagem proposta para o desenvolvimento dos estudos é uma abordagem híbrida – com uso de modelos numéricos e experimentais/físicos que permitirá, em primeiro lugar, aprofundar o conhecimento do escoamento e da erosão junto a estruturas hidráulicas e, em segundo lugar, gerar informação experimental para validação e calibração de modelos numéricos. A investigação do escoamento em descarregadores de cheias centrar-se-á mais na modelação numérica e a investigação do escoamento junto a pilares de pontes dará particular importância à abordagem experimental.

De salientar que, dado os dois fenómenos em estudo - escoamentos em geral altamente arejados e erosão com transporte de sedimentos – e do facto de existir uma forte abordagem experimental neste Programa de Investigação, um dos aspetos mais importantes que será igualmente abordado se relaciona com a caracterização cabal dos dois tipos de escoamentos bifásicos em estudo (ar-água, nos descarregadores e sedimento-água, nos pilares das pontes), a qual é permitida pelos avanços da tecnologia e pelos novos desenvolvimentos na área da tecnologia de sensores.

Em conclusão e no que diz respeito ao presente Programa de Investigação, o avanço na investigação em hidráulica de estruturas, que é possível devido aos novos recursos na modelação numérica e experimental, terá lugar em vários domínios, nomeadamente: i) na modelação numérica avançada do escoamento em descarregadores de cheias, mormente com um grande investimento no uso de esquemas CFD; ii) na modelação experimental avançada do escoamento e da erosão junto a pilares de pontes; iii) no uso de novas tecnologias para caracterização de escoamentos, nomeadamente os escoamentos bifásicos ar-água e sedimento-água, envolvendo a medição da concentração de ar, no primeiro caso, e da erosão, no segundo.

3.2 Abordagens para a modelação do escoamento e dos processos erosivos em estruturas hidráulicas

3.2.1 Modelação de escoamentos em descarregadores de cheias em canal

3.2.1.1 Considerações gerais

Os escoamentos em estruturas hidráulicas associadas às grandes e médias barragens, como por exemplo em descarregadores de cheias, tomadas de água, descargas de fundo, desvios provisórios, eclusas ou escadas de peixes, são em geral altamente turbulentos e, por vezes, caracterizados por um intenso emulsão de ar. Os descarregadores de cheias são uma das principais estruturas

que constam do projeto de uma barragem e a avaliação do seu comportamento é fundamental em qualquer tipo de barragem, e, em especial, em barragens de aterro, já que uma capacidade de descarga inferior à prevista pode conduzir à rotura da barragem (Figura 3.1).

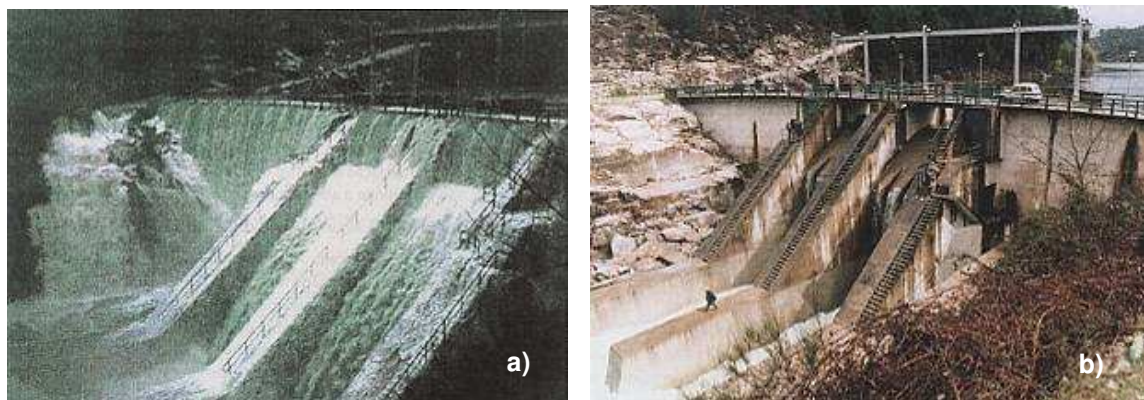


Figura 3.1 | Barragem de Fagilde: a) galgamento; b) aspeto da barragem após galgamento

Nos descarregadores de cheias, a intensidade da turbulência e o campo de velocidades complexo são frequentemente impostos pela complexidade da geometria de canais e túneis bem como das estruturas de dissipação de energia. O estudo do comportamento deste tipo de estrutura é importante, incluindo as condições do escoamento na aproximação imposta por muros-guia e no canal de descarga e obras de dissipação, já que uma geometria não adequada pode causar comportamentos que reduzem a capacidade de descarga (Fattor and Bacchiega 2009). De particular importância se reveste a cabal caracterização dos campos de velocidades e pressões, nomeadamente para avaliar os riscos de cavitação (Chanson, 2004; Chatila and Tabbara, 2004; Fattor and Bacchiega, 2009; Ma *et al.*, 2010).

Uma solução tradicional nos projetos dos descarregadores de cheias consiste na utilização de soleiras retilíneas executadas em betão, definidas por formas consagradas, como por exemplo do tipo da Waterways Experiment Station (WES), podendo ter ou não um canal no seguimento da estrutura da crista. No primeiro caso, o descarregador é de lâmina guiada; no segundo de lâmina livre.

Existem ainda diversas modalidades de dissipação de energia, nomeadamente as duas seguintes: i) jato oriundos de trampolins ou de orifícios e ii) bacia de dissipação. No caso de existir um canal no seguimento da estrutura da soleira, este é normalmente alisado por forma a evitar os riscos de cavitação, principalmente quando sujeito a velocidades significativas. Consequentemente apenas uma pequena percentagem da energia é dissipada ao longo do canal, tornando-se necessário utilizar estruturas de dissipação de energia, que podem envolver custos avultados. Uma das formas de dissipar energia é através da construção de degraus ao longo do canal do descarregador, tendo surgido a solução do descarregador em degraus. Esta solução não é recente, mas o crescimento da investigação nesta área foi favorecido pelo uso da técnica de Betão Compactado com Cilindros (BCC) na construção de barragens.

A modelação do escoamento sobre descarregadores de cheias em canal constitui um problema clássico da hidráulica de estruturas. Trata-se de um escoamento com superfície livre onde as forças de gravidade são dominantes. Sobre a soleira do descarregador ocorre, geralmente, um escoamento rapidamente variado, apresentando as linhas de corrente uma curvatura pronunciada na direção vertical. Nesta zona ocorrem, igualmente, dois processos: a formação e o espessamento gradual da camada limite turbulenta ao longo do perfil e o aumento gradual da velocidade com a diminuição da altura do escoamento. Mesmo em condições não-arejadas, as variações de regime no início de um descarregador em canal (ou, por exemplo, a rugosidade adicional produzida pelos degraus num descarregador deste tipo) resultam em escoamentos complexos que carecem de caracterização.

A hidrodinâmica deste tipo de escoamento pode ser estudada por modelação física ou numérica. Dada a complexidade destes escoamentos, a investigação experimental tem desempenhado um papel de relevo nas últimas décadas e a modelação do escoamento em descarregadores de cheias continua atualmente ainda a ser analisado com base em modelos físicos. No entanto, apesar da eficácia dos modelos físicos, a sua natureza implica custos de construção e exploração elevados e morosidade na obtenção de resultados dos ensaios, pelo que a modelação numérica neste âmbito tem registado um desenvolvimento importante na última década.

3.2.1.2 Modelação CFD

Os recentes avanços das capacidades dos modelos computacionais e da tecnologia de *hardware* das últimas décadas abrem novas oportunidades para a análise numérica de escoamentos em estruturas hidráulicas, tornando a resolução numérica das equações representativas dos escoamentos viável para muitas condições. Nos dias de hoje é possível realizar uma simulação do escoamento tridimensional, multifásico, transiente e turbulento. São simulações que, dependendo do grau de precisão dos resultados, podem demorar horas, dias ou meses.

Em particular, a modelação numérica em Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD, de *Computational Fluid Dynamics* da terminologia anglo-saxónica) tem-se revelado na última década como uma ferramenta capaz de reproduzir fenómenos de transporte em escoamentos em qualquer domínio e diversas características. Assim, a modelação CFD é cada vez mais utilizada em hidráulica, demonstrando uma capacidade de reproduzir o escoamento em estruturas hidráulicas complexas e revelando-se como uma ferramenta essencial para o dimensionamento das mesmas. Note-se que, apesar desta técnica estar bem estabelecida na ciência aeroespacial e nas indústrias automóvel e marítima, uma das principais desvantagens quando aplicada ao escoamento em estruturas hidráulicas é que a sua precisão não está em muitos casos comprovada e os resultados numéricos têm de ser comparados com dados experimentais como forma de os validar (Versteeg and Malalasekera, 2007).

Os escoamentos ao longo de um descarregador, como a maioria dos escoamentos em estruturas hidráulicas, são turbulentos. Existem basicamente três vias para a modelação da turbulência que são por ordem decrescente de precisão: i) simulação numérica directa das equações de *Navier-*

Stokes – a da conservação da massa (equação da continuidade) e da conservação da quantidade do movimento (*Direct Numerical Simulation* - DNS); ii) simulação apenas das grandes escalas da turbulência (*Large Eddy Simulation* – LES; iii) simulação das equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds (*Reynold-Averaged Navier-Stokes* - RANS).

As abordagens RANS e LES para simulação de escoamentos turbulentos acarretam o problema das equações de fecho da turbulência, ou seja, necessitam do acoplamento de um modelo para a modelar. Na abordagem LES, as grandes escalas (consideradas como os turbilhões) são directamente calculadas e utilizam-se para as pequenas escalas modelos específicos. Pelo contrário, na abordagem RANS todas as informações turbulentas são perdidas.

Nos esquemas CFD, são normalmente utilizadas as equações RANS que são discretizadas, no tempo e no espaço, e que podem ser resolvidas por utilização de uma variedade de esquemas numéricos, como por exemplo o método dos volumes finitos ou dos elementos finitos (Kim and Park 2005; Zhenwei *et al.* 2012). A estas equações básicas acopla-se um modelo adequado de turbulência. Um número importante de livros explica em detalhe a teoria e a implementação numérica da tecnologia CFD (Abbot and Basco, 1989; Wilcox, 1993; Versteeg and Malalasekera, 2007).

Existem hoje programas CFD que simulam os mais variados tipos de escoamento: bidimensionais ou tridimensionais, monofásicos ou multifásicos, compressíveis ou incompressíveis. Entre estes podem citar-se os mais utilizados modelos comerciais, tal como o modelo FLOW-3D (desenvolvido pelo Flow Science, Inc.), os modelos FLUENT e CFX (desenvolvidos pela ANSYS) e o modelo STAR-CD, bem como o *software* livre OpenFoam. Todos estes *softwares* que, de uma forma geral, utilizam programas adicionais para o traçado das malhas da geometria do descarregador, assentam em três pressupostos simplificativos (Versteeg and Malalasekera, 2007):

- em primeiro lugar, dada a complexidade do comportamento turbulento, a simulação directa das equações básicas de Navier-Stokes (DNS) torna-se inviável do ponto de vista computacional e estas equações são modificadas para representar a variação instantânea como uma média da variável, como no caso das equações RANS (Ho *et al.*, 2006);
- em segundo lugar, para resolver o problema da turbulência, são acopladas a estas equações básicas modelos de turbulência: os modelos RNG (Re-Normalised Group, da terminologia anglo-saxónica) são hoje comuns na mecânica de fluidos, constituindo um exemplo destes últimos o modelo de turbulência $k-\epsilon$;
- em terceiro lugar, a localização da superfície livre constitui uma dificuldade adicional para a análise numérica já que não é conhecida *a priori*, devendo ser estimada como parte da solução; para localizar a interface entre a água e o ar é frequentemente usado o método do volume de fluido (Volume Of Fluid – VOF, da terminologia anglo-saxónica).

No LNEC tem-se utilizado o modelo comercial FLOW-3D (<https://www.flow3d.com/>) e o *software* livre IHFoam (<http://IHcantabria.com/IHFOAM>). Ambos permitem modelar escoamentos tridimensionais de fluidos compressíveis ou incompressíveis em regime permanente ou variável.

O modelo FLOW-3D é um *software* comercial que utiliza o método FAVORTM para representar as fronteiras sólidas, o qual permite modelar de forma simples obstáculos de geometria complexa. Com este método, a construção das malhas e dos sólidos é independente, podendo-se facilmente alterar os obstáculos sem alterar a malha e vice-versa. Este *software* utiliza ainda o método TruVOFTM para a localização da superfície livre, que tem a vantagem de, comparado com outros métodos, considerar, para efeitos de cálculo, apenas as células que contêm fluido, resultando numa maior rapidez e menor gasto de memória. Teklemariam *et al.* (2001) descrevem o uso do modelo FLOW-3D e o seu bom desempenho na comparação dos respetivos resultados (caraterísticas do escoamento, caudais e velocidades) tanto com dados de ensaios em modelo físico como com estimativas empíricas. Estes autores avaliaram, alguns anos mais tarde, o grande potencial do modelo para a otimização de formas de projeto de estruturas hidráulicas, recomendando que, apesar deste potencial, a configuração final destas estruturas deve continuar a ser confirmada por estudos de modelação física (Teklemariam *et al.*, 2008).

O Modelo IHFOAM é uma versão modificada do modelo OpenFOAM (<https://www.openfoam.com/>); este último é um código *open-source* e tem uma estrutura modular que permite ao usuário ver e modificar o algoritmo e acrescentar subrotinas de forma simples. Trata-se de um modelo para fluidos incompressíveis e bifásicos baseado no método de volumes finitos que inclui vários esquemas para resolver as equações da mecânica dos fluidos, neste caso, as equações de Navier-Stokes em valores médios (RANS). O modelo integra métodos de captura de superfície livre baseados na técnica VOF e usa, entre outros, esquemas LES para modelar a turbulência. As malhas de cálculo podem ser estruturadas ou não estruturadas (Higuera *et al.*, 2013a; Lara *et al.*, 2014).

Tanto o modelo FLOW-3D como o *software* IHFOAM já foram aplicados no LNEC com sucesso a vários tipos de escoamentos com superfície livre, nomeadamente nos descarregadores de cheias das barragens de Chertioua na Argélia (Figura 3.2) e de Fierza na Albânia (Figura 3.3).

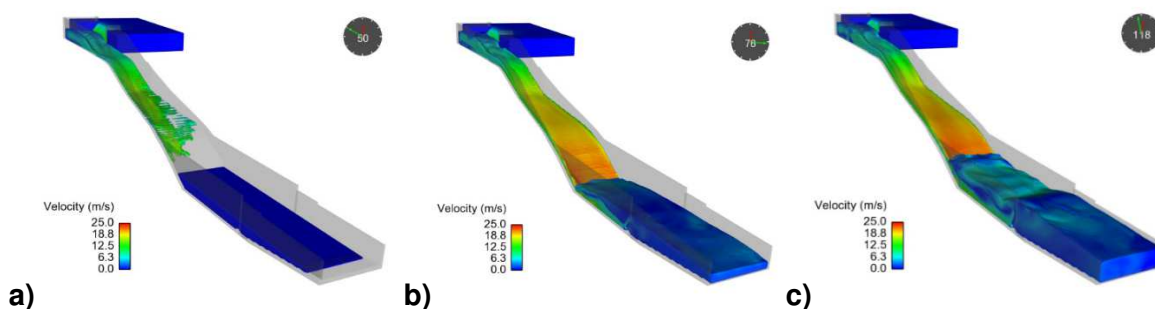


Figura 3.2 | Descarregador de cheias da Barragem de Chertioua. Simulação numérica do escoamento (caudal de projeto $465 \text{ m}^3/\text{s}$): a) $t=0 \text{ s}$, b) $t=76 \text{ s}$, c) $t=116 \text{ s}$ (Mendes e Viseu, 2013)

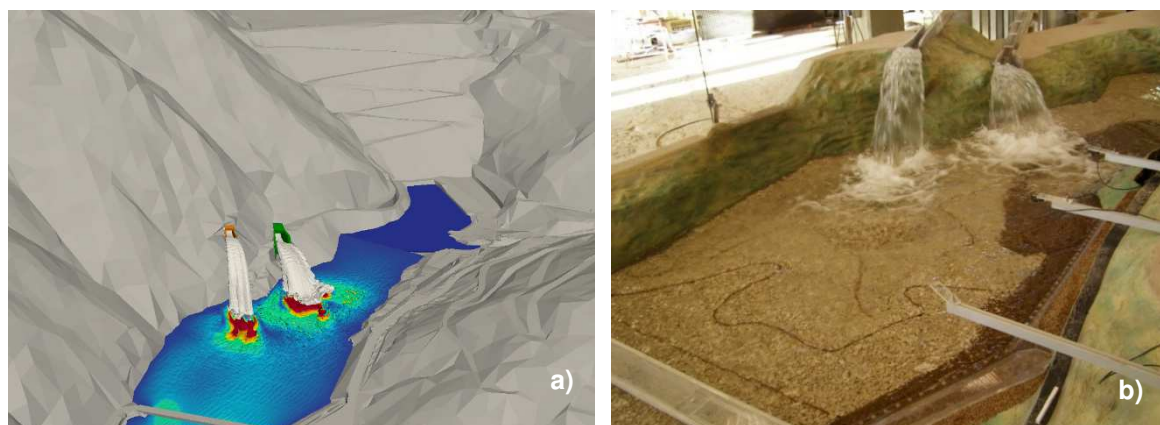


Figura 3.3 | Descarregador de cheias da Barragem de Fierza. Aspeto geral do escoamento: a) modelo numérico; b) modelo físico (Melo e Mendes, 2017)

3.2.1.3 Modelação física e experimental

Apesar do grande desenvolvimento da última década, a aplicação de métodos computacionais para o estudo de escoamentos com superfície livre em estruturas hidráulicas, nomeadamente em descarregadores, continua a ser limitada e os modelos físicos constituem um meio imprescindível para este estudo.

Os modelos físicos, ao permitir medir grandezas e visualizar os fenómenos naturais intervenientes, têm, no caso dos órgãos de segurança e exploração de barragens, o objetivo de analisar as condições de funcionamento hidráulico das formas de projeto, caracterizar as ações hidrodinâmicas que atuam sobre as fronteiras sólidas do escoamento e, caso necessário, definir formas alternativas que tenham um melhor desempenho hidráulico ou, mantendo este desempenho, que representem uma maior economia de construção.

Os modelos físicos são utilizados usualmente para o estudo de descarregadores de cheias, mas podem ser também usados, com sucesso, para estudar o escoamento em descargas de fundo e em circuitos hidráulicos, nomeadamente em tomadas de água e restituições. No que diz respeito aos descarregadores de cheias, os objetivos do estudo em modelo envolvem normalmente a análise dos seguintes aspetos (Figura 3.4):

- condições de chegada e escoamento sobre a soleira, nomeadamente para deteção de eventuais contrações introduzidas por muros-guia e pilares, e determinação do campo de pressões sobre a soleira;
- determinação de curvas de vazão (com abertura total e, eventualmente, parcial das comportas) e definição da lei de abertura das mesmas;
- determinação do andamento da superfície livre para dimensionamento dos muros laterais;
- caracterização do campo de pressões nas fronteiras sólidas do escoamento;
- determinação do alcance dos jatos descarregados;
- análise do funcionamento e da eficiência da bacia de dissipação para diferentes caudais;
- estudo das erosões a jusante e medições de velocidades na restituição de caudais.

Os avanços mais recentes da investigação na área das estruturas hidráulicas experimental devem-se essencialmente à possibilidade de utilização de meios informáticos potentes e de sensores de medição tecnologicamente avançados para medição, análise e registo de grandezas hidráulicas em instalações experimentais, assim como de visualização do escoamento. Desta forma, tem-se assistido ao aparecimento de novos sistemas de aquisição de grandezas em instalações hidráulicas e de *softwares* de processamento de dados que possibilitam o conhecimento cabal do campo de velocidades e das pressões por instrumentação “não invasiva”.

Em particular, o estudo da turbulência dos escoamentos, bem como o desenvolvimento de instrumentação para medição e análise deste fenómeno (*software* e *hardware*) é uma questão importante. O notável desenvolvimento da instrumentação permite hoje a medição da turbulência em escoamentos não-arejados, nomeadamente utilizando equipamentos de ADV ou PIV, e a medição da concentração e velocidade do ar em escoamentos arejados, recorrendo a sondas de condutividades elétrica, sonda óticas e tubos de Pitot.

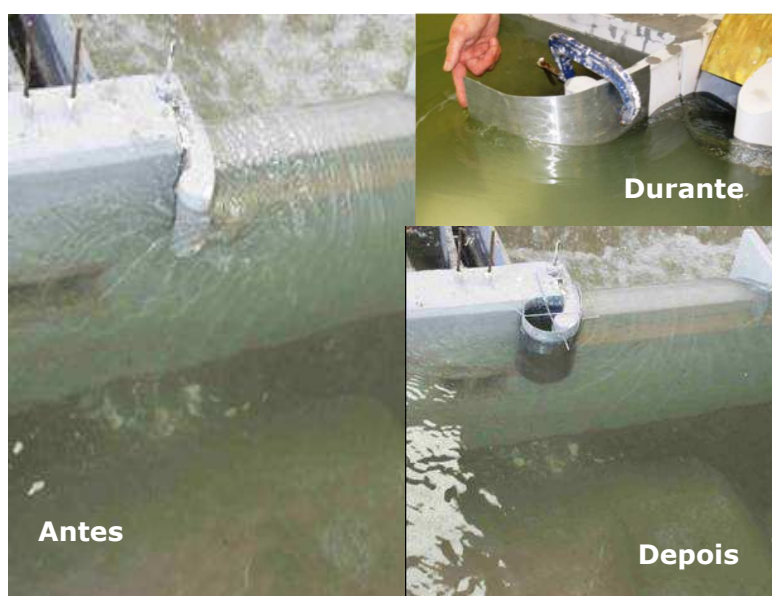


Figura 3.4 | Modelo físico de um descarregador frontal. Abordagem empírica para definição de formas alternativas no caso dos muros-guia na entrada

Por outro lado, e tal como já foi referido, é de salientar o papel dos modelos físicos e da investigação experimental em hidráulica de estruturas na validação de modelos numéricos. Com efeito, da experiência da aplicação de modelos numéricos à modelação de descarregadores é de realçar que normalmente a complexidade do escoamento, devido à configuração do descarregador e principalmente das formas da entrada e da restituição, obriga quase sempre à necessidade de verificar se o modelo numérico conduziu à modelação correta do escoamento e a validade dos seus resultados tem de ser comprovada mediante a comparação com resultados experimentais (Figura 3.5).

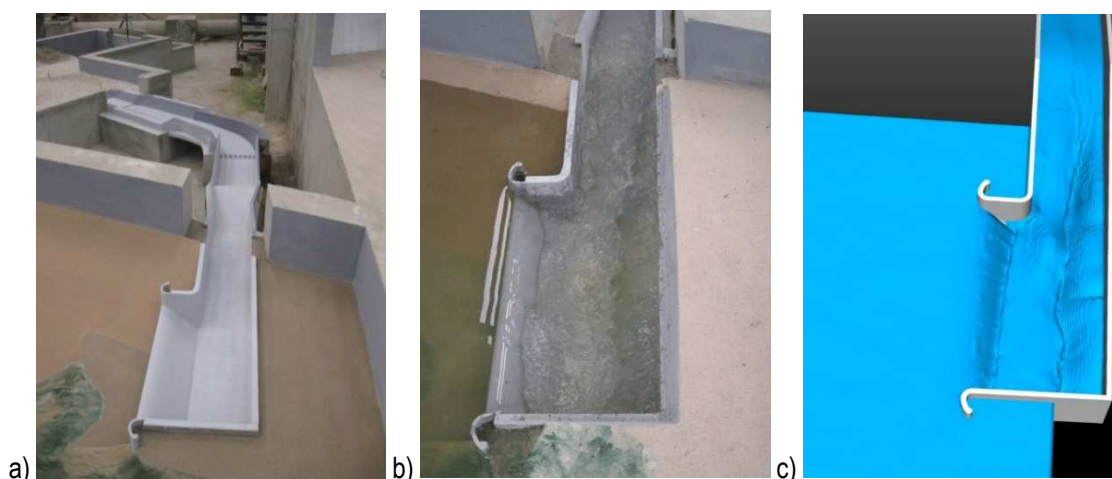


Figura 3.5 | Descarregador de cheias da Barragem de Chertioua (Caudal de projeto $465\text{m}^3/\text{s}$): a) e b) modelo físico; c) modelo numérico (Mendes e Viseu, 2013)

Note-se que desde a sua criação, em 1946, o LNEC tem dado um apoio significativo ao projeto de aproveitamentos hidroelétricos, tanto em Portugal como no estrangeiro, em estudos relacionados com a definição e otimização de formas hidráulicas, utilizando modelação física. Apenas a título de exemplo podem destacar-se os estudos das barragens do Cabril (135 m de altura), Alto Lindoso (110 m de altura) e Alqueva (96 m de altura e uma albufeira com cerca de 4000 hm^3), em Portugal, e a barragem de Cahora Bassa (170 m de altura e uma albufeira com cerca de 66000 hm^3), em Moçambique.

No início da década de 2010, e com o objetivo de reduzir a dependência energética de Portugal, retomou-se o plano de construção de grandes aproveitamentos hidroelétricos e o reforço de potência de alguns aproveitamentos existentes. Assim, iniciou-se a um novo ciclo de grandes obras para aproveitar o potencial dos rios com a construção de uma dezena de barragens nas bacias do Douro, Mondego e Tejo e de reforços de potência nas bacias do Cávado (nomeadamente o associado à barragem de Salamonde), Douro e Guadiana.

No concurso promovido em 2008, no âmbito do Programa Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroelétrico (PNBEPH), foram concessionadas as barragens de Foz Tua, Alto Tâmega, Daivões, Gouvães e Fridão, Girabolhos e Bogueira. Nessa altura encontravam-se já em fase de projeto as barragens de Ribeiradio e Ermida, no rio Vouga, as barragens de montante e de jusante do Baixo Sabor e a nova barragem do Alto Ceira. Também em termos internacionais se assistiu a um crescimento de estudos em modelo físico de descarregadores, nomeadamente para a Argélia (Chertioua, Dermon e Chachar), Angola (Luachimo) e Moçambique (Moamba Major e Cahora Bassa). Atualmente encontra-se em desenvolvimento o estudo em modelo reduzido de uma câmara de vórtice para o Sistema de Drenagem de Lisboa, cuja construção está em fase de lançamento de concurso.

Este novo ciclo de obras constituiu um desafio importante, quer pelo número e dimensão das estruturas, quer pela necessidade de recorrer a tecnologias mais avançadas para satisfazer os requisitos dos estudos. As estruturas hidráulicas em questão compreenderam soluções diversas,

tendo sido a sua geometria objeto de estudo intensivo, proporcionando informação preciosa mormente para a calibração de modelos numéricos. Assim, no NRE, e tal como já foi referido, a par da realização de um número significativo de modelos físicos, foi possível assistir-se, na sequência deste ciclo, ao surgimento da modelação numérica, validada com base em modelação física.

3.2.2 Caracterização do escoamento e dos mecanismos de erosão junto a pilares de pontes

3.2.2.1 Considerações iniciais

A presença no seio do escoamento de pilares e encontros de pontes fundados em leitos aluvionares dá origem a uma complexa interação entre o escoamento, o pilar e os sedimentos que induz perturbações do leito do rio com a conseqüente erosão nas imediações do pilar. De facto, a erosão a que está sujeito o leito do rio junto às fundações de pilares é considerada a causa mais provável do colapso de pontes (Melville and Coleman, 2000; Cook et al., 2015). Nos EUA, ao longo dos últimos trinta anos, cerca de 1000 pontes colapsaram, devendo-se 60% destas roturas à erosão junto à fundação de pilares (Shirole and Holt, 1991; Briaud *et al.*, 1999; Flint *et al.*, 2017).

Também a intensificação do número e magnitude de eventos de cheias, que pode estar associada às AC, pode ter contribuído para o colapso de diversas pontes, aumentando a consciencialização pública para este tipo de acidentes e justificando esta temática como objeto de investigação (Fukui and Nishitani, 2002; Loucks *et al.*, 2005; Tanasic *et al.*, 2013; Millilo *et al.*, 2014). Em Portugal ocorreram recentemente cinco casos de rotura em pontes: ponte de Penacova em 1983, ponte da Gafanha, em 1994, ponte na EN122 em 2000, ponte do Rio Sorraia em 2001 e ponte Hintze Ribeiro (ponte de Entre-os-Rios), em 2001, esta última tendo causado 59 vítimas mortais (Figura 3.6).



Figura 3.6 | Acidentes em pilares de pontes: a) Ponte Cale da Vila, Gafanha da Nazaré, 1994; b) Ponte Hintze Ribeiro, Entre-os-Rios, 2001

3.2.2.2 Mecanismo do escoamento e do desenvolvimento da erosão

A erosão provocada pelo escoamento em leitos de fundo móvel, em ambiente marítimo ou fluvial, pode ser de três tipos: i) erosão generalizada do leito do rio (que ocorre mesmo na ausência de qualquer obstáculo); ii) erosão por contração da secção do escoamento; iii) erosão localizada (“*scour*”, de acordo com a terminologia anglo-saxónica) junto de obstáculos, como no caso de pilares ou encontros de pontes²⁰ (Parker *et al.*, 1997). Estes tipos de erosão podem ocorrer simultaneamente ou de forma independente e a sua origem distinta pode conduzir a diferentes estimativas da erosão para cada uma das contribuições. O presente trabalho centra-se apenas na erosão localizada que resulta diretamente da existência de obstáculos no seio do escoamento.

O fenómeno de erosão localizada que ocorre junto a pilares resulta da complexa interação entre o leito móvel de um rio e as perturbações que nele se desenvolvem quando um obstáculo está inserido naquele escoamento (Figura 3.7).

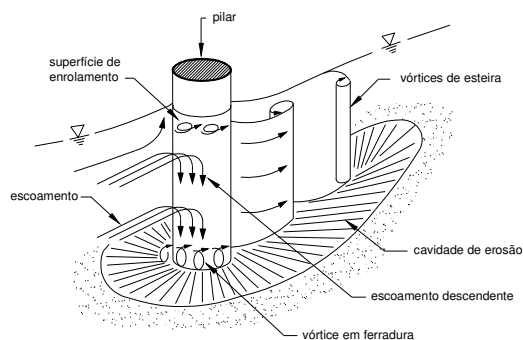


Figura 3.7 | Estrutura do escoamento na proximidade de um pilar cilíndrico (Breusers and Raudkivi 1991)

Assim, observa-se que o escoamento a montante do obstáculo apresenta uma determinada distribuição de velocidades. Ao encontrar o obstáculo, as velocidades anulam-se, havendo um incremento do termo de pressão. Esse incremento é maior junto à superfície livre do que junto ao fundo. Assim, pode observar-se um aumento do nível da superfície livre a montante do obstáculo, o aparecimento de uma superfície de enrolamento ou rolo e de um escoamento descendente que alguns autores consideram responsável pelo início do processo erosivo na base do pilar. O escoamento descendente, ao incidir no fundo, é parcialmente deflectido para montante. Ademais, pode ocorrer a separação do escoamento junto ao fundo, um pouco a montante do obstáculo. A ação combinada do escoamento descendente deflectido e do escoamento separado dá origem, no caso de pilares, aos chamados vórtices em ferradura e origina a escavação do fundo tanto para montante como, principalmente, para jusante do obstáculo. Os vórtices acompanham o escoamento para jusante, contribuindo para a turbulência, e acabam por se dissipar no seio deste (Breusers and Raudkivi 1991; Couto, 2000).

²⁰ Existe ainda um quarto tipo de erosão em leitos de rios aluvionares: a provocada por factores antropogénicos, como por exemplo a que resulta de dragagens.

O fenómeno de separação também se pode observar, no caso de um pilar, nas superfícies laterais, de onde se desprendem periodicamente os denominados vórtices de esteira. Estes vórtices acompanham o escoamento principal para jusante e apresentam sentidos de rotação alternadamente opostos ao longo do percurso. Atuam no processo de erosão através de um efeito de sucção, quase vertical, das partículas do fundo. Assim, enquanto os vórtices em ferradura provocam, essencialmente, o arrastamento do material do fundo, os vórtices de esteira arrancam esse material através do efeito de sucção e transportam-no, depois, em suspensão.

Note-se que a intensidade dos vórtices diminui à medida que a cavidade de erosão aumenta, acabando-se por atingir o equilíbrio. Este último ocorre quando a tensão tangencial induzida pela vorticidade iguala a tensão crítica de arrastamento do material do fundo da cavidade de erosão²¹. Uma vez que o estado de equilíbrio é alcançado, a cavidade de erosão permanece inalterada até que os parâmetros do escoamento se alterem.

A erosão localizada junto a pilares de pontes é geralmente avaliada em termos da profundidade máxima. Existem diversas metodologias para avaliar a evolução desta, caracterizando-a num dado instante do processo ou no equilíbrio²². Em particular, muitos estudos propõem formulações semi-empíricas com base em dados experimentais, verificando-se que a profundidade máxima é uma função das variáveis supracitadas a que muitas vezes se adiciona o tempo, t .

A profundidade da cavidade de erosão aumenta rapidamente na fase inicial do processo. Nas zonas em que o ângulo do talude da cavidade em formação tende a ser superior ao ângulo de repouso do material submerso, ocorre o deslizamento de quantidades consideráveis de partículas para o fundo da cavidade. Essas partículas ficam disponíveis para serem transportadas para jusante. Através do processo de deslizamento, os limites da cavidade vão-se propagando lateralmente e para montante. Desta forma, a cavidade pode estender-se a zonas onde as tensões de arrastamento são inferiores à crítica. Os sedimentos são transportados em suspensão e por arrastamento e são depositados próximo do bordo de jusante da cavidade. Esta mancha de deposição dos sedimentos vai, por sua vez, deslocar-se para jusante durante o desenvolvimento da cavidade (Diab *et al.*, 2010).

A análise do processo da erosão localizada junto de pilares de pontes envolve um elevado número de variáveis independentes, que podem ser agrupadas de acordo com as características de (Fael, 2007):

- o escoamento (altura do escoamento, h , inclinação da linha de energia, s_f , e aceleração da gravidade, g);
- o fluido (massa volúmica e viscosidade dinâmica);

²¹ Como seguidamente se verá, há que distinguir duas situações: i) erosão sem transporte sólido (“*clear water scour*”, da terminologia anglo-saxónica) e ii) erosão com transporte sólido (“*life bed scour*”); neste último caso o equilíbrio é atingido, i.e., a erosão cessa, quando o material transportado “afluente” à cavidade de erosão iguala o expelido desta (“efluente”).

²² Tal como já foi referido, uma cavidade de erosão está em equilíbrio quando a quantidade de material sólido removido dessa cavidade, pelo escoamento, iguala a quantidade de material arrastado de montante para o seu interior. A profundidade de erosão máxima ou de equilíbrio é obtida nas condições de velocidade $U/U_c = 1$.

- o material de fundo (diâmetro mediano do sedimento, D_{50} , coeficiente de gradação (desvio padrão geométrico da distribuição), σ_D , e massa volúmica do sedimento);
- o obstáculo (largura, b , ângulo entre escoamento e o pilar, fator de forma);
- a geometria do canal (largura, inclinação de fundo, fator de forma da secção transversal).

De uma forma genérica, os principais fatores que afetam a magnitude da profundidade de erosão localizada junto a pilares de pontes são: i) a velocidade e a profundidade do escoamento; ii) a forma e a largura do pilar, bem como o ângulo entre o escoamento e o pilar e, por fim, iii) a dimensão e a distribuição granulométrica dos sedimentos do leito (Richardson and Davies, 2001). O efeito da forma do obstáculo decorre do modo como estes afetam as linhas de corrente do escoamento, ou seja, obstáculos cuja aerodinâmica da forma altere pouco as linhas de corrente provocam cavidades de erosão relativamente pouco profundas²³.

A dimensão dos sedimentos do fundo pode ter uma influência preponderante no desenvolvimento das erosões localizadas. Assim, nas formulações empíricas surge geralmente o diâmetro D_{50} e o coeficiente de gradação do material. Quando as misturas granulométricas não são uniformes ($\sigma_D > \approx 1,55$), o transporte sólido das partículas mais finas dá-se para velocidades claramente inferiores à velocidade crítica de início do movimento das partículas de diâmetro mediano da mistura. Este fenómeno conduz à formação de uma camada superficial em que prevalecem, na superfície do leito, os grãos mais grosseiros. Esta camada, por vezes designada por camada de encouraçamento, acaba por impedir, ao fim de algum tempo, o movimento do fundo e por inibir o desenvolvimento da cavidade de erosão.

O efeito do tempo e da velocidade média do escoamento estão interligados, sabendo-se que as erosões localizadas podem ocorrer para duas condições de transporte sólido essencialmente distintas: erosões sem e com transporte sólido generalizado (Yanmaz and Altinbilek, 1991). As duas situações são caracterizáveis em termos da velocidade média do escoamento não perturbado, U . No primeiro caso, não existe movimento do material do fundo na zona do escoamento de aproximação, ou seja, no trecho situado a montante do obstáculo. Nestas condições, a tensão de arrastamento no fundo é inferior ou, no limite, igual à tensão crítica de arrastamento, o que corresponde à condição $U/U_c \leq 1$. No segundo caso, o escoamento induz o movimento generalizado do material do fundo. Nesta situação, a tensão de arrastamento é superior à tensão crítica de arrastamento, o que é equivalente a ter-se $U/U_c > 1$.

A evolução temporal da profundidade das cavidades de erosão encontra-se esquematizada na Figura 3.8 tanto para erosões sem transporte sólido generalizado como para erosões com transporte sólido generalizado. Esta última figura evidencia que, se por um lado, é plausível que seja durante as cheias que se observam as maiores erosões localizadas (situação suscetível de ocorrer com

²³ Por exemplo, um pilar de secção quadrada originará cavidades maiores do que um de secção circular. Por outro lado, afigura-se que quanto mais largo for o pilar maior será a profundidade da erosão. Note-se que a largura efetiva do pilar também é afetada se este não estiver alinhado com o escoamento ou se se verificar a acumulação de detritos.

transporte sólido generalizado), há circunstâncias em que essas erosões em escoamentos sem transporte sólido, para caudais moderados, mas persistentes, podem ser igualmente importantes.

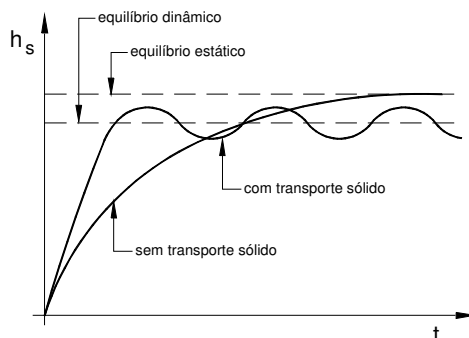


Figura 3.8 | Evolução temporal de cavidades de erosão com e sem transporte sólido generalizado (Couto e Cardoso, 2001)

3.2.3 Medição de grandezas hidráulicas

3.2.3.1 Considerações iniciais

As grandezas normalmente medidas são, em hidráulica, as alturas de água, as pressões médias, as velocidades do escoamento e os caudais; em hidráulica de estruturas, dadas as características do escoamento, pode ser necessário medir a concentração do ar e caracterizar a erosão. A medição e o registo da leitura de muitas destas grandezas em laboratório (e em modelo físico) foi durante muito tempo realizada recorrendo a diversos equipamentos de medida: i) limnómetros de ponta direita com nónio, para medição de níveis de água; ii) piezómetros ligados a manómetros tubulares, para medição de pressões médias ao longo da fronteira do escoamento; iii) molinetes e micro-molinetes, para medição de velocidades e iv) descarregadores Bazin, para a medição de caudais.

Todos estes dispositivos combinam facilidade de utilização com um bom grau de fiabilidade, mas baseiam-se em procedimentos de aquisição de dados essencialmente manuais e que envolvem recursos humanos importantes para apoio na experimentação.

Sabendo-se que os avanços mais recentes na investigação na área das estruturas hidráulicas se devem essencialmente à possibilidade de utilização de sensores de medição tecnologicamente avançados e de meios informáticos potentes para medição e registo de grandezas hidráulicas em instalações experimentais, é de grande importância adquirir conhecimentos em termos dos novos sistemas de aquisição de grandezas em instalações hidráulicas e dos meios de medição.

3.2.3.2 Medições de alturas de água e de pressões

Os níveis da água e as alturas piezométricas (pressões médias) são tradicionalmente medidos por piezómetros, registando-se a altura que a água atinge dentro de um tubo que funciona pelo princípio dos vasos comunicantes. Nos anos mais recentes, tem-se optado pelo uso de sondas de aquisição de nível acústicas ou resistivas (Figura 3.9).

As sondas acústicas, constituídas, por exemplo, por cerâmicas piezoelétricas permitem determinar a distância entre o sensor e a superfície livre, através da medição do tempo de eco. Os sensores podem funcionar emersos ou imersos; no primeiro caso, a ausência de contacto com a água, pode ser uma vantagem. Outras tecnologias de medição atualmente em fase de experimentação no LNEC relacionam-se com as técnicas de processamento de imagem por recurso ao registo de câmaras digitais de vídeo de alta definição que permitem a observação e monitorização do escoamento de forma não intrusiva (Amaral, 2016).

No que diz respeito à medição de pressões médias e instantâneas tem-se, nos anos mais recentes e no âmbito da realização de teses de doutoramento, generalizado o uso de transdutores de pressão (Viseu, 2006; Melo, 2001). Os sensores de pressão mais comuns possuem uma membrana que é deformada pela diferença de pressão entre o lado exposto à coluna líquida e o lado exposto à pressão atmosférica, sendo a deformação transformada num sinal elétrico. Atualmente, estes sensores são usualmente utilizados em modelos físicos de descarregadores de cheias, como por exemplo nos casos recentes das barragem do Sabor, Tua, Fridão, etc. (Figura 3.10).



Figura 3.9 | Medição de níveis de água: a) piezómetro de coluna de água; b) sonda resistiva; c) sonda acústica



Figura 3.10 | Medição de pressões: a) sensores Keller; b) medição no modelo físico da bacia de impacto do descarregador da barragem do Sabor; c) função de densidade espectral das flutuações de pressão

3.2.3.1 Medições de velocidades

Tradicionalmente as velocidades eram medidas em laboratório por molinetes. Estes sensores mecânicos produziam medições pontuais que eram posteriormente integradas ao longo da secção do escoamento (Muste *et al.* 2008). Nos anos mais recentes, no LNEC e no âmbito de trabalhos de investigação, têm sido testados com sucesso outros sensores, nomeadamente do tipo UVP e ADV (Alves, 2007; Fernandes, 2013) – vide Figura 3.11, que têm igualmente vindo a ser sistematicamente utilizados nos estudos de modelação física conduzidos no NRE.



Figura 3.11 | Medição de velocidades: a) com molinete OTT; b) aspeto de uma sonda UVP

Os sensores UVP (Ultrasonic Velocity Profiler) são sensores que determinam perfis instantâneos das velocidades na coluna líquida, utilizando o método ultrassónico por efeito Doppler que consiste em transmitir um sinal contínuo. As ondas emitidas atingem as partículas em suspensão no seio do líquido. O eco resultante é recebido de volta, pelo sensor imerso, com frequência distinta da do sinal emitido. Dado que existe um grande número de partículas atingidas, e com velocidade distintas, é obtido o espetro de frequências de reflexão às quais é subtraída a frequência da onda emitida. Os desvios assim obtidos das ondas recebidas, chamados frequências Doppler, correspondem a velocidades em vários pontos, sendo depois tratados estatisticamente.

Os sensores ADV (Acoustic Doppler Velocimetry) são velocímetros também pertencentes à categoria dos Doppler acústicos e funcionam igualmente enviando uma curta onda de som a partir do elemento de transmissão que é refletida nas partículas suspensas na água, sendo o eco registado em cada um dos elementos recetores acústicos. O sensor acústico do Vectrino tem cinco transdutores, um para transmitir e quatro para receber sinal. Assim, este aparelho, quando colocado dentro de água, permite medir a velocidade instantânea nas três orientações – longitudinal, transversal e vertical. A recolha de dados é feita longe do sensor, a aproximadamente 5 cm, de modo a fornecer medições não perturbadas. Após o eco ser processado, os vetores de velocidade são gravados e transmitidos para um computador.

A tecnologia dos sensores de velocidade do tipo Doppler tem sido usada na última década e apresenta muitas vantagens quando comparada com medições mais tradicionais. Para além de não requererem qualquer tipo de calibração, fazem uma medição instantânea do valor da velocidade. Por outro lado, como detetam a direção do escoamento, mede-se diretamente o vetor da velocidade. Esta tecnologia apresenta também alguns inconvenientes: i) não fornece observações contínuas; ii) a morosidade do processo, que obriga ao reposicionamento do equipamento em cada um dos pontos de medição iii) exige o uso de *seeding*; e iv) são dispositivos intrusivos embora os UVP, devido à sua pequena dimensão, gerarem apenas uma pequena perturbação (York and Oberg 2002; Tauro *et al.* 2014).

Assim, têm ganho uma popularidade crescente na medição das velocidades do escoamento outras técnicas não-intrusivas tais como radar (Costa *et al.*, 2000) ou métodos baseados em aquisição e processamento de imagens (Fujita *et al.*, 1997 e 1998; Bradley *et al.*, 2002). Estes últimos têm-se revelado, em particular, mais eficazes do que as técnicas Doppler. De salientar, como uma das

técnicas mais conhecidas, o uso do PIV (Particle Image Velocimetry, da terminologia anglo-saxónica). Trata-se de um equipamento “não intrusivo” que permite obter campos de velocidades instantâneas através do registo fotográfico da posição de partículas suspensas no escoamento em dois instantes de tempo consecutivos. É aplicável a escoamentos com elevada heterogeneidade espacial, o que permite aumentar o rigor e reduzir o tempo de aquisição das medições (Thielicke and Stamhuis, 2014; Muste *et al.*, 2008).

Amaral (2017) aplicou recentemente uma variante desta tecnologia – o LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry, da terminologia anglo-saxónica). Baseada igualmente em processamento de imagens, este método consiste no registo do movimento do fluido com partículas superficiais (são geralmente usadas partículas de esferovite) e na estimativa do deslocamento destas partículas com base num par de imagens consecutivas (Keane and Adrian 1992; Raffel *et al.* 2007). A Figura 3.12 ilustra o procedimento de aplicação do algoritmo de LSPIV às imagens adquiridas e do pós-processamento que é efetuado aos dados de velocidade adquiridos.

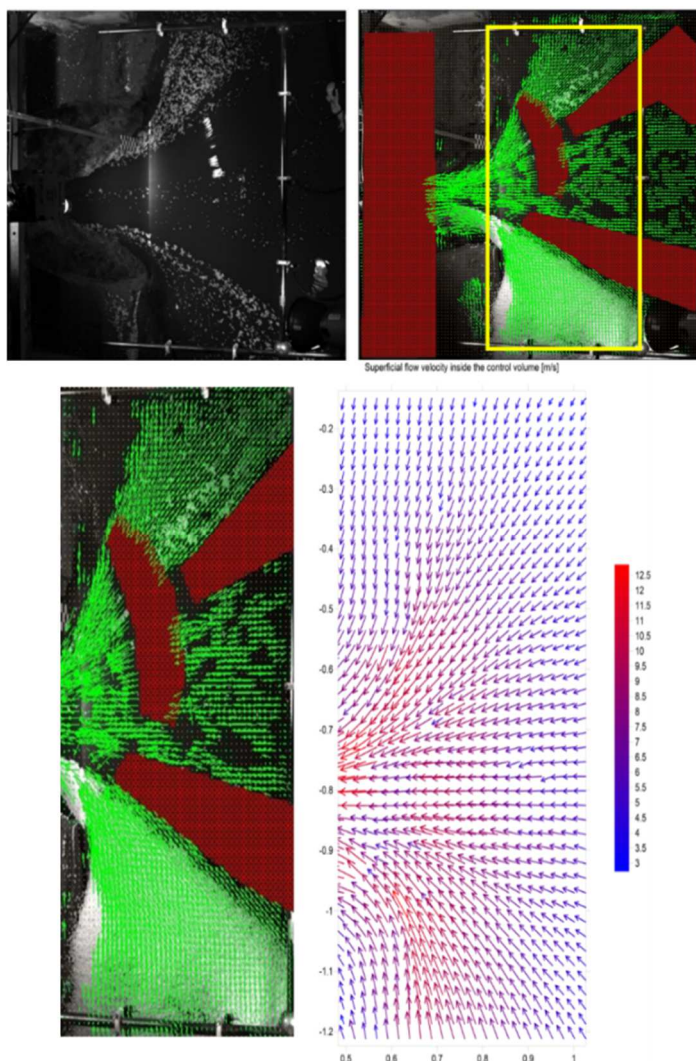


Figura 3.12 | Resultado do algoritmo de LSPIV aplicado às imagens adquiridas (pré-tratamento de dados)

3.2.3.2 Medições de concentrações de ar

A maneira mais comum para medir a concentração de ar em escoamentos baseia-se no uso de sondas intrusivas, nomeadamente usando sondas resistivas (Rajaratnam, 1962; Volkart, 1980; Afshar *et al.*, 1994) e óticas; existem ainda sondas simples ou duplas. Chanson é um investigador que tem desde há décadas conduzido estudos envolvendo escoamentos altamente arejados, nomeadamente em ressaltos hidráulicos, em descarregadores em degraus e em jatos (Chanson, 2002, 2004 e 2007; Murzyn and Chanson, 2008); de uma forma geral este investigador tem usado sensores duplos de fibra ótica para análise da concentração do ar. Chanson and Brattberg (2000) apresentam uma boa revisão do estado da arte no uso e medição de concentrações de ar em estruturas hidráulicas.

Tecnologias mais avançadas como por exemplo o uso de PIV apresentam, no caso da medição de escoamentos com ar, problemas relacionados com a reflexão do laser nas bolhas, havendo, no entanto, alguns investigadores que propõem diversas técnicas para ultrapassar esta limitação (Ryu *et al.*, 2005; Leandro *et al.*, 2012). No entanto, verifica-se que as tecnologias normalmente usadas para medição de velocidades têm limitações quando usadas no estudo de escoamentos com arejamento significativo. Assim, para o estudo de escoamentos bifásicos ar-água, a informação deve provir de instrumentação para medir velocidades em escoamentos com uma grande percentagem de ar, fornecendo simultaneamente informação sobre a velocidade e a concentração de ar.

No LNEC utiliza-se desde há cerca de duas décadas um tubo de Pitot modificado para medição da velocidade nos escoamentos com elevada concentração de ar (Figura 3.13). Esta tecnologia constituiu uma das primeiras soluções desenvolvidas para o efeito (Viparelli, 1953; Frizell *et al.*, 1994) e tem sido utilizada para caracterizar o escoamento bifásico na instalação para estudo de descarregadores em degraus e para medir a concentração do ar em ressaltos hidráulicos (Matos, 1999; Carvalho, 2002).



Figura 3.13 | Medição da concentração de ar: a) aparelhagem utilizada para a aquisição digital das concentrações de ar; b) sonda de ar em funcionamento

O funcionamento da sonda existente no LNEC assenta na medição da diferença entre a resistência elétrica do ar e da água. A ponteira da sonda é composta por dois elétrodos de platina, com 0,2 mm de diâmetro (impedindo a deteção de bolhas com diâmetro inferior); quando um ou ambos os elétrodos são atravessados por uma bolha de ar origina-se um aumento de tensão entre os elétrodos. A concentração de ar é definida como a percentagem do tempo em que cada elétrodo está em contacto com o ar, relativamente ao tempo total de medição. O aparelho desenvolvido pelo USBR permite a leitura da concentração de ar, tendo sofrido uma adaptação em Matos (1999) com o objetivo de permitir a aquisição de dados por computador (com uma frequência de amostragem de 30 kHz por canal de aquisição, com uma posterior filtragem a 30 Hz), permitindo estimativas mais exatas daquela grandeza.

3.2.3.3 Medições de caudais

A medição de caudais em escoamentos em pressão não envolve dificuldade de maior, mas a medição de caudais em escoamentos com superfície livre em canais de secção uniforme e, principalmente, em rios onde a secção é irregular reveste-se de alguma dificuldade. Com efeito, nestes casos, ocorre geralmente variação da área molhada e do padrão de velocidades e, muitas vezes, verificam-se diversos tipos de perturbações.

Em ambiente de laboratório, os tradicionais descarregadores Bazin e caleiras foram sendo substituídos por debitómetros eletromagnéticos. Os ensaios são de uma forma geral conduzidos em regime permanente.

Para conduzir ensaios em regime variável, Viseu (2006) utilizou um sistema de controlo de caudais e reprodução de hidrogramas, descrito em Palma (1999). Este sistema é constituído pelos seguintes elementos (Figura 3.14): i) um debitómetro eletromagnético; ii) uma válvula tipo borboleta motorizada; iii) um variador de velocidades eletrónico que dirige o acionamento da válvula e iv) uma unidade digital de interface ligada a um computador portátil à qual chega o sinal proveniente do debitómetro e que dá ordem de comando (de fecho ou de abertura da válvula), através do variador eletrónico, por forma a reproduzir hidrogramas de cheia, i.e., e assim permitir a realização de ensaios em regime variável.



Figura 3.14 | Sistema de controlo de caudais para realização de ensaios em regime variável: a) aspeto da válvula motorizada e do debitómetro ; b) aspeto do exterior da unidade digital de interface (Fonte: Viseu, 2006)

O comando e controlo da válvula motorizada são efetuados por recurso a um programa de cálculo, sendo o hidrograma de caudais a gerar inscrito previamente num ficheiro. O algoritmo de controlo, instalado num computador portátil, é ligado em série à unidade digital de interface que foi concebida com base num microcontrolador e montada numa caixa. É a esta unidade que chegam os sinais provenientes do debitómetro e do fim de curso da válvula motorizada e é desta unidade que sai o sinal de comando para o variador eletrónico que aciona a válvula motorizada.

Outra abordagem para a medição de caudais consiste em na multisensorização do nível e das velocidades, podendo o caudal ser obtido pela soma de cada medição de velocidade ponderada pela área associada a cada ponto de medição.

Amaral, 2017, propõe um sistema inovador para medir o caudal efluente da brecha de rotura de um aterro experimental, i.e., hidrogramas em regime variável. O sistema é composto pela seguinte instrumentação: i) duas câmaras de elevada velocidade, a primeira localizada a montante da barragem e direcionada para a brecha a fim de monitorizar a sua evolução geométrica no tempo e a segunda colocada na vertical e direcionada para o coroamento da barragem, por forma a conseguir acompanhar o movimento de partículas de esferovite lançadas no escoamento; ii) iluminação da secção da brecha com luz de elevada intensidade (laser com emissão na região verde do espetro) para fazer sobressair o contorno da brecha a cada instante com a intersecção do laser com o corpo da barragem. O posicionamento da instrumentação é apresentado na Figura 3.15, resultando o caudal da integração do campo de velocidades através da secção ocupada pelo escoamento.

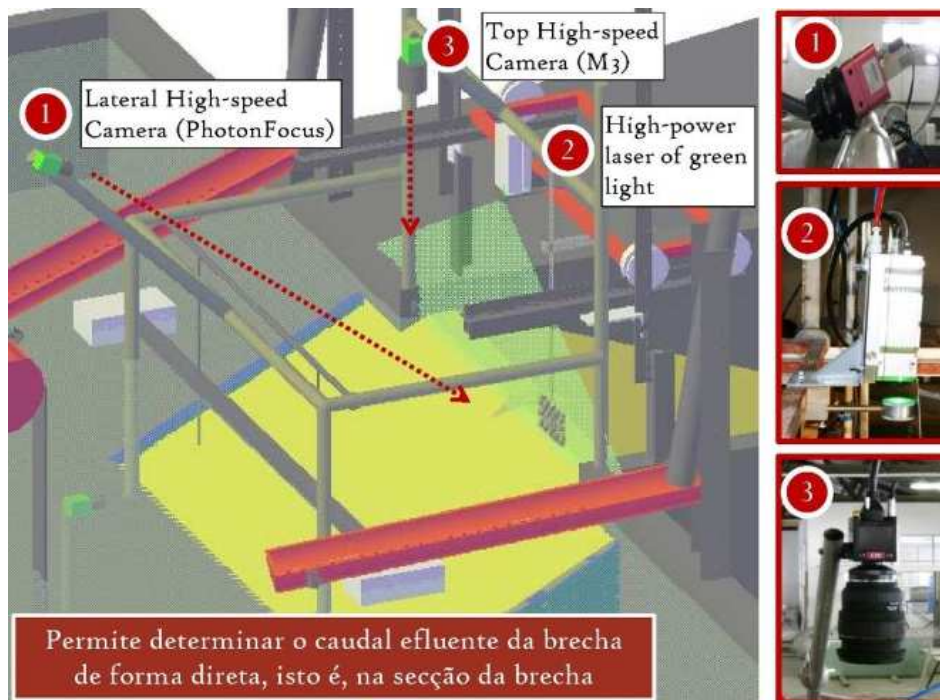


Figura 3.15 | Posicionamento da instrumentação necessária para a aplicação da estimativa direta do caudal efluente da brecha (fonte: Amaral, 2017)

Nesta última abordagem é possível determinar a evolução da área da brecha ao longo do ensaio com base nas imagens adquiridas com a primeira câmara; com base nas imagens adquiridas na

segunda câmara é possível aplicar um algoritmo de LSPIV para obter a série temporal dos campos de velocidade na secção da brecha. Os vários passos necessários para determinar o caudal efluente da brecha em rotura de forma direta encontram-se esquematizados na Figura 3.16

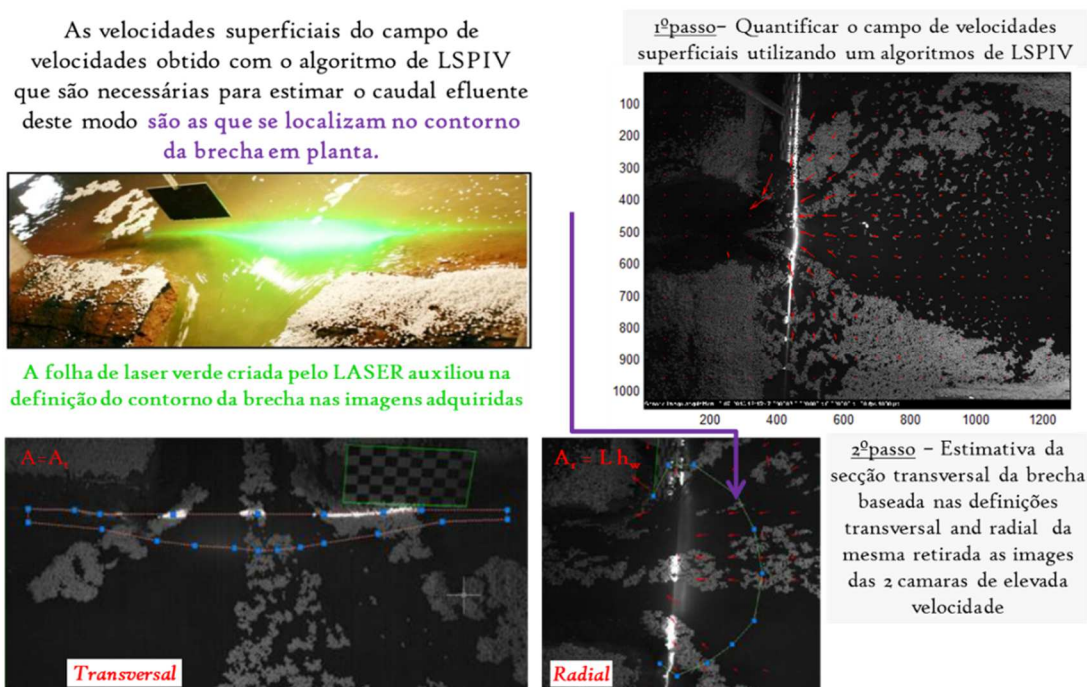


Figura 3.16 | Esquema da aplicação da estimativa direta do caudal efluente da brecha (Fonte: Amaral, 2017)

3.2.3.4 Medições da erosão

A medição e caracterização de erosões tem sido feita, no NRE, em duas linhas de estudos: os estudos em modelo físico da erosão a jusante de descarregadores de cheias e os estudos experimentais de pilares fundados em leitos aluvionares.

Tradicionalmente, o levantamento é feito pontualmente numa ou em várias posições das cavidades de erosão por recurso a limnímetros (Oliveto and Hager, 2002; Berger *et al.*, 2010), ou simplesmente por escalas métricas fixas em locais visíveis dos canais de ensaios, sendo gravadas imagens com câmaras (Mia and Nago, 2003; Lu *et al.* 2011; Diab, 2011). Outras abordagens envolvem o uso de sondas montadas em sistemas motorizados (Ballio and Radice, 2003; Link *et al.*, 2008). Embora capazes de representar a superfície das zonas erodidas, este tipo de técnicas é intrusivo, podendo alterar o campo do escoamento e, conseqüentemente, as características da erosão.

Note-se que os recentes avanços na tecnologia se traduziram na substituição da caracterização topográfica tradicionalmente obtidas pelo levantamento de perfis transversais por técnicas fotogramétricas ou de laser, capazes de realizar medições com elevada resolução espacial e gerar modelos tridimensionais, ou seja, Modelos Digitais de Terreno (DEM), envolvendo o uso de técnicas de derivação de nuvens de pontos. Assim, nos últimos anos, são usadas representações mais detalhadas da erosão recorrendo a scanners a laser (2D e 3D) que fornecem resultados fiáveis da

evolução das zonas erodidas quando a superfície livre do escoamento é relativamente calma, condição que pode ser de difícil garantia na proximidade de uma estrutura hidráulica.

De uma forma geral este tipo de tecnologia baseia-se na utilização de imagens, tal como no caso da fotogrametria. A aplicação desta técnica necessita de uma câmara digital e um conjunto de pontos de calibração fixos. A câmara é usada para fotografar a cavidade de erosão e a zona afetada na vizinhança, com imagens tiradas de diferentes locais a uma distância de cerca de meio metro do terreno inicial. Os pontos fixos são utilizados como referência espacial do modelo. É necessário usar um *software* específico de processamento de fotogrametria para construção da nuvem de pontos, sendo posteriormente construído o DTM através de um segundo *software* de pós-processamento que permite a criação de isolinhas de cotas de fundo e perfis (Figura 3.17).

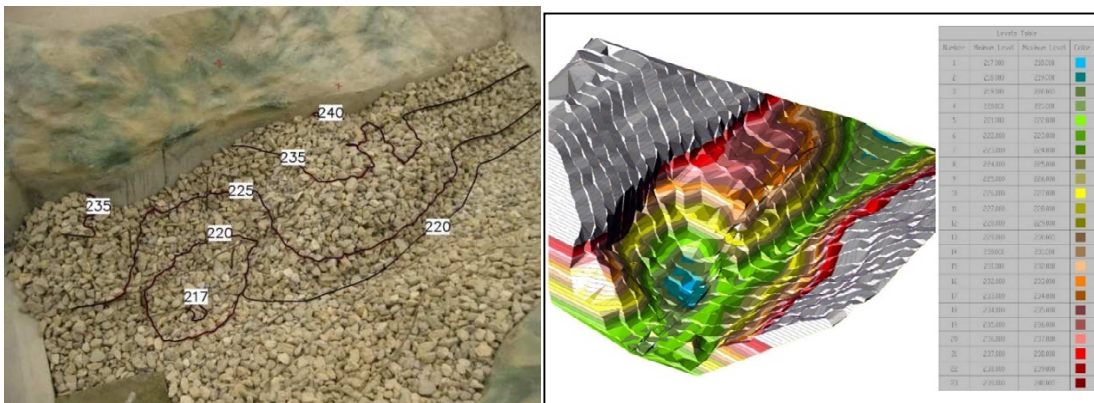


Figura 3.17 | Levantamento do fundo móvel a jusante de um trampolim: a) técnica tradicional; b) representação RGB da alteração do fundo móvel

Constitui igualmente um exemplo de tecnologia avançada para a medição das erosões que importa aprofundar o sensor Microsoft Xbox 360 *KINECT* (Figura 3.18) que permite a medição da superfície de fundo móvel para aplicações de laboratório. Este instrumento permite obter as cotas do fundo do terreno, gerando pontos com coordenadas a três dimensões (x, y e z) e permitindo simultaneamente a obtenção de imagens.

Trata-se de uma tecnologia baseada na análise de imagens obtidas por um projetor e duas câmaras internas de alta resolução (a primeira, uma câmara RGB e, a segunda, uma câmara de infravermelhos). O projetor infravermelho transmite um padrão predefinido de luz que se deforma com base na distância dos vários pontos ao sensor. O padrão deformado é capturado pela câmara de infravermelhos e é correlacionado contra um padrão de referência determinado com base na projeção de uma superfície colocada a uma distância conhecida do sensor para construir um mapa 3D do objeto. O procedimento de obtenção das superfícies das cavidades de erosão inclui o pós-processamento das imagens adquiridas por meio de um *software* 3D de processamento de malhas (CloudCompare). As nuvens de pontos resultantes também são usadas na criação de mapas topográficos, usando *softwares* específicos de mapeamento de contornos e superfícies 3D.

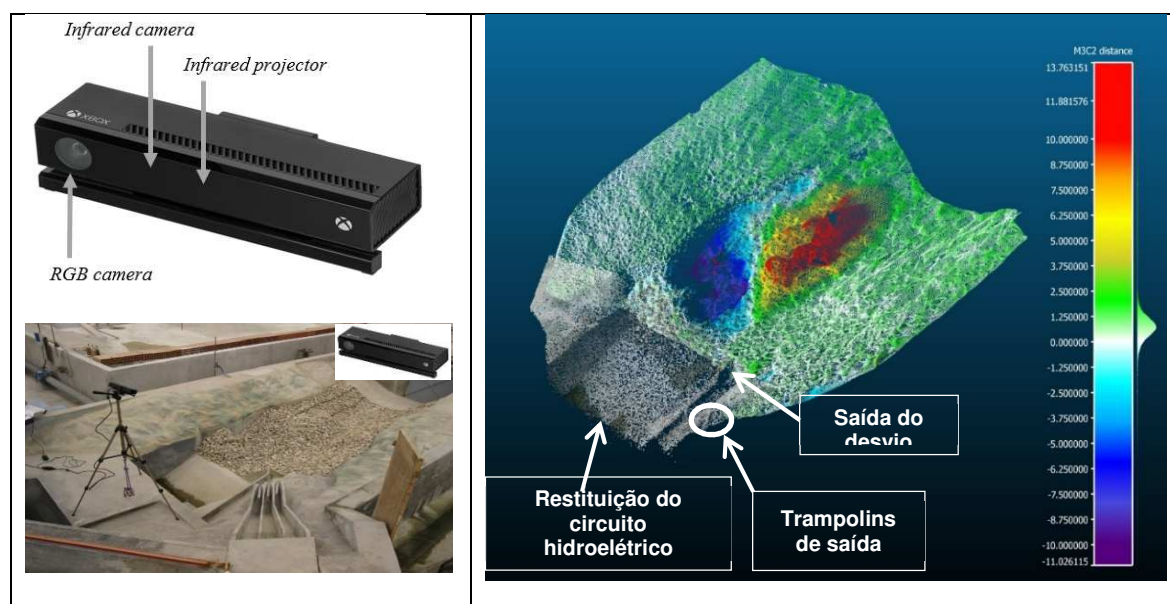


Figura 3.18 | Levantamento tridimensional do fundo móvel a jusante de um trampolim: a) sensor Kinect; b) representação RGB da alteração do fundo móvel (8 horas após o início da descarga)

Recentemente, foram publicados trabalhos onde a evolução temporal da cavidade de erosão em torno de encontros e pilares circulares se processou sem interrupção do teste experimental, através da aplicação de técnicas de processamento de imagem e de visão computorizada. Estas técnicas permitem uma análise contínua e não-intrusiva do desenvolvimento temporal da cavidade de erosão, com resolução espacial e temporal bastante significativa. A aplicação de tais técnicas evita o distúrbio introduzido pela interrupção e reinício da experiência, bem como o impacto das tecnologias de medição intrusiva, que, involuntariamente, podem alterar o resultado da experiência.

3.3 Estado da arte na modelação do escoamento em estruturas hidráulicas

3.3.1 Modelação numérica do escoamento em descarregadores

A modelação do escoamento com superfície livre em estruturas hidráulicas com geometria complexa, nomeadamente em descarregadores de cheias, representa um desafio significativo de investigação. A hidrodinâmica deste tipo de escoamento pode ser estudada por modelação física ou numérica. Tradicionalmente, em descarregadores a escolha cai na utilização de modelos físicos. No entanto, assiste-se hoje a um crescimento da modelação numérica, tendo as soluções analíticas constituído também uma abordagem realizada com algum sucesso no passado.

Cassidy (1965) protagonizou uma primeira tentativa para modelar o escoamento em descarregadores usando a teoria do escoamento potencial e mapeando-o num plano potencial complexo. Apresentou uma solução para localizar a superfície livre e para a estimativa de pressões na soleira que obteve, para um número limitado de casos, uma boa concordância com resultados experimentais. Também Lemos (1986) definiu as condições de aproximação do escoamento a

soleiras descarregadoras com base em funções analíticas de variável complexa que representavam as linhas de corrente do escoamento, com aplicação aos descarregadores de cheia das barragens de Monte da Rocha e do Alto Rabagão.

Ikegawa and Washizu (1973) e Betts (1979) conseguiram uma melhor convergência da solução de Cassidy usando a técnica dos elementos finitos lineares. Ellis (1985) apresenta um primeiro estudo em que as equações do escoamento são resolvidas pelo método das diferenças finitas. Também Berger and Winant (1991) calcularam o escoamento sobre um descarregador resolvendo uma forma modificada das equações de Saint-Venant unidimensionais e obtiveram uma concordância razoável com medições experimentais em canais 1-D. Li *et al.* (1989) utilizaram uma abordagem 2-D e ajustaram uma grelha à fronteira de montante para resolver a equação de Laplace, tendo, igualmente, obtido uma boa concordância com resultados experimentais.

Muitas destas técnicas pioneiras apresentam limitações na sua aplicação a geometrias 3-D complexas, nomeadamente devido ao facto de a turbulência ter um papel determinante na determinação do campo do escoamento. A modelação numérica CFD que, tal como já foi referido, se baseia nas equações de Navier-Stokes com o acoplamento de um modelo de turbulência, tem dado contributos importantes neste domínio. Assim, uma pesquisa sobre a modelação numérica do escoamento em descarregadores revela que esta começou como um instrumento de investigação em instituições passando a ser gradualmente aceite pela comunidade técnica da engenharia de barragens (Kjellesvig, 1996; Olsen and Kjellesvig, 1998; Savage and Johnson, 2001; Johnson and Savage 2006).

Kjellesvig (1996) apresenta um modelo 2-D baseado nas equações de Navier-Stokes com um modelo de turbulência $k-\epsilon$, aplicado a um descarregador modelado por malha estruturada não ortogonal, tendo calculado o coeficiente de vazão. Posteriormente, estendeu o método por forma a incluir a modelação 3-D (Olsen and Kjellesvig, 1998). Guo *et al.* (1998) expandiram a teoria do escoamento potencial aplicando-a, com sucesso, a descarregadores de lâmina livre. Burgisser and Rutschmann (1999) usaram o método dos elementos finitos para resolver iterativamente as equações RANS e, para um dado escoamento, modelaram com sucesso a superfície livre bem como os campos de velocidades e de pressões com uma malha que se adapta localmente a alterações da superfície livre.

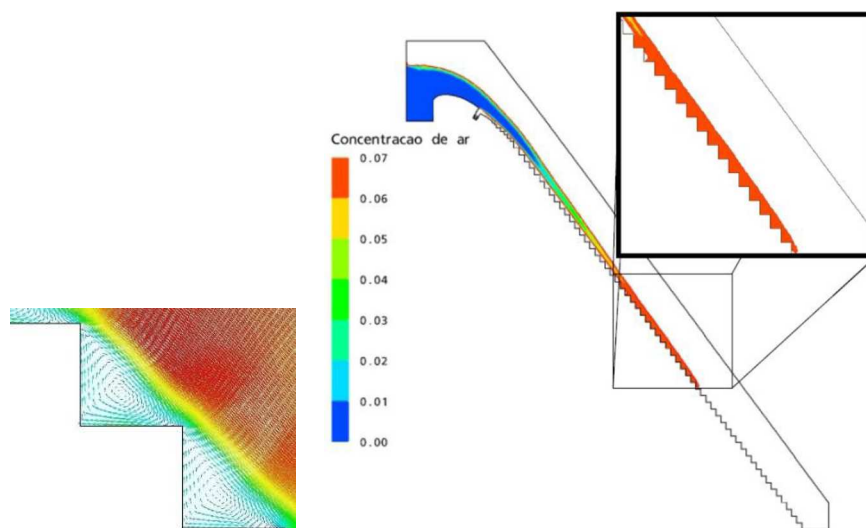
Song and Zhou (1999) propuseram uma abordagem numérica para estudar o efeito da geometria no escoamento com superfície livre num descarregador em túnel. Resolveram as equações com um método explícito de volumes finitos e compararam os resultados numéricos do perfil da superfície livre, pressões e velocidades com resultados experimentais. Assy (2001) usou o método das diferenças finitas com uma nova representação do problema de Neumann nos pontos de fronteira para simular o escoamento sobre descarregadores. Chatila and Tabbara (2004) estudaram o escoamento em soleiras do tipo WES usando um modelo numérico, tendo sido utilizado como validação o perfil da superfície livre medido numa instalação experimental para diferentes cargas.

Em Portugal, são pioneiros os trabalhos de Carvalho and Lemos (2008), que simularam numericamente o ressalto hidráulico em bacias de dissipação, e a investigação intensiva realizada

para estudo do escoamento em descarregadores em degraus, incluindo medição da concentração de ar e da distribuição de velocidades (Matos and Frizell, 2000; Meireles, 2004). Neste âmbito foram igualmente desenvolvidos modelos empíricos para analisar as propriedades do escoamento bifásico ar-água ao longo do canal (Meireles *et al.*, 2012 e 2014) e empreendida a modelação numérica do escoamento neste tipo de descarregadores (Meireles, 2011; Bombardelli *et al.*, 2010; Toro *et al.*, 2016).

Com efeito, os descarregadores em degraus constituem um tipo de estruturas hidráulicas onde se tem realizado modelação numérica (e experimental) de forma continuada. Neste tipo de estruturas, a modelação do escoamento turbulento e claramente bifásico constitui um desafio e a investigação realizada tem sido particularmente ativa nas últimas duas décadas (Chanson 1993 e 2010). Chen *et al.* (2002) utilizaram o modelo de turbulência $k-\epsilon$, uma malha não estruturada para adaptar o contorno irregular e o método de volume de fluido (VOF) para resolver o problema complexo da localização da superfície livre. Neste estudo as diversas grandezas (altura do escoamento, pressão nos degraus do descarregador e campos das velocidades) foram obtidas numericamente e comparadas com resultados experimentais.

Cheng *et al.* (2006) utilizaram adicionalmente um método de acoplamento para as equações de pressão e de velocidades e determinaram os perfis de concentração de ar adimensionalizados em diversos degraus. Tabbara *et al.*, 2005 realizaram simulações numéricas para diferentes configurações dos degraus e Arantes (2007) concebeu um arejador de fundo e modelou numericamente a incorporação de ar promovida por esse dispositivo neste tipo de descarregador (Figura 3.19). Estudos do escoamento em descarregadores em degraus envolvendo modelação numérica, comparação com resultados experimentais e análises de modelos de turbulência e VOF têm sido igualmente empreendidos nos anos mais recentes por diversos investigadores (Chinnarasri *et al.*, 2013; Eghbalzadeh and Javana, 2012).



(Fonte: <http://vertedoresemdegraus.blogspot.com/p/linhas-de-pesquisa.html>)

Figura 3.19 | Grandes turbilhões formados entre degraus. Equações de RANS associadas ao modelo $k-\epsilon$. Simulação numérica via CFD (Fonte: Arantes,2007)

O número de estudos em dinâmica dos fluidos computacional tem crescido significativamente nos anos mais recentes, nomeadamente os que se centram nas estruturas hidráulicas. De facto, com os desenvolvimentos da capacidade de processamento dos computadores e dos modelos CFD, nomeadamente de *softwares* comerciais FLOW-3D e FLUENT, têm sido empreendidos vários estudos de análise do escoamento em descarregadores com resultados positivos (Gessler 2005; Kim 2007; Kim *et al.*, 2012; Milési and Causse 2014; Montagna *et al.*, 2011).

Particular atenção tem sido dada à modelação com o modelo FLOW-3D do escoamento em descarregadores envolvendo soleiras retilíneas (do tipo WES), que constituem uma solução comum em barragens. Assim, existem estudos de comparação dos resultados CFD utilizando este último *software* que obtiveram uma boa concordância com os resultados em modelo físico no que diz respeito à vazão e aos campos de velocidade e pressões neste tipo de descarregador (Savage and Johnson, 2001; Ho and Donohoo, 2001; Ho *et al.*, 2003; Kim and Park, 2005; Chanel and Doering, 2007; Kanyabujinja, 2015 e Serafeim *et al.*, 2017). Parsaie *et al.* (2015) modelaram numericamente os muros de entrada de um descarregador, verificando a influência da sua geometria na redução da capacidade de descarga do caudal da cheia de projeto, devida à formação de um escoamento circulatório.

O modelo FLOW-3D também foi usado com sucesso em descarregadores existentes, nomeadamente para reanalisar os comportamentos do descarregador da barragem de Wanapum durante a passagem da Cheia Máxima Provável (Griffith *et al.*, 2007), bem como do reforço e recuperação do descarregador da barragem de Dalles (Cook *et al.*, 2006), ambas no rio Columbia. Kim *et al.* (2010) empreenderam a modelação do escoamento sobre o descarregador da barragem de Karian, na Indonésia. Mais recentemente, Fadaei-Kermani and Barani (2014) usaram o modelo FLOW-3D para a simulação do escoamento ao longo do descarregador em canal da barragem de Shahid Abbaspour, no Irão, tendo obtido diferenças máximas de 5,47% e 7,97%, nos valores das velocidades médias e alturas piezométricas, respetivamente, relativamente a medições em modelo físico. Kumcu (2016) empreendeu uma análise comparativa entre os resultados obtidos por uso de modelação física e numérica CFD para o descarregador da barragem de Kavsak, na Turquia, em termos das curvas de vazão e dos campos de velocidades e pressão, tendo igualmente obtido boas concordâncias.

Foram também realizadas simulações para validar modelos CFD aplicados a escoamentos turbulentos sobre soleiras do tipo WES usando o modelo comercial ANSYS CFX e os resultados numéricos foram comparados com os dados experimentais disponíveis, publicados pelo Army Corps of Engineers (Bouhadji, 2004).

Por outro lado, o modelo FLUENT foi utilizado no estudo do reforço da barragem de Cantão (EUA). A geometria da zona de aproximação foi otimizada e o perfil da superfície livre foi estimado recorrendo à técnica VOF. Finalmente, a forma final do descarregador foi testada em modelo físico (Wosnik *et al.*, 2008). Mais recentemente, os resultados numéricos do modelo FLUENT, no que diz respeito ao arrastamento de ar nos arejadores existentes, foram comparados com dados obtidos em modelo físico (Ozturk and Aydin, 2009). Dargahi (2006) empreendeu uma simulação 3D de um

descarregador, prevendo os perfis da superfície livre e a capacidade de vazão dentro de um intervalo de precisão de 1,5-2,9%, dependendo da carga de funcionamento (comparando com resultados de modelo físico). Outros trabalhos verificaram uma concordância adequada entre resultados numéricos e experimentais para a elevação da superfície livre e campos de pressão e de velocidades ao longo de descarregadores (Zhenwei *et al.*, 2012; Serafeim *et al.*, 2017).

Existem algumas aplicações do modelo OpenFOAM a estruturas hidráulicas: Bayon *et al.* (2016) realizaram uma análise comparativa do desempenho deste modelo e do modelo FLOW-3D na modelação do ressalto hidráulico. No presente Programa de Investigação é proposto o uso de uma versão modificada do modelo OpenFOAM – o modelo IHFOAM. Este, tal como já foi referido, embora tenha sido desenvolvido para simular problemas de engenharia costeira, já foi validado para fenómenos fluviais, nomeadamente no caso do escoamento que deriva da rotura de barragens e do escoamento em canais com curvas em planta, demonstrando bons resultados (Lara *et al.* 2014; Higuera *et al.* 2013 b)).

No LNEC, as simulações numéricas do escoamento em estruturas hidráulicas têm sido realizadas recorrendo ao *software* comercial FLOW-3D e livre IHFoam. A calibração destes modelos tem sido feita a partir do trabalho em modelação física de estruturas hidráulicas do qual o LNEC tem uma grande tradição. Assim, o modelo FLOW-3D foi calibrado com os resultados experimentais de três modelos físicos existentes: modelo da chaminé de equilíbrio de Salamonde II e dos descarregadores de cheias em canal das barragens de Chertioua e de Girabolhos (Mendes e Viseu, 2013; Granell *et al.*, 2015). O modelo IHFOAM foi calibrado com os resultados do modelo físico do descarregador de cheias da barragem de Fierza (Melo e Mendes, 2017).

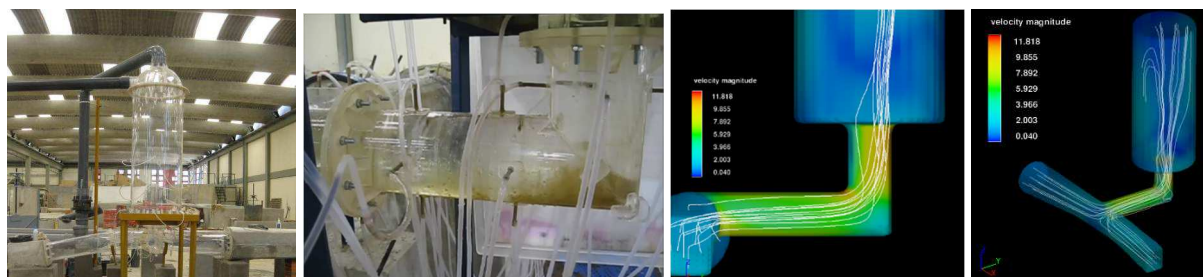


Figura 3.20 | Chaminé de equilíbrio de Salamonde II: a) e b) modelo físico; c) e d) resultados do modelo numérico: magnitude da velocidade e linhas de corrente (Viseu *et al.*, 2015)

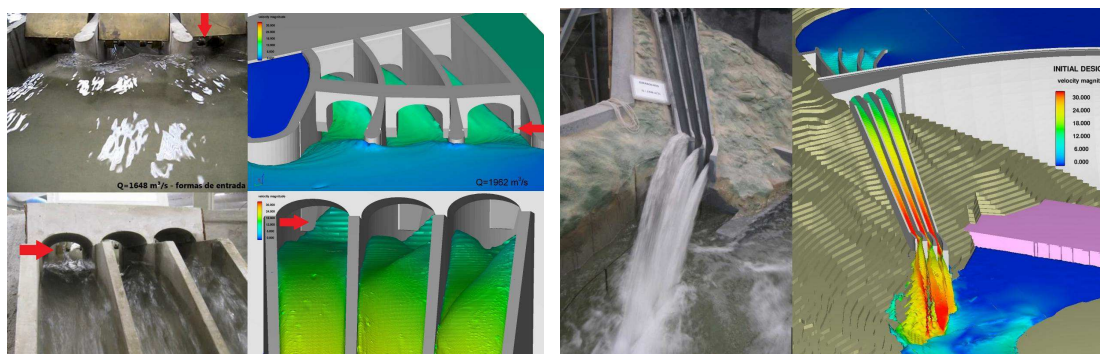


Figura 3.21 | Comparação de resultados de modelos numérico e físico no descarregador de Girabolhos: a) e b) escoamento no início do canal; c) e d) escoamento no trampolim de saída (Granell *et al.*, 2015)

3.3.2 Modelação dos processos de erosão junto a pilares de pontes

O fenómeno da interação entre o sistema escoamento/pilar/sedimento com a consequente erosão localizada do leito do rio tem sido estudado desde a década de 1950 tendo resultado num número considerável de estudos.

Laursen and Toch (1956) foram pioneiros na descrição do mecanismo do escoamento e do desenvolvimento da erosão junto a pilares de secção circular, no que foram seguidos por inúmeras outras investigações contemplando outros regimes de escoamento, bem como diferentes tipos de fundações, de formas de pilares e de características de sedimentos. As abordagens para o estudo deste tipo de escoamento complexo e do mecanismo de erosão associado são variadas, envolvendo análises teóricas e analíticas, modelação física e experimental bem como, mais recentemente, a modelação numérica, nomeadamente usando esquemas CFD acoplados ou não a ferramentas computacionais morfodinâmicas (Sumer, 2011). De uma forma geral, há três tópicos principais de investigação nesta temática.

Um primeiro tópico consiste na caracterização da estrutura do escoamento junto a pilares simples e/ou complexos e no aprofundamento do conhecimento do mecanismo envolvido no processo erosivo (e.g. Dargahi, 1989; Ahmed and Rajaratnam, 1998; Graf and Isiaro, 2002; Dey and Raikar, 2007; Moreno *et al.*, 2012).

Um segundo tópico de investigação é o estudo da influência de parâmetros específicos no estabelecimento da profundidade de equilíbrio, como por exemplo a forma e o alinhamento do pilar, o tipo e a intensidade do escoamento, bem como o tipo e a graduação sedimento (e.g., Laursen and Toch, 1956; Shen *et al.*, 1969; Dietz, 1972; Ettema, 1976; Ettema, 1980; Chiew, 1984; Ettema *et al.*, 1998 a) e b); Melville and Coleman, 2000; Sheppard *et al.*, 2004; Lança *et al.*, 2013; Fael *et al.*, 2014).

Um terceiro tópico consiste no desenvolvimento de metodologias e ferramentas para estimar a profundidade máxima da erosão e a sua evolução (Franzetti *et al.*, 1982; Unger and Hager, 2007; Kothiyari *et al.*, 2007; Simarro *et al.*, 2011; Lança *et al.*, 2013). Outros investigadores, para além de proporem metodologias para avaliar a evolução da profundidade máxima de erosão, forneceram um conjunto de equações semi-empíricas para este efeito (Breusers *et al.*, 1977; Dargahi, 1990; Breusers and Raudkivi, 1991; Melville and Coleman, 2000).

Para efeitos de engenharia, a principal finalidade consiste na previsão da profundidade máxima da cavidade de erosão, d_{se} , até as condições de equilíbrio serem alcançadas. Atualmente, são considerados como referência três métodos de previsão da profundidade de equilíbrio desenvolvida junto de pilares de pontes (Moreno *et al.*, 2016):

- o método da Universidade de Auckland da Nova Zelândia (Melville and Coleman 2000; Coleman 2005; Melville *et al.*, 2006);
- o método do Florida Department of Transportation (FDOT) dos EUA (Sheppard and Renna, 2010);

- o método do HEC-18 desenvolvido pelo Hydrologic Engineering Center da Federal Highway Administration (FHWA) dos EUA e que se baseia nos estudos de Jones (1989), Salim and Jones (1996) e Jones and Sheppard (2000). A última versão revista do manual da FHWA foi apresentada por Arneson *et al.*, (2012).

Estes métodos têm essencialmente por base as formulações propostas por Melville and Coleman (2000), Richardson and Davis (2001) e Sheppard and Renna (2005, 2010).

Assim, Melville and Coleman (2000) propõem para o cálculo da profundidade de erosão de equilíbrio três equações, as quais, com as hipóteses simplificativas de se considerar o sedimento uniforme e se desprezar os efeitos da contração da secção transversal, são as seguintes:

$$d_{se} = 2,4 b \text{ se } h/b > 10/7 \quad (3.1)$$

$$d_{se} = 2\sqrt{hb} \text{ se } 1/5 < h/b < 10/7 \quad (3.2)$$

$$d_{se} = 4,5 h \text{ se } h/b < 1/5 \quad (3.3)$$

sendo:

d_{se} – profundidade de erosão de equilíbrio

h – altura do escoamento não perturbado a montante do pilar

b – diâmetro do pilar cilíndrico

Arneson *et al.* (2012) recomendam tanto a equação de Richardson and Davis (2001) como a de Sheppard and Renna (2005, 2010) para a erosão junto a pilares circulares em areia uniforme e sem transporte sólido.

A equação dos primeiros autores baseia-se na equação da Universidade do Colorado e é a seguinte:

$$\frac{d_{se}}{b} = 2 \times 1,1 \left(\frac{h}{b}\right)^{0,35} Fr^{0,43} \quad (3.4)$$

A equação dos segundos autores é mais completa e foi deduzida para $(0.47 < U/U_c < 1.0)$:

$$\frac{d_{se}}{b} = 2,5 \tanh \left[\left(\frac{h}{b}\right)^{0,4} \right] \times \left\{ 1 - 1,2 \left[\ln \left(\frac{U}{U_c}\right) \right]^2 \right\} \left[\frac{b/D_{50}}{0,4 \left(b/D_{50}\right)^{1,2} + 10,6 \left(b/D_{50}\right)^{-0,13}} \right] \quad (3.5)$$

sendo:

U - velocidade média do escoamento não perturbado na secção a montante do pilar

U_c – velocidade média crítica de início do movimento

D_{50} – diâmetro mediano do sedimento

Note-se que existem muitos outros modelos de previsão da profundidade de erosão junto de pilares simples e de pilares complexos. Estas equações são essencialmente obtidas por via empírica, tendo por base estudos experimentais e ensaios conduzidos no passado: nas últimas sete décadas para pilares simples e, nas últimas duas décadas, para pilares complexos. Nos últimos anos, diversos autores apresentaram estados da arte detalhados nesta temática (Fael *et al.*, 2014; Moreno, 2016; Aksoy *et al.*, 2017; Pandey *et al.*, 2017).

Assim, os estudos mais relevantes do escoamento na vizinhança de pilares circulares baseados em abordagens experimentais incluem as seguintes referências: Melville (1975), Melville and Raudkivi (1977), Morton and Evans-Lopez (1986), Dargahi (1989, 1990), Yanmaz and Köse, 2007, Ahmed and Rajaratnam (1997, 1998), Graf and Istiarto (2002), Muzzammil and Gangadhariah (2003), Rao *et al.* (2004), Ettema *et al.* (2006), Zhao and Huhe (2006), Dey and Raikar (2007), Unger and Hager (2007), Link *et al.* (2008), Nogueira *et al.* (2008), Sadeque *et al.* (2008), Kirkil *et al.* (2008, 2009), Diab (2011), Khosronejad *et al.* (2012), Radice and Tran (2012) bem como Ramos *et al.* (2016).

Para além da abordagem empírica e experimental, têm igualmente sido desenvolvidas, nos anos mais recentes, ferramentas computacionais baseadas na dinâmica dos fluidos computacional (CFD). Assim, é possível encontrar na literatura vários estudos para prever não só a hidrodinâmica do escoamento, nomeadamente usando modelos de turbulência avançados, como também o transporte de sedimentos e as alterações morfológicas associadas.

Note-se que a previsão do transporte de sedimentos exige um processo de modelação acoplado, já que as alterações do leito do rio induzidas pela erosão/deposição afetam o escoamento, que por sua vez influencia a distribuição das tensões de arrastamento no fundo e, portanto, a concentração de sedimentos e, em última análise, a topografia do leito (Zeng *et al.*, 2005). Têm sido desenvolvidos modelos computacionais para a previsão da evolução topográfica do leito e do equilíbrio batimétrico incorporando ambos os processos (Rijn, 1984; Lin and Falconer, 1996; Gessler *et al.*, 1999; Wu *et al.*, 2000; Olsen, 2003 e 2016; Zeng *et al.*, 2005).

De salientar os estudos de Richardson and Panchang (1998) que realizaram simulações tridimensionais do escoamento junto a pilares circulares usando o *software* FLOW-3D e compararam os resultados numéricos com os dados experimentais obtidos por Melville and Raudkivi (1977), obtendo uma boa concordância. Mais tarde, Chen (2002) empregou as equações de RANS para prever a erosão localizada e Roulund *et al.* (2005) desenvolveram um estudo experimental e numérico do escoamento em torno de pilares circulares, usando um modelo de turbulência k- ϵ . Estes últimos autores incidiram a análise na vorticidade do escoamento, bem como na influência da rugosidade do leito no mecanismo de erosão.

Mais recentemente, Abdelaziz (2011) simulou numericamente o escoamento e o transporte sólido junto a pilares circulares e comparou os resultados dos campos de velocidade e da topografia da cavidade de erosão com os dados obtidos experimentalmente por Unger and Hager (2007). Sumer (2014) apresenta um estado da arte atual no que concerne a avanços numéricos da modelação da erosão junto a pilares de pontes, recentemente atualizado por Ettema *et al.* (2017).

3.3.3 Principais projetos no LNEC neste domínio

A realização de investigação no domínio da modelação numérica dos escoamentos em estruturas hidráulicas não tem beneficiado de projetos com financiamento externo. Pelo contrário, a investigação dos processos erosivos junto a pilares de pontes beneficiou nos anos mais recentes de financiamento atribuído tanto pela FCT como pela União Europeia. Assim, são de realçar a realização os seguintes projetos:

FCT NetFluv, “*Rede de Investigação em Hidráulica Fluvial*”, (2013-2016). Projeto liderado pelo IST e em colaboração com o LNEC, a Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e a Universidade da Beira Interior (UBI). Os objetivos específicos do projeto foram: i) levar a cabo investigação fundamental nas áreas em que o consórcio tem sido tradicionalmente produtivo, garantindo um bom nível de publicação e ii) proceder a investigação fundamental e aplicada em áreas relevantes para a prática de engenharia. Foi empreendido um número de ações de investigação, organizadas nestes dois grandes grupos, com os seguintes objetivos:

- realizar investigação fundamental em hidrodinâmica e mecânica do transporte sólido, incluindo cinco ações de investigação: i) caracterização hidrodinâmica das trocas verticais de quantidade de movimento em rios de calhau rolado; ii) estudo da dispersão de sedimentos em suspensão em canais com vegetação; iii) análise da estrutura do escoamento em cavidades de erosão; iv) desenvolvimento de modelos de turbulência; i5) estudo da estrutura do escoamento e da interação com transporte sólido em situação de cheias;
- realizar investigação fundamental e aplicada sobre cheias, morfologia e mitigação de riscos em rios, incluindo: i) desenvolver medidas de mitigação de erosões localizadas; ii) estudo da morfodinâmica fluvial; iii) modelação de cheias naturais; iv) modelação de cheias de rotura de barragens e escoamentos torrenciais.

FP7 SEDITRANS, “*Sediment transport in fluvial, estuarine and coastal environment*”, (2013-2017). Tratou-se de um projeto do tipo Multi-ITN (Multipartners Networks for Initial Training) inserido nas Ações Marie Curie promovidas no âmbito do 7º Programa Quadro da União Europeia (PEOPLE-2013-ITN.) O projeto SEDITRANS incluiu uma rede de parceiros (6 instituições académicas e 4 parceiros de consultoria) com o objetivo de contribuir para a formação de jovens investigadores nas áreas do transporte de sedimentos em ambiente fluvial, estuarino e costeiro e suas aplicações. O projeto ofereceu um programa de formação a 12 jovens investigadores e a 4 investigadores com experiência através da investigação interdisciplinar. Incluiu um programa académico abrangente, a

mobilidade junto a parceiros industriais, workshops, cursos de inverno e verão, conferências temáticas, produção de guias e atividades complementares.

O projeto foi liderado pela University of Patras e em colaboração com o LNEC, Université Catholique de Louvain (UCL) (www.uclouvain.be), University of Cyprus (UCY) (www.ucy.ac.cy), Instituto Superior Técnico (IST) (www.tecnico.ulisboa.pt), Università degli Studi di Trieste (UNITS) (www.units.it), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) (www.epfl.ch), Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) (www.lnec.pt), Fugro GeoConsulting (FU) (www.fugrogeoconsulting.com), Idrostudi Srl (IDR) (www.idrostudi.it) e a Stucky Ltd (ST) (www.stucky.ch). No projeto SEDITRANS a investigação assentou em:

- modelação e desenvolvimento de algoritmos para o transporte de sedimentos em rios e zonas costeiras e para correntes de turbidez;
- realização de ensaios experimentais e simulação do transporte de sedimentos em rios e zonas costeiras e correntes de turbidez em albufeiras e em canhões submarinos.

Os ensaios visaram a melhor compreensão fenomenológica por forma a melhorar os modelos conceptuais sobre os quais as ferramentas de simulação foram desenvolvidas. As ferramentas de simulação, compatíveis com computação de alto desempenho, foram exploradas em aplicações de engenharia reais durante e após o período de duração do projeto. A rede foi estruturada de forma a promover a coordenação das atividades de investigação e ensino em transporte de sedimentos ao nível europeu, incrementando a competitividade europeia nesta importante área de Ciência & tecnologia.

FCT COMPLEX, “*Estudo experimental de erosões localizadas junto de pilares complexos*”, (2010-2013). Projeto liderado pelo IST, em colaboração com o LNEC, a FEUP, a Universidade do Algarve (UAAlg) e a Universidade da Beira Interior (UBI). O objetivo da equipa de projeto foi desenvolver um extenso programa experimental, envolvendo a participação das cinco instituições de investigação portuguesas supracitadas, para o estudo exaustivo das erosões localizadas junto de configurações plausíveis de pilares complexos de pontes sobre rios com fundo móvel aluvionar. O objetivo final consistiu na produção de um manual aplicável a pilares simples e complexos.

Os ensaios foram organizados em quatro ações que constituem a base para 3 mestrados e 2 doutoramentos:

- o primeiro centrou-se em i) análise do efeito da dimensão relativa dos sedimentos em pilares simples ii) estudo da erosão de equilíbrio em grupos de estacas cilíndricas correspondentes a pilares complexos encabeçados num maciço acima da superfície livre;
- o segundo estudou a parcela da profundidade de erosão imputável à coluna de pilares complexos assente numa ou duas fiadas de estacas e valores das razões entre a altura do escoamento e a largura do encabeçamento e entre a largura e o comprimento do encabeçamento.

No LNEC foram realizados, no CIV, 80 ensaios com a duração de 15 a 25 dias em contínuo, com três modelos de pilares fundados em duas fiadas de estacas. Os resultados foram publicados em eventos e revistas científicas. Foi ainda desenvolvida uma tese de doutoramento (Moreno, 2016).

3.4 Oportunidades de investigação

3.4.1 Modelação híbrida

Tal como já foi referido, a modelação física em estruturas hidráulicas constitui uma ferramenta bastante rigorosa, dada a complexidade do escoamento, mas verifica-se que se trata de uma abordagem onerosa e *time-consuming*, levantando ainda alguns problemas no que diz respeito aos efeitos de escala. Os avanços futuros nesta área prendem-se com a possibilidade de usar tecnologias inovadoras de medição de grandezas hidráulicas. Com efeito, no NRE, ao contrário do que acontece com a caracterização dos escoamentos com superfície livre fluviais, que têm beneficiado da utilização de instrumentos sofisticados para medição das características médias e instantâneas do escoamento, e conseqüentemente turbulência, tal não tem ocorrido em estruturas hidráulicas, tais como descarregadores.

A modelação numérica representa atualmente um enorme potencial para a investigação e para as aplicações práticas que se estão a tornar cada vez mais comuns. Os principais problemas associados à modelação numérica são o facto de os escoamentos em questão serem rapidamente variados bem como a coexistência de regimes lento e rápido, o desenvolvimento da camada limite turbulenta, o arrastamento de ar, bem como o facto da superfície livre ser à partida desconhecida.

Assim, a modelação numérica de escoamentos em descarregadores em todos os regimes de escoamento, que permitiria a engenheiros e cientistas experimentar múltiplas soluções num tempo relativamente curto e com custos limitados, ainda não constitui uma prática corrente. Este é, assim, um tema forte para investigação, que visa tornar as soluções numéricas um complemento para as ferramentas experimentais disponíveis na análise do escoamento em estruturas hidráulicas.

Com efeito, e tal como já foi referido, os modelos numéricos de estruturas hidráulicas não são suficientes por si mesmos e carecem da abordagem experimental, como forma de validação e calibração. Uma vez realizados estes passos, os modelos CFD permitem realizar um grande número de análises detalhadas e avaliar configurações de múltiplas estruturas em menos tempo. Deste modo poupam recursos humanos e permitem adicionalmente conhecer as características do escoamento em todas as células do domínio, em oposição às medições experimentais que são quase sempre pontuais (Chanson, 2013). Portanto, eles serão ferramentas essenciais no futuro.

Em conclusão, verifica-se que ambas as abordagens têm limitações, nomeadamente em termos de tempo e custos para os estudos experimentais e de rigor e aplicabilidade para a simulação numérica. Atendendo ao exposto, considera-se que a abordagem mais correta para o estudo destes escoamentos é uma abordagem conjunta entre a modelação física e a modelação numérica que pode atenuar limitações de ambos os métodos. Em primeiro lugar, conseguir-se-á uma redução de

tempo nos estudos, já que o modelo físico pode ser construído baseado na otimização das formas conseguidas pelo modelo numérico e que o esforço numérico pode ser realizado durante as primeiras fases da construção do modelo físico. Em segundo lugar será possível validar os modelos numéricos para um conjunto mais vasto de soluções.

3.4.2 Escoamento em descarregadores de cheias

As principais necessidades de investigação no NRE prendem-se com o desenvolvimento de uma abordagem híbrida, integrando métodos numéricos e físicos/experimentais, para analisar as lacunas de conhecimento identificadas em escoamentos com superfície livre, centrados no estudo de descarregadores de cheias, que permitam realizar estudos mais aprofundados, eficientes e com menores custos.

A abordagem procura não se limitar ao uso de dados experimentais (e, quando possível, informação de protótipo) para melhorar e validar os modelos numéricos, mas propõe o desenvolvimento de uma metodologia com uma forte interação do uso de técnicas experimentais e modelos numéricos de alta resolução para resolver os problemas relacionados com o escoamento em estruturas hidráulicas.

A metodologia será colocada em prática, usando principalmente um tipo de estrutura hidráulica: os descarregadores em canal, mas a experiência que vai ser adquirida na investigação experimental e numérica detalhada nestes descarregadores será utilizada para ampliar a utilização de códigos CFD a outras estruturas hidráulicas, nomeadamente outros tipos de descarregadores de cheia, nomeadamente não-convencionais, tomadas de água etc. Esta ampliação será avaliada utilizando trabalhos realizados ou em curso no LNEC.

Especificamente, em termos de modelação numérica pretende-se melhorar o modelo de *software* livre IHFoam para aplicações no âmbito das estruturas hidráulicas, desenvolvendo subrotinas específicas para considerar escoamentos bifásicos ar-água, i.e., modelos de entrada e transporte/arrastamento de ar (air-entrainment). Esta componente destina-se a complementar a tradicional abordagem experimental na modelação do escoamento em estruturas hidráulicas. Os modelos numéricos calibrados serão posteriormente utilizados para a análise de soluções para descarregadores.

A modelação experimental e em modelo físico visa aprofundar o conhecimento dos fenómenos, a calibração do modelo IHFOAM e a melhoria do NRE em técnicas de aquisição de dados. Esta componente irá aprofundar e alargar o âmbito de aplicação da investigação já realizada no LNEC, utilizando modelos físicos e instalações existentes, atualizando a instrumentação disponível e calibrando os modelos numéricos.

Analisando a investigação mundial realizada até à data e as necessidades de engenharia sobre a temática, existem alguns tópicos inovadores que devem ser aprofundados futuramente, em particular a caracterização da turbulência e do escoamento bifásico.

No que concerne ao escoamento bifásico (ar-água), existem, no domínio das estruturas hidráulicas, vários estudos aplicados a descarregadores que identificam o ponto do canal em que se inicia a entrada de ar no escoamento. De facto, quando a camada limite turbulenta que se desenvolve no fundo do canal atinge a superfície inicia-se o emulsionamento. No caso de descarregadores em canal, a presença de ar emulsionado é particularmente relevante devido ao empolamento da veia líquida, donde resulta um aumento da velocidade de escoamento e da altura de água. Com efeito, o transporte e arrastamento de bolhas de ar deve ser considerado nos descarregadores em canal (lisos ou em degraus, por exemplo) não só devido ao empolamento, mas também porque causa redução da tensão de arrastamento, interação com o campo de turbulência e com a energia cinética turbulenta em ressaltos hidráulicos (Chanson 2013). Bombardelli (2012) sugere que devem ser desenvolvidos modelos completos de duas fases para simular o escoamento em descarregadores em canal devido às elevadas concentrações de ar presentes (> 10-20%).

Muitos modelos, nomeadamente os modelos IHFoam ou o FLOW-3D, têm subrotinas que de forma paramétrica determinam quando incorporar o ar no escoamento, mas o seu arrastamento não se afigura ser corretamente simulado ao longo da totalidade do escoamento; desta forma são estimadas concentrações de ar menos elevadas do que as observadas (Meireles 2011; Bombardelli 2012). Também mais recentemente, estes últimos autores verificaram que o modelo FLOW-3D é capaz de prever corretamente o arrastamento de ar num jato livre, mas os perfis de concentração de ar estimados são bastante diferentes dos medidos experimentalmente. Assim, uma melhoria dos modelos tanto teóricos como numéricos beneficiaria largamente o dimensionamento de estruturas hidráulicas, em especial quando combinada com modelos detalhados de turbulência como os LES (Large Eddy Simulations, da terminologia anglo-saxónica) e com modelos mais robustos para os escoamentos bifásicos (Bombardelli 2003).

Assim, o presente Programa de Investigação visa a melhoria do modelo IHFoam nos seguintes aspetos:

- desenvolver uma metodologia global para modelação numérica de escoamentos em descarregadores em canal, incidindo sobre os aspetos da otimização da convergência das malhas, modelos de turbulência, métodos numéricos e validação da simulação;
- realizar uma análise sensível dos vários modelos de turbulência e simular o escoamento usando uma abordagem LES para permitir *insights* na estrutura do escoamento;
- propor um novo modelo conceptual para considerar o arrastamento de ar-água através da superfície livre e seus efeitos no escoamento para ser incorporado nos modelos numéricos;
- analisar cuidadosamente as várias técnicas VOF de captura de superfície livre disponíveis no modelo e avaliar qual delas permite conciliar estabilidade numérica, conforme a ordem de precisão dos esquemas numéricos utilizados e a difusão numérica produzida.

Por outro lado, as medições detalhadas que podem ser realizadas nos modelos físicos de descarregadores do LNEC, usando tecnologia avançada para caracterizar os campos de velocidades, tornam possível o estudo detalhado dos vários fenómenos e a criação de uma base de

dados para calibrar o modelo IHFOAM. Com efeito, os dados experimentais e as medições detalhadas visam:

- caracterizar a turbulência na região não-arejada do escoamento e o escoamento bifásico (ar-água);
- validar o modelo de IHFoam para o estudo CFD de escoamentos em descarregadores em canal, compreendendo a implementação de condições de fronteira para estruturas hidráulicas;
- calibrar e validar o modelo IHFoam para prever com precisão as propriedades do escoamento e a turbulência, comparando-se simulações utilizando as equações de fecho dos modelos de turbulência existentes (RNG, $k-\epsilon$, etc.) com informação precisa obtida experimentalmente;
- comparar os resultados numéricos com dados de modelo físico e de protótipo para validar o modelo numérico e avaliar a precisão dos respetivos resultados.

3.4.3 Erosão em pilares de pontes

Tal como já foi referido, a presença de obstáculos, como pilares e encontros de pontes, induz uma significativa alteração do campo de velocidades, resultando no aumento do transporte de sedimentos e consequentemente fazendo surgir o fenómeno de erosão localizada. Este processo erosivo constitui a principal causa de instabilidade estrutural de pontes e conduz por vezes à sua rotura parcial ou mesmo total. Assim, uma previsão da evolução morfologia do leito reveste-se de grande importância para um projeto seguro e económico de novas pontes, bem como para a manutenção de pontes já existentes.

Este tópico tem sido amplamente investigado por recurso a campanhas experimentais, observações de campo e modelações numéricas, mas, apesar do número notável de estudos científicos no domínio da erosão junto a pilares de pontes, a sua cabal caracterização e previsão ainda não é possível. Assim, apesar dos progressos registados nas últimas décadas, o elevado número de variáveis envolvidas no referido processo e a inerente complexidade das suas interações, faz com que a previsão da profundidade das cavidades de erosão permaneça uma tarefa desafiadora. Com efeito, a relação entre a erosão e os fatores que a influenciam, tais como composição do leito do rio, velocidade do escoamento e não alinhamento do pilar com o escoamento é complexa e potencialmente não-linear (Ebtehaj *et al.*, 2017). Assim, a modelação do escoamento e do transporte de sedimentos junto a este tipo de estruturas continua a ser objeto de estudo.

Um dos primeiros aspetos a aprofundar relaciona-se com as equações empíricas de previsão da erosão correntemente utilizadas em projeto e que muitas vezes são igualmente usadas em modelos numéricos. Note-se que a maioria dos estudos de investigação sobre a erosão junto a estruturas hidráulicas foi sendo conduzido para os estados limite de erosão e que muitas vezes as fórmulas empíricas foram estimadas com base em testes em instalações de pequenas-escala (Melville and Sutherland, 1988; Richardson and Davis, 1995).

Assim, observam-se limitações nestas formulações, nomeadamente no que se refere ao seu domínio de aplicação, já que muito frequentemente são usadas fora do leque de condições para o qual foram desenvolvidas. Por outro lado, atendendo ao alargado espetro de resultados possíveis, a incerteza associada a estas formulações deveria ser estimada pela verificação e comparação dos respetivos resultados com maior número de dados, tanto obtidos experimentalmente como resultantes de levantamentos de batimetrias (dados de campo).

Verifica-se igualmente que as normas e recomendações de projeto existentes, nomeadamente em códigos europeus, são, frequentemente, conservadoras, considerando que o caudal máximo de cheia é o parâmetro que mais influencia a erosão máxima e não considerando a intermitência de fluxo. Para além de considerarem a erosão máxima correspondente ao caudal de ponta, a maioria das formulações adota uma duração da cheia teoricamente infinita (Simarro *et al.*, 2011; Link *et al.*, 2017). Esta hipótese implica considerar que a duração da cheia é pelo menos tão longa quanto o tempo necessário à erosão de equilíbrio. Daí resultam erros significativos na previsão de profundidade de erosão. Gaudio *et al.* (2013) constataram que a sensibilidade das equações de regressão para vários parâmetros de entrada (principalmente devido as incertezas inerentes aos dados hidrológicos) varia ao longo de uma vasta gama.

A natureza empírica e âmbito limitado dessas relações implicam especial precaução na sua aplicação devido à complexidade do fenómeno, nomeadamente durante a estação seca e entre os eventos de cheias. Nestas ocasiões o transporte de sedimentos é responsável para a acumulação de sedimentos nas cavidades de erosão junto aos pilares, fenómeno que geralmente não é levado em consideração. Com efeito, devido à dependência temporal e espacial das características morfológicas dos ambientes fluviais, o transporte de sedimentos requer monitorização contínua. Assim, a fim de obter relações deterministas conclusivas entre o escoamento do fluido e as fronteiras erodíveis, a natureza dinâmica desses fenómenos deve ser devidamente investigada e compreendida.

Por outro lado, tanto a modelação experimental como essencialmente a modelação numérica têm enfrentado até muito recentemente limitações na representação da complexidade do fenómeno da erosão junto a pilares de pontes, continuando a verificar-se a necessidade de desenvolver uma abordagem mais ampla para a previsão da erosão em fases do projeto e o aprofundamento da investigação sobre o escoamento e o processo erosivo resultante (Rodi *et al.*, 2013).

O presente Programa de Investigação propõe o aprofundamento do conhecimento através de uma abordagem híbrida que compreenda: i) modelação física avançada apoiada em instrumentação de ponta para caracterizar o campo de velocidades (e a turbulência) e a erosão junto a cavidades de erosão e ii) metodologias semi-empíricas e ferramentas de modelação numérica da erosão junto a pilares de pontes usando modelos CDF.

Note-se que, apesar de prever a modelação numérica, os estudos centrar-se-ão essencialmente na abordagem experimental que permitirá, em primeiro lugar, o aprofundamento do conhecimento e, em segundo lugar, gerará informação experimental para validação e calibração do modelo numérico.

Com efeito, no LNEC existe desde há longos anos uma linha de investigação em erosão junto a pilares e encontros de pontes e uma instalação de grande envergadura que tem sido utilizada neste programa e que se destina à realização de estudos de escoamentos com superfície livre, tanto com fundo móvel, como com fundo fixo: o Canal de Inclinação Variável (CIV) – vide Figura 3.22 – (Cardoso, 1982).

O CIV tem 37,7 m de comprimento, 1,7 m de altura e 2,0 m de largura; a sua inclinação pode variar entre 0 % e 2,5 % e o caudal pode variar entre 0,1 m³/s e 1 m³/s. O CIV funciona em circuito fechado, podendo recircular misturas de água e sedimentos. O escoamento processa-se por gravidade do tanque de montante para o canal e, pela extremidade de jusante deste, sai para o tanque de descarga. Daí a água é bombeada através de três condutas para o tanque de montante. Na extremidade de jusante existe uma comporta plana vertical que permite regular os níveis de água.



Figura 3.22 | Aspeto geral do Canal de Inclinação Variável

Assim, numa primeira fase, com recurso a uma abordagem experimental, propõe-se o investimento nos métodos de alta resolução espacial, nomeadamente em técnicas não-intrusivas, para a caracterização completa do campo de velocidades e da cavidade de erosão em ambiente experimental controlado (no CIV). Em particular, o presente Programa de Investigação visa, numa primeira fase:

- empreender um programa intensivo e sistemático de ensaios laboratoriais para caracterizar não só a profundidade máxima como toda a geometria da cavidade de erosão, bem como o campo de velocidades na envolvente de pilares, aumentando o conhecimento do mecanismo de formação da erosão e os processos de erosão hidrodinâmicos inerentes;
- realizar *insights* detalhados sobre o transporte sedimentar na vizinhança de pilares de pontes e caracterizar a turbulência e a erosão em ambiente controlado (experimental) com recurso a métodos de alta resolução espacial usando técnicas experimentais não-intrusivas para a caracterização completa do campo de velocidades e da cavidade de erosão;
- caracterizar o escoamento bifásico (água-sedimento) junto a pilares de pontes, contribuindo para a construção de uma base de dados com medições detalhadas de velocidades/erosões para a calibração/comparação de modelos numéricos.

Numa segunda fase, o presente Programa de Investigação propõe uma abordagem numérica por recurso a um modelo CFD comercial recentemente adquirido pelo NRE, o modelo FLOW-3D, na

modelação do complexo escoamento bifásico (água-sedimento) associado à evolução da erosão. Os dados experimentais que resultam dos ensaios laboratoriais (e também dados de campo, ou seja, levantamento batimétricos de casos de estudo de pontes portuguesas), serão usados para validação dos módulos de simulação água-sedimento e previsão das propriedades do escoamento e dos processos erosivos junto a obras hidráulicas.

3.4.4 Técnicas de medição de grandezas hidráulicas

O estudo do comportamento de estruturas hidráulicas compreende o conhecimento dos níveis ou das alturas de água (e da emulsão de ar), das velocidades (e do caudal) e das variações de pressão ao longo das mesmas. De uma forma usual, a identificação destas grandezas é feita através de instrumentos que são em regra inseridos no escoamento.

Com efeito, a pesquisa da bibliografia da especialidade permitiu verificar que os níveis de água são tradicionalmente medidos utilizando sensores de pressão imersos, existindo ainda soluções não imersas, nomeadamente por ultrassons e radar. No entanto, e apesar da medição dos níveis ser teoricamente simples, note-se que a agitação da superfície líquida, a presença de emulsão de ar e a irregularidade da geometria do canal podem colocar fatores de incerteza adicionais na determinação da secção do escoamento que é a informação efetivamente pretendida.

Para os caudais, quando os ensaios são em regime permanente, é usual o uso de debitómetros em sistemas em pressão, tal como acontece com o sistema de alimentação de caudais do NRE; para os escoamentos em escoamentos com superfície livre em regime variável, a medição do caudal é mais complexa podendo envolver sistemas automatizados ou obrigando à multisensorização do nível e ao registo das velocidades e à elaboração de algoritmos específicos para o cálculo do caudal.

Os sensores de pressão convencionais são usualmente instalados na superfície das fronteiras sólidas do escoamento e as perturbações que provocam podem normalmente ser menosprezadas. Pelo contrário, os medidores de velocidades normalmente utilizados são do tipo invasivo e muitas vezes têm dimensões consideráveis, gerando perturbações mais significativas. Neste caso, os sensores não invasivos permitem uma maior precisão de medição e podem ser utilizados para aferir outros instrumentos, avaliando a sua interferência nos processos de medição.

O NRE realiza ensaios laboratoriais e de campo muito diversificados que exigem instrumentação e equipamento. Neste núcleo utilizam-se usualmente os seguintes equipamentos de medida:

- caudais: medidores eletromagnéticos - erro de medida global inferior a 0,5%;
- níveis de água: limnímetros de ponta direita com nónio - erro de medida inferior a 0,2 mm;
- pressões médias ao longo da fronteira do escoamento: piezómetros ligados a um manómetro multitubular - erro de medida inferior a 1,0 mm de coluna de água;
- velocidades: molinetes - erro de medida inferior a 5%;
- agitação do escoamento: sondas de condutância fabricadas pelo LNEC, com um erro de leitura inferior a ± 1 mm.

Nos ensaios que envolvem fundo móvel são, igualmente, utilizados no NRE levantadores de fundo e amostradores de material aluvionar.

No entanto, e tal como já foi referido, nos anos mais recentes têm sido gradualmente realizados no NRE investimentos no estudo e teste de novos sistemas de aquisição de grandezas em instalações hidráulicas e de *software* de processamento de dados que permitem, em particular, dar a conhecer o campo de velocidades e das pressões por instrumentação “não invasiva”, melhorando, em simultâneo, o conhecimento de novas técnicas de medição em modelação física.

Assim, e frequentemente na sequência de investigação realizada no âmbito de instalações experimentais de apoio a teses de doutoramento, tem-se estendido, aos modelos físicos, o uso de transdutores de pressão para medição de pressões e de alturas de água, bem como o uso de caudalímetros para medição de caudais, caminhando-se, para o mesmo efeito, para a multisensorização dos níveis e das velocidades.

Em particular, têm sido testados, com sucesso, sensores, nomeadamente para determinar o campo de velocidades do escoamento e, a partir daí, estudar a turbulência do escoamento e determinar parâmetros característicos deste. Constituem exemplo destes sensores os velocímetros da categoria dos ADV, nomeadamente utilizando sondas UVP (sondas ultrassónicas de velocidade) e vectrinos. O notável desenvolvimento da instrumentação permitiu, igualmente, a medição da turbulência em escoamentos não-arejados, nomeadamente utilizando equipamentos de ADV ou PIV, e a medição da concentração e velocidade do ar em escoamentos arejados, recorrendo a tubos de Pitot com funcionamento em contrapressão.

Apesar do LNEC, através do CIC, possuir uma linha de ação vocacionada para o desenvolvimento de instrumentos de medição considerados de interesse para aplicações específicas no âmbito da engenharia civil, de uma forma geral os instrumentos e as técnicas de medição atualmente usados são desenvolvidos por organismos externos.

Assim, no que diz respeito à medição de grandezas hidráulicas por tecnologia avançada, pretende-se adquirir externamente alguns sensores e realizar um conjunto exaustivo de ensaios que os permita testar de forma a avaliar experimentalmente o seu desempenho.

Os estudos concentrar-se-ão em sistemas de medição da pressão, da concentração de ar e da erosão²⁴. Desta forma, há essencialmente três linhas de ação que se afiguram necessitar de tratamento mais pormenorizado:

- o estudo de equipamento para calibração e ensaio de transdutores de pressão em regime dinâmico;

²⁴ A medição da velocidade e do caudal por métodos avançados, nomeadamente através da multissensorização da medição da velocidade e da altura de água, é igualmente considerada no presente Programa de Investigação, inserida na modelação experimental da rotura de aterros.

- o estudo e avaliação do desempenho de instrumentação para a medição da concentração de ar em estruturas hidráulicas;
- a comparação e determinação de incertezas nas medições da erosão em obras hidráulicas.

O primeiro aspeto será tratado em 4.3.2 e 4.4.2.

No que diz respeito ao segundo aspeto, não há muita experiência no LNEC na medição de concentrações de ar, usando-se há mais de duas décadas a mesma sonda: um tubo de Pitot modificado (Matos et al., 2002). Desta forma, havendo no mercado outras soluções, nomeadamente sondas resistivas em que a medição é baseada na diferença de condutividade elétrica entre o ar e a água e sondas de fibra ótica (tendo sido estas últimas utilizadas na indústria química e nuclear), propõe-se que seja avaliado o desempenho destas sondas alternativas como instrumentos de medição para investigação aplicada em laboratório, envolvendo o desenvolvimento de um plano de calibração com quantificação dos erros e incertezas de medição.

No que diz respeito ao terceiro aspeto, a aplicação de técnicas baseadas em imagem constitui uma forma adequada para construir o modelo tridimensional da erosão, nomeadamente cavidades de erosão junto a pilares de pontes com alta resolução espacial. Existem diversos exemplos de esforços que têm envolvido a aplicação da fotogrametria em ensaios de erosão sob condições bem controladas; Pflieger *et al.*, 2014 e Ramos, *et al.*, 2016 são alguns dos estudos onde esta técnica foi aplicada com êxito na reconstituição de cavidades de erosão junto a pilares de pontes, estando a precisão da tecnologia documentada.

Uma outra alternativa atraente para realizar levantamento de MDT é o sensor de Kinect (Lachat *et al.*, 2015; Amaral, 2017). Em termos de medição da erosão, o uso deste sensor é relativamente recente na investigação hidráulica, não existindo estudos comparativos com outras técnicas de medição mais conhecidas, como por exemplo a fotogrametria, sendo a estimativa das diferenças escassa. Assim, sendo importante conhecer a precisão desta tecnologia, propõe-se que seja avaliado o desempenho do sensor Kinect como instrumento de medição para investigação aplicada em laboratório, envolvendo o desenvolvimento de um plano de calibração com quantificação dos erros e incertezas de medição. Tal desiderato pode resultar da comparação dos resultados das duas técnicas de medição baseadas no processamento de imagem - Kinect sensor e fotogrametria – obtidos experimentalmente aquando da caracterização da geometria da cavidade de erosão junto a pilares fundados em leito móvel.

4 | GESTÃO DO RISCO EM BARRAGENS

4.1 Considerações iniciais

De entre as diversas interpretações alargadas do conceito de risco, o presente trabalho adotou o seu aspeto mais simples patente nas ciências da natureza e que associa o risco “à eventualidade de perdas”. Assim, de uma forma prática, considera-se o risco como a relação, com a forma de produto, entre as consequências nefastas que resultam de um evento adverso e a sua probabilidade de ocorrência ($\text{Risco} = P(\text{rotura}) \times \text{consequências}$).

Como é impossível garantir uma situação de risco nulo em qualquer sector de atividade da vida de uma sociedade, são empreendidos esforços para a sua gestão. De acordo com a bibliografia da especialidade, a gestão do risco compreende as fases da avaliação e da mitigação do risco. A avaliação do risco é realizada em duas etapas: a primeira é a *análise do risco* e a segunda é a *apreciação do mesmo* (Figura 4.1).



Figura 4.1 | Gestão do risco nos vales a jusante de barragens (Viseu, 2016)

Cantwell and Murley (1988) estipulam que a análise do risco associado à barragem se baseia, em primeiro lugar, na caracterização exaustiva dos potenciais acidentes ou incidentes que podem estar

na origem de deteriorações em barragens (ou seja, na *identificação do risco*) e pode, posteriormente, envolver a avaliação da probabilidade de ocorrência das deteriorações na barragem (ou seja, uma abordagem *de quantificação do risco*). Conclui-se, assim, que a análise do risco pode socorrer-se de técnicas de análise de risco qualitativas ou quantitativas.

A *identificação do risco* associado à barragem é, assim, a primeira etapa da análise deste risco, sendo um processo qualitativo e tão sistemático quanto possível, que consiste na caracterização dos eventos e das condições que podem estar na origem da rotura de uma barragem; esta fase é regida pela tentativa de resposta à pergunta: “*o que pode originar uma rotura?*”.

Por outro lado, relacionada com a *quantificação do risco* associado à barragem, afigura-se pertinente a determinação da probabilidade de ocorrência dos diversos eventos que provoquem a sua deterioração limite; esta fase é regida pela tentativa de resposta à pergunta: “*quão prováveis são os modos de rotura?*”.

A análise do risco no vale a jusante pode, por sua vez, ser completamente independente da análise do risco associado à barragem e visa a determinação das consequências da rotura de uma barragem; esta fase é regida pela tentativa de resposta à pergunta: “*o que poderia acontecer, caso ocorresse a rotura* (avaliação de danos e consequências)?”. Esta fase incorpora a modelação de processos de rotura por cenários de acidente em barragens e envolve o uso e aperfeiçoamento de modelos de simulação.

Finalmente, o processo de avaliação do risco termina com a *apreciação* do mesmo. Esta fase consiste na comparação do valor do risco efetivo, estimado na análise de risco, com critérios de aceitabilidade e de tolerabilidade. O risco aceitável refere o nível de risco que a sociedade considera não ser necessário reduzir.

Por outro lado, o processo de gestão de risco termina com os investimentos que se traduzam na sua *mitigação*. A *mitigação do risco* define-se como uma ação combinada que consiste basicamente na implementação de procedimentos *de prevenção* (para reduzir a probabilidade de ocorrência de um acidente) e de procedimentos *de preparação* (para, em caso de acidente, reduzir o número de perdas de vidas e o volume de danos no vale a jusante).

Assim, pode-se mitigar o risco investindo na prevenção através da implementação de medidas estruturais e não estruturais que reduzem a probabilidade de ocorrência de um acidente, uma vez que interferem com os fenómenos de deterioração das barragens. Constituem exemplos de medidas estruturais: a manutenção da barragem, o seu reforço estrutural (ou reabilitação) ou o aumento da capacidade de vazão do descarregador. Constituem exemplos de medidas não estruturais as que permitem a deteção, em tempo útil, de eventos perigosos ou de anomalias no comportamento da barragem (Sistema de Observação) e que podem socorrer-se de ferramentas de controlo de segurança, nomeadamente a observação de grandezas *in situ*. No contexto da gestão do risco em barragens, a prevenção é, assim, realizada pelo controlo da segurança.

Pode-se igualmente mitigar o risco investindo na preparação, essencialmente através da implementação de medidas não estruturais. Estas medidas são as que mitigam ou reduzem os

danos produzidos pela cheia induzida, sendo tradicionalmente classificadas em dois grandes grupos de ação (Viseu, 2006):

- as medidas que controlam a progressiva ocupação do edificado nas zonas de risco em áreas inundáveis, ou seja, que reduzem a comprovada tendência para a ocupação das planícies de cheia por parte das edificações fixas; constituem exemplos deste primeiro tipo de medidas não-estruturais, os seguintes aspectos: a preparação de mapas de zonamento de risco, o planeamento e ordenamento do uso do território no vale a jusante, a prática de uma política de ocupação dos solos consistente com os níveis de risco e apoiada por um sistema legislativo que imponha regulamentação eficaz de não construção nas zonas de maior risco e a implementação de regras objetivas de definição de prémios de seguro que penalizem a localização de edificações nessas mesmas áreas de risco;
- as medidas que permitem a comunicação das ocorrências excecionais e das circunstâncias anómalas aos agentes envolvidos no planeamento de emergência e ainda as ações de preparação de respostas adequadas à situação; constituem exemplos deste segundo tipo de medidas não-estruturais os sistemas de aviso e alerta bem e os planos de emergência.

A opção por medidas do tipo não-estruturais dá-se por duas ordens de razão. Primeiro, devido à impossibilidade de eliminar completamente (mediante medidas estruturais) o risco de rotura ou o de funcionamento inadequado. Segundo, devido ao facto destas medidas poderem constituir (em alternativa às medidas estruturais) uma opção mais atrativa, em termos económicos, para a redução do risco.

No presente Programa de Investigação, a gestão do risco em barragens será abordada nas vertentes seguintes:

- a avaliação do risco pela modelação da **rotura de aterros** (barragens e diques);
- a mitigação do risco em barragens pelo uso de **medidas estruturais de reforço**, onde se registam avanços importantes no uso de novas soluções, tais como descarregadores não convencionais, nomeadamente os descarregadores em degraus, e novas soleiras descarregadoras, como por exemplo as soleiras PKW;
- a mitigação do risco em barragens pelo uso de **medidas não estruturais**, onde os esforços de investigação se centram:
 - i) no controlo de risco na barragem, onde se enquadram a medição de grandezas hidráulicas *in situ* (no protótipo) e;
 - ii) no planeamento de emergência em barragens através do Plano de Emergência Interno (PEI), ferramenta que tem em vista uma rápida e adequada intervenção da equipa operacional da barragem e pode envolver os agentes de proteção civil e a população potencialmente afetada no caso da ocorrência de uma rotura.

Note-se que de acordo com a *International Commission on Large Dams* (ICOLD), as barragens são discriminadas em três tipos, sendo possível distinguir:

- barragens de aterro (de terra - TE e de enrocamento - ER);

- barragens de betão (gravidade - PG, de contrafortes - CB, em arco - VA ou multi-arco - MV);
- barragens de alvenaria (gravidade - PG(M), de contrafortes - CB(M) e multi-arco - MV(M)).

O presente trabalho incide apenas sobre as barragens de aterro, mas abrange igualmente outros aterros, em particular, os diques longitudinais ao longo das margens de rios.

4.2 Estado da arte na modelação da rotura de barragens e diques e principais projetos neste domínio

4.2.1 Considerações iniciais

Acidentes configurando a rotura de barragens ou de diques são caracterizados por elevados custos financeiros, ambientais e sociais e, em casos extremos, põem em risco vidas humanas. Em particular, afigura-se necessário, no caso das barragens e diques, desenvolver ferramentas de simulação que permitam definir as áreas vulneráveis a jusante com base nas quais é possível implementar medidas de ordenamento do território e planos de emergência. A maior fonte de incerteza associada aos modelos de simulação é a evolução da brecha e, conseqüentemente, a forma e o pico do hidrograma da cheia efluente da barragem ou dique em rotura. Uma maior compreensão dos fenómenos hidrodinâmicos e geotécnicos da evolução temporal da brecha de rotura está, assim, na base da avaliação e da mitigação do risco associado a cheias provocadas pela rotura de barragens e diques.

Note-se que a necessidade do aprofundamento do conhecimento nesta área relaciona-se com o elevado número de barragens de aterro existentes (que totalizam aproximadamente 3/4 do número das grandes barragens a nível mundial) e com a percentagem significativa das roturas derivadas de processos erosivos de aterros, nomeadamente devido ao galgamento ou a *piping* (Figura 4.2).



Figura 4.2 | Rotura de aterros: a) galgamento; b) *piping*

Como exemplo de recentes roturas por galgamento citam-se, no Brasil, as Barragem de Algodões (2009) e de Mariana (2015) e, nos EUA, a barragem de Oroville²⁵. No que diz respeito a galgamento

²⁵ Na realidade esta barragem, o maior aterro atualmente existente nos EUA (235 m de altura), não rompeu. A perda das lajes de fundo do descarregador principal (em canal, na margem direita) por erosão da fundação e a extensa erosão da

em diques, é de salientar a rotura do sistema de diques de proteção contra inundações de Nova Orleães durante e após o furacão Katrina, em 29 de agosto de 2005. Este evento resultou no colapso mais oneroso da história de uma obra de engenharia, com estimativas de danos da ordem de US\$100 a US\$ 200 biliões, na área de Nova Orleães, e o número oficial de mortes ultrapassando 1300 (Seed *et al.*, 2006). Em Portugal, deu-se, em 2006, a rotura da barragem de rejeitados da Mina da Fonte Santa (Franca *et al.*, 2007) e dos diques do rio Mondego, em 2001 e 2016, não resultando destas roturas perda de vidas humanas.

4.2.2 Modelação experimental da rotura de aterros

A rotura por galgamento e *piping* de barragens de aterro tem sido objeto de inúmeros estudos ao longo das últimas décadas, existindo diversos autores que apresentam estados de arte detalhados, tanto no que se refere a abordagens experimentais, como analíticas ou numéricas (Singh, 1996; Orendorff, 2009; Schmocker, 2011; Al-Riffai, 2014). Uma das análises recentes mais extensivas do estado da arte nesta temática consta de Amaral (2017).

No que se refere à abordagem física e experimental, os primeiros estudos experimentais surgiram na década de 1960, nomeadamente na Universidade de Washington (Tinney and Hsu, 1962) e da Universidade de Windsor (Chee, 1978), estes últimos tendo conduzindo ensaios em modelos com dimensões significativas (1,5 m de altura).

Na década de 1980, foram conduzidos estudos de investigação com carácter pioneiro: os estudos do Bureau of Reclamation dos Estados Unidos (USBR) e da Universidade de Delft. Os primeiros estudos consideraram aterros de pequena dimensão e analisaram de forma sistemática a influência de diversos parâmetros, incluindo a geometria dos taludes, a gradação do solo, a dimensão do canal piloto e a sua localização (Pugh, 1985; Dodge, 1988). Os segundos estudos visaram a validação de um modelo numérico, tendo sido realizados em 3 fases: nas duas primeiras fases foram adotados aterros de grande dimensão (0,6 m e 0,7 m, respetivamente) e deu-se enfoque aos parâmetros geotécnicos, nomeadamente a dimensão do sedimento, a porosidade e o grau de compactação; os estudos da terceira fase consideraram aterros de menores dimensões, tendo sido estudada a erosão de diques com uma fundação erodível (Steetzel and Visser, 1992; Visser 1995 and Visser 1998).

Constituem ainda uma referência, os testes conduzidos por Coleman *et al.* (2002) com aterros homogêneos de material não-coesivo em instalações de pequena dimensão (0,065 m de altura) que foram pioneiros no procedimento de interromper os ensaios durante o processo erosivo para realizar medições da superfície de erosão. Os resultados incluem informações sobre o processo de erosão, a geometria de brecha e os caudais efluentes.

margem direita onde ocorreram descargas do descarregador de emergência obrigaram as autoridades norte-americanas a determinar a evacuação de um número de pessoas da ordem dos 200 000 por causa do risco de rotura da barragem (https://brasil.elpais.com/brasil/2017/02/13/internacional/1486970163_671581.html).

Entre 2001 e 2004, o projeto de investigação Europeu “*Impact - Investigation of extreme flood processes and uncertainty*” gerou informação experimental importante, tanto dados de campo como de laboratório. Em particular, e para validação da modelação numérica efetuada, foram provocadas cinco roturas por galgamento em pequenas barragens existentes e o processo de erosão foi monitorizado *in situ*, tendo adicionalmente sido realizada a modelação destas roturas em laboratório. Os destaques do projeto foram resumidos numa edição especial do *Journal of Hydraulic Research* (García and Zech, 2007).

Já nos anos 2000, são de referir os estudos conduzidos na Universidade de Karlsruhe por Pickert *et al.* (2004) que investigaram a influência de parâmetros geotécnicos no processo de erosão de aterros com base em três modelos de material não-coesivo (de 0,3 m de altura), usando materiais relativamente grosseiros (diâmetro médios de 2,00 mm, 0,22 mm e 0,035 mm, respetivamente). Nos anos posteriores, são de citar os testes experimentais de Dupont *et al.* (2007) e o extenso programa experimental que foi realizado no Laboratório de Hidráulica, Hidrologia e Glaciologia do Instituto Federal Suíço de Tecnologia, com diques homogéneos e não coesivos.

O estudo de Schmocker and Hager (2009) revisita o galgamento de aterros e a conseqüente erosão e investiga os efeitos de escala no processo de formação da brecha em laboratório devido às limitações relacionadas com a dimensão do sedimento. Outros autores conduziram numerosos testes de rotura de aterros, investigando o efeito no processo erosivo da geometria do aterro, da coesão e do diâmetro do sedimento e discutiram os erros associados ao processo de extrapolação de resultados laboratoriais da rotura de diques para o protótipo (Schmocker *et al.*, 2010; Schmocker, 2011).

Al-Riffai (2014), com base na realização de 31 testes de rotura de aterros, verificou a redução (em 16%) do caudal máximo do hidrograma efluente da brecha de rotura para uma maior energia de compactação dos aterros. Também Wallner (2014) e Amaral (2017) analisaram a influência no hidrograma efluente de diversos parâmetros, tanto hidráulicos (dimensão do reservatório de alimentação, por exemplo) como geotécnicos (energia de compactação, por exemplo), contribuindo significativamente para a compreensão do processo hidrodinâmico da formação da brecha em aterros homogéneos. Van Emelen *et al.* (2015) aplicaram diversas formulações de transporte de sedimentos para a modelação da erosão de diques e compararam os resultados com os dos testes realizados por Schmocker and Hager (2009), Spinewine *et al.* (2004) e Ferbus and Spitaels (2013).

Nos anos mais recentes assistiu-se à publicação de um número crescente de trabalhos envolvendo a caracterização da hidrodinâmica do escoamento na rotura de aterros através de experimentação em laboratório, tirando partido dos avanços das tecnologias de medição, visualização e registo do escoamento (ADV, PIV, câmaras de alta velocidade, etc.), bem como de técnicas para levantamento de fundos móveis e traçado de perfis de erosão, como os sistemas óticos e a fotogrametria (Pickert *et al.*, 2011; Winz, 2012; Müller, 2015; Zhao *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2015; Orendorff *et al.*, 2013; Amaral, 2017).

Em Portugal, a publicação do Regulamento de Segurança de Barragens (RSB), em 1990, introduziu a temática da proteção civil e obrigações com ela relacionadas exigentes à época (Decreto-lei n.º

11/90), impulsionando a investigação no domínio da gestão do risco associado às barragens no nosso país. Assim, existe no nosso país uma forte linha de investigação em rotura de barragens, desde a década de 1990, tendo sido realizados numerosos estudos de investigação teórica, laboratorial e numérica da rotura de barragens em leito fixo e móvel (Franco, 1996; Ferreira and Leal, 1998; Franco, 1999; Almeida *et al.*, 2003; Viseu (2006); Ferreira *et al.* (2006); Leal *et al.* (2002, 2006 e 2009); Viseu and Almeida (2007, 2009, 2011 e 2014); Bento *et al.*, 2017; Amaral, 2017).

Em particular, entre 1994-2003 decorreu uma ação estruturada e orientada para a gestão do risco nos vales com barragens que foi consubstanciada na execução do projeto de investigação e desenvolvimento NATO PO-FLOODRISK (“*Dam Break Flood Risk Management in Portugal*”), o qual envolveu o IST, o LNEC, o Instituto da Água (atual Agência Portuguesa do Ambiente - APA), a Eletricidade de Portugal (EDP) e a Autoridade Nacional de Proteção Civil (ANPC) (Almeida *et al.*, 2003). O projeto envolveu uma numerosa equipa pluridisciplinar e desenvolveu alguns conceitos e estudos originais. Salienta-se, entre outras, a intervenção no domínio da perceção social que levou a que fossem realizados os primeiros trabalhos de campo em Portugal relativos às perceção do risco de barragens (Almeida and Viseu, 1998; Almeida *et al.*, 2003), as bases de dados de segurança de barragens, os estudos de zonamento do solo e de vulnerabilidade, as ações de divulgação e de cooperação a nível nacional e internacional e as realizações associados à metodologia e desenvolvimento de protótipos de planos de emergência, incluindo a realização de estudos de demonstração no vale do rio Arade (barragens do Arade e do Funcho). Em 2006 é publicada uma tese de doutoramento que enquadra muitos destes aspetos (Viseu, 2006).

4.2.3 Modelação numérica da rotura de aterros

A modelação numérica é, como se viu, uma das técnicas mais utilizadas no processo de análise do risco no vale a jusante, existindo desde há largas décadas diversos tipos de modelos de simulação da cheia induzida. Na prática, esta simulação obriga à modelação de dois processos distintos: o processo de formação da cheia induzida, que se relaciona com a evolução temporal da brecha que se forma no corpo da barragem e correspondente hidrograma efluente, e o processo de propagação da cheia induzida ao longo do vale a jusante.

As barragens de aterro apresentam um modo de rotura gradual no qual as dimensões da brecha crescem com o tempo. Ao contrário da modelação do processo de propagação das cheias induzidas, onde se verifica haver muita experiência adquirida no desenvolvimento e aplicação de modelos, a formação da brecha continua a ser uma das principais fontes de incerteza na previsão das características da cheia decorrente da rotura gradual de uma barragem de aterro. Os modelos existentes para efetuar a simulação do processo de formação da cheia induzida pela rotura de barragens de aterro podem ser agrupados em três categorias (Wahl, 1998): i) modelos baseados em equações empíricas de previsão; ii) modelos paramétricos; iii) modelos baseados em métodos físicos.

Os modelos baseados em equações empíricas de previsão utilizam expressões que relacionam o caudal máximo efluente da brecha com as características da barragem ou da albufeira (geralmente

altura, volume armazenado ou uma variável que compreenda estas duas características). Estas expressões são desenvolvidas tendo por base casos de estudo, essencialmente derivados das roturas históricas. Faz-se notar que, de uma forma geral, estas relações de regressão podem apresentar coeficientes de correlação baixos devido a incertezas quanto à evolução da brecha e à escassez de informação de base.

Nos modelos paramétricos o modelador define a geometria da brecha (a largura e a forma final) e o tempo de rotura, fazendo uso do tratamento estatístico da informação que é obtida das roturas históricas (protótipos) ou de resultados experimentais (modelos físicos). Estes modelos simulam a evolução da brecha em função do tempo e calculam o hidrograma resultante segundo princípios da hidráulica.

Os modelos baseados em métodos físicos simulam a evolução da brecha e calculam o hidrograma resultante da rotura de barragens de aterro usando modelos de erosão baseados na realidade física do fenómeno, ou seja, em princípios de hidráulica, hidrodinâmica e transporte sólido, bem como mecânica dos solos, erosão, mecanismos de colapso de massas de solo e outros processos geotécnicos. Estes processos físicos são descritos na forma de relações matemáticas e acoplados às equações que traduzem o escoamento.

Os modelos numéricos baseados em modelos físicos da rotura de aterros consideram essencialmente dois tipos de mecanismos de rotura: i) a rotura contínua por erosão regressiva do paramento de jusante, mais típico dos aterros não-coesivos; ii) a erosão descontínua ravinosa com a formação de degraus ao longo dos taludes (*headcut erosion*), mais característica dos aterros com coesão. Neste último tipo de aterros, para além da rotura ravinosa que provoca a erosão do aterro em profundidade, há ainda modelos que consideram o alargamento da brecha como resultados da instabilização dos seus taludes e queda de massas por perda de material subjacente por infraescavação. Assim, verifica-se que os processos hidráulicos e os mecanismos da brecha resultantes continuam a ser tema de investigação, nomeadamente para desenvolvimento de modelos conceptuais a integrar em modelos gerais do processo de formação da brecha.

Com efeito, embora a comunidade técnico-científica tenha investido significativamente na investigação da modelação numérica da rotura de aterros como resposta ao crescente interesse público em matéria de segurança de barragens, a maioria dos modelos existentes nesta área não são, ainda hoje, de uso corrente mas antes são desenvolvidos (para uso próprio) em universidades e em organizações relacionadas com a segurança de barragens e muitos deles continuam a ser alvo continuamente de melhoramentos. No Quadro 4.1 apresentam-se diversos modelos de simulação do processo de formação da brecha.

Da consulta do quadro anterior, verifica-se que a modelação numérica do processo de formação da cheia induzida tem sido empreendida especialmente desde a década de 1980, sendo, de uma forma geral, usados modelos paramétricos onde, como já foi referido, o caudal efluente é calculado “modelando” a brecha como um descarregador de soleira espessa de dimensões variáveis no tempo. O primeiro modelo a simular a erosão gradual de uma barragem usando princípios de transporte sólido foi, provavelmente, desenvolvido por Cristofano, em 1965 (Cristofano, 1965).

Quadro 4.1 | Síntese dos principais modelos numéricos de formação da brecha baseados em métodos físicos

Modelo, ano e referência	Hidráulica	Transporte de sedimentos
Cristofano, 1965		Fórmula empírica
Harris and Wagner, 1967	Equação de descarregadores	Fórmula de Schoklitsch
Modelo BRDAM (Brown and Rogers, 1981)		Fórmula de Schoklitsch
Lou, 1981	Equações de Saint-Venant 1D	Fórmula de DuBoy Einstein 1-D Exner (sediment continuity)
Ponce and Tsvoglou, 1981		Fórmula de Meyer-Peter e Muller 1-D Exner (sediment continuity)
Modelo BEED (Singh and Scarlatos, 1988)	Equação de descarregadores	Fórmula de Einstein-Brown 1D Exner (“ <i>sediment continuity</i> ”)
Modelo BREACH (Fread, 1988)	Equações de descarregadores e de orifícios	Fórm. Meyer-Peter e Müller modificada por Smart
Modelo EDBREACH (Loukola and Huokuna, 1998)		Fórmula de Meyer-Peter e Müller
Modelo BRES (Visser, 1998; Zhu, 2006)	Equação de descarregadores	Fórm. Meyer-Peter e Müller modificada por Smart
Modelo DEICH-N2 (Broich, 1998)	Equações de Saint-Venant	Fórmula de Einstein-Brown
Modelos RENARD and RUPRO (Paquier <i>et al.</i> 1998)	Equação de orifícios	Fórmula de Meyer-Peter e Müller
Peviani (1999)		Di Silvio and Peviani (1989) 1D Exner (“ <i>sediment continuity</i> ”)
Tingsanchali and Chinnarasri (2001)	Equações de Saint-Venant 1D	Fórmula de Meyer-Peter and Müller (1948) Smart (1984) Bagnold-Visser (1988) Rickenmann (1991) Takahashi (1991) 1-D Exner (“ <i>sediment continuity</i> ”)
Modelo NCP-BREACH (Coleman <i>et al.</i> , 1998, 2002)		Expressões de erosão empírica baseada em dados experimentais
Modelo HR-BREACH (Mohamed <i>et al.</i> 2002)	Equação de descarregadores	Smart (1984) (com e sem coesão) Bagnold-Visser (1988)
Rozov (2003)		Voinich-Syanojenski (1972) Exner equation (“ <i>sediment continuity</i> ”)
DYBREACH (Viseu, 2004)	Equação de descarregadores	Fórmula de Meyer-Peter and Müller (1948)
Wang and Bowles (2006 a, b, c)	Equações de Saint-Venant 2D	Chang (1992) fórmula empírica para erosão Smart (1984) para capacidade de transporte
Modelo 2dMB (Fäeh, 2007)	Equações de Navier-Stokes 2D	Expressões empíricas para transporte em suspensão e de fundo Meyer-Peter and Müller (1948) Smart and Jaeggi and Schoklitsch (1934) Non-equilibrium transport
Macchione (2008)	Equação de descarregadores	Macchione (1986)
Modelo Mike-11 (Danish Hydraulic Institute, 2009)	Equação de descarregadores e de orifícios	Engelund-Hansen Exner equation (“ <i>sediment continuity</i> ”)
Modelos SIMBA e WinDam B (Temple <i>et al.</i> , 2005 ; Hanson <i>et al.</i> , 2005; Visser <i>et al.</i> , 2013)	Equação de descarregadores	Expressões empíricas para “ <i>headcutting, advancing erosion and breach widening</i> ”
Modelo STAV 2D Canelas <i>et al.</i> , 2013; Conde <i>et al.</i> , 2015 e 2017	Equações de Saint-Venant 2D	Exner equation (“ <i>sediment continuity</i> ”)

A maior parte dos modelos numéricos (como por exemplo os modelos BEED, BRES, etc.) consideram a rotura de barragens (ou diques) de aterro homogéneos e de materiais não coesivos descrevendo o transporte de sedimentos e modelando essencialmente um processo de erosão superficial contínuo (Singh *et al.*, 1988; Visser, 1998; Wang and Bowles, 2006). Zhu (2006) dotou o modelo BRES, que contemplava inicialmente apenas aterros não coesivos, de um algoritmo para modelação do processo erosivo para aterros coesivos.

A particularidade de modelar a rotura de aterros coesivos está igualmente presente no modelo HR-BREACH, que considera não só a erosão superficial como a ravinosa, e no modelo simplificado SIMBA, que se centra essencialmente na modelação da erosão ravinosa em aterros homogéneos com coesão (Temple *et al.*, 2005, Hanson *et al.*, 2005 b). Este último modelo foi o embrião do modelo comercial WinDam B (Visser *et al.*, 2013; Morris *et al.*, 2014) que considera a erosão ravinosa como o principal mecanismo de rotura por galgamento, pressupondo quatro fases: i) erosão ravinosa no talude de jusante, com formação de degraus; ii) avanço da erosão para o coroamento e talude de montante; iii) rebaixamento do coroamento e iv) alargamento da brecha.

De uma forma geral os modelos pressupõem como causa de rotura o galgamento, mas os modelos BREACH, HR-BREACH e RUPRO consideram também a rotura por *piping* (Fread, 1988; Mohamed *et al.*, 2002; Paquier *et al.*, 1998). No caso do galgamento, o modelo BREACH, provavelmente o de maior utilização a nível mundial²⁶, considera a brecha como um descarregador de soleira espessa; no caso de *piping* esta é modelada como um orifício. No modelo RUPRO, o estudo da rotura por galgamento e *piping* de aterros homogéneos é realizado considerando que a evolução da brecha se dá em 3 fases e adota em termos de transporte sólido a fórmula de Meyer-Peter e Muller. Durante o projeto IMPACT (ver ponto seguinte), o modelo Rupro foi intensamente testado com resultados experimentais (nomeadamente de modelos à escala real) e demonstrou uma boa capacidade de reproduzir estes resultados.

Existem ainda alguns modelos que consideram não só a rotura de barragens homogéneas como a de barragens zonadas. De uma forma geral são apenas considerados dois materiais diferentes, tal como no caso dos modelos BREACH e HR-BREACH (Fread, 1988; Morris and Hassan, 2004) e as diferentes camadas de material são distinguidas por diferentes coeficientes de erodibilidade dos solos.

No IST, o modelo de transporte sólido STAV-2D tem vindo a ser aplicado com sucesso à rotura de aterros nos últimos anos (Canelas *et al.*, 2013; Conde *et al.*, 2015 e 2017). O modelo, que é particularmente adequado para a modelação de escoamentos transientes em geometrias complexas, baseia-se nas equações de Saint Venant e considera leito móvel. As alterações morfológicas são modeladas por uma equação de conservação do material do leito, em função do desequilíbrio entre o material afluente e a capacidade de transporte do escoamento.

²⁶ O modelo BREACH é o algoritmo de cálculo do processo de formação da brecha e da vazão efluente usado nos igualmente conhecidos modelos de propagação DAMBRK e SMPDBK.

4.2.4 Principais projetos no LNEC neste domínio

A realização de investigação no domínio da gestão do risco em barragens tem beneficiado de financiamento atribuído tanto por fundações nacionais (FCT, por exemplo) como internacionais (NSF dos EUA, por exemplo) e ainda de organizações como a NATO e a União Europeia. Assim, são de realçar a realização de projetos de investigação por equipas do LNEC, integradas em redes de investigação europeias ou internacionais, orientados para diferentes aspetos, nomeadamente a caracterização e simulação de formação de brechas de rotura, a erosão e transporte sólido, a propagação de cheias e a gestão do risco. A nível nacional, salientam-se os seguintes projetos:

NATO PO-FLOODRISK, "*Dam-break flood risk management in Portugal*", (1994-2002), financiado pelo Programa "*Stability for Peace*" da NATO e liderado pelo LNEC em parceria com o IST e em colaboração com o INAG (atualmente APA), EDP e ANPC. O projeto, que permitiu reunir uma equipa multidisciplinar de especialistas portugueses, estava organizado nos seguintes cinco subprojectos: i) análise hidráulica e simulação computacional; ii) análise da segurança de barragens e albufeiras; iii) perceção pública do risco e gestão da ocupação do solo; iv) sistema automático de suporte à decisão e v) sistema experimental integrado para treino e atuação em situação de emergência. O projeto concretizou três grandes objetivos: i) melhorou significativamente a capacidade técnica da análise de cheias induzidas por acidentes em barragens; ii) desenvolveu metodologias relativas à segurança e gestão de zonas em risco de cheias provocadas por acidentes em barragens; iii) desenvolveu e implementou novas tecnologias e metodologias aplicadas às técnicas de segurança, à gestão do território e à proteção civil (Almeida and Viseu 1998; Almeida *et al.* 2003).

FP4 CADAM, "*Concerted action on Dam-Break Modelling*", (1998-2000). Ação concertada do 4º Programa Quadro da União Europeia, liderada pelo Laboratório de Wallingford (Reino Unido) em colaboração com o IST e instituições e universidades europeias: Espanha (Universidade de Santiago de Compostela), França (EDF), Bélgica (Universidade Católica de Lovaina), Itália (ENEL) e Alemanha (Universidade de Munique). Esta ação concertada da EU financiou reuniões e workshops bianuais e visava promover a partilha de informação entre instituições, bem como a validação e a comparação entre o desempenho de diversos modelos computacionais de simulação de ondas provocadas pela rotura de barragens desenvolvidos em universidades e laboratórios europeus. Foram utilizados nesta comparação resultados obtidos por soluções analíticas, em ensaios em laboratório, e, também, dados de campo que derivam de roturas históricas de barragens, nomeadamente, a bem documentada rotura da barragem de Malpasset. Analisaram-se ainda as necessidades europeias em termos de investigação neste domínio e estudaram-se meios de divulgação dos modelos e de ligação efetiva à indústria (CADAM 1998, 1999 a) e 1999 b)).

FCT, "*Modelação matemática e experimental de ondas de cheias provocadas pela rotura de barragens em canais de leito móvel*", (1999-2001). Projeto liderado pelo Centro de Estudos de Hidrossistemas (CEHIDRO) do IST e em colaboração com a Universidade da Beira Interior (UBI). O projeto visava contribuir para a compreensão dos aspetos mais importantes da propagação de ondas provocadas pela rotura de barragens em canais de leito móvel. Os objetivos específicos do projeto eram os seguintes: i) realização de um estudo experimental de propagação uni e

bidimensional de ondas de cheia provocadas pela rotura de barragens em canais de leito móvel; ii) desenvolvimento de um modelo bidimensional para a propagação de ondas de cheia resultantes da rotura de barragem em canais com leito móvel; iii) calibração dos modelos com dados referentes a ensaios em fundo fixo e iv) análise dos resultados experimentais referentes aos ensaios em fundo móvel, tendo em vista a validação dos modelos numéricos e, se necessário, a respetiva reformulação.

FP5 FLOCODS, “*Decision Support System for ecosystem upgrading and flood control of sustainable development in the Red River System, China, Vietnam*”, (2001-2004) - projeto liderado pela Universidade de Caen (UC) e desenvolvido com o IST e outras instituições asiáticas e europeias nomeadamente: i) o Instituto Nacional Politécnico de Toulouse (INPT) e o Instituto de Investigação para o desenvolvimento (IRD, de França; ii) a Universidade de Twente, da Holanda; iii) o Instituto de Mecânica e o Departamento de Diques e Controlo de Cheias (integrado no Ministério da Agricultura e Desenvolvimento Rural), do Vietname; iv) o Instituto Asiático de Tecnologia, da Tailândia e v) o Instituto de Automação (IOA), pertencente à Academia Chinesa de Ciências, da China. O projeto de investigação visava a caracterização do comportamento do rio Vermelho, junto à cidade de Hanoi, tendo em atenção o aumento da vulnerabilidade das zonas ocupadas nas margens e as AC; a participação do LNEC envolveu a modelação da rotura do sistema de diques junto à cidade de Hanoi (Viseu, 2002 e 2004). O projeto reuniu uma vasta equipa multidisciplinar de investigadores e o seu principal resultado consistiu no desenvolvimento de um Sistema de Apoio à Decisão para a gestão das cheias no rio Vermelho, envolvendo a análise da situação e a definição de medidas de controlo de cheias, nomeadamente fazendo o transvaze de caudais para zonas de retenção, como forma de amortecer os hidrogramas de cheias.

NSF PIRE, “*Modeling Flood Hazards and Morphological Impacts of Levee Breach and Dam Failure*”, (2008/2013). Projeto financiado pela National Science Foundation (NSF), dos EUA e liderado pela Universidade de South Carolina (EUA) em colaboração com o IST e a Universidade Católica de Lovaina (Bélgica). O projeto visava estudar os fenómenos hidrodinâmicos e da mecânica do transporte sólido envolvidos na formação e evolução da brecha e formular modelos conceptuais da evolução temporal da brecha e do caudal escoado, com ênfase no caudal de ponta, aplicáveis a situações genéricas. Em particular, foi empreendida a modelação experimental da rotura por galgamento de barragens de aterro homogéneas, com a finalidade de ultrapassar uma das principais fontes de incerteza na previsão das características da cheia decorrente da rotura gradual de um aterro a qual diz respeito à evolução temporal da brecha que se forma no respetivo corpo.

FCT Dam&DikeCARE, “*Modelação numérica e caracterização experimental da formação de brechas em barragens de aterro e diques*”, (2018/2021). Projeto liderado pelo LNEC e em colaboração com o IST. Os objetivos do projeto são desenvolver um modelo conceptual integrado para a rotura de barragens e diques, incluindo os fenómenos hidrodinâmicos e geotécnicos, e uma nova geração de ferramentas 3D para simulação numérica de misturas fluido-sedimento. Para atingir estes objetivos, o plano de trabalhos articula atividades teóricas, laboratoriais e computacionais. As maiores inovações incluem: i) estudo aprofundado do comportamento

geotécnico conferido por uma escolha criteriosa dos materiais do corpo dos aterros, com solos coesivos e não-coesivos; ii) uso de instrumentação inovadora e técnicas de visualização e medição avançadas, que permitem a caracterização detalhada de varias grandezas (e.g. velocidades junto à brecha, evolução da brecha e erosão do talude); iii) um modelo numérico para prever a evolução temporal de brechas, combinando um módulo geotécnico 3D sem malha e um módulo hidrodinâmico 2D, criando assim um modelo hibrido para simulação da evolução da brecha e do hidrograma de rotura.

4.3 Abordagens de mitigação do risco em barragens

4.3.1 Medidas de controle ou de prevenção estruturais: soleiras PKW

A causa mais comum de acidentes em órgãos hidráulicos de barragens está associada a problemas nos descarregadores como, por exemplo, à sua insuficiente capacidade de vazão. Assim, a investigação mais recente prende-se com os aspetos da reabilitação e a adequação de descarregadores a novas solicitações como, por exemplo, as que derivam do aumento do caudal de dimensionamento devido a novas imposições legislativas ou a alterações climáticas. Neste âmbito, a procura de novas soluções para aumentar a segurança de barragens e reduzir o risco associado às estruturas tem registado avanços importantes, nomeadamente no que se refere a novas soleiras descarregadoras.

Com efeito, no dimensionamento de uma barragem é fundamental garantir a segurança ao longo da sua vida útil. Com as alterações que se fazem notar ao nível climático, nomeadamente no que concerne a fenómenos meteorológicos extremos, pode promover-se a revisão dos caudais de dimensionamento de muitas barragens já existentes para garantir o correto funcionamento do descarregador de cheias. Assim, a comprovar-se uma insuficiente capacidade de vazão, uma possível solução para restituir os níveis de segurança poderá envolver o aumento da capacidade de vazão do descarregador de cheias existente, nomeadamente através da alteração da respetiva soleira para soluções hidraulicamente mais eficazes. Nestes casos, uma solução corrente consiste no uso de soleiras em labirinto, ou, mais recentemente, soleiras em teclado de piano.

A soleira descarregadora em teclado de piano, traduzido do inglês Piano Key Weir (PKW), é um caso particular de uma soleira em labirinto com forma retangular em planta que possui inclinações para ambos os lados da base (Figura 4.3). Esta geometria permite o aumento do desenvolvimento da crista sem a necessidade de aumentar a largura do canal e a base estrutural da soleira descarregadora já existente.

A soleira descarregadora do tipo PKW pode ser utilizada em novas barragens ou em barragens já existentes, tendo a vantagem de poder ser facilmente instalada num espaço limitado, como no topo de uma barragem de gravidade, tornando-se assim uma solução eficiente e económica para o aumento da capacidade de descarga e conseqüentemente para a melhoria da segurança da barragem. Uma soleira do tipo PKW permite igualmente aumentar o armazenamento da albufeira.

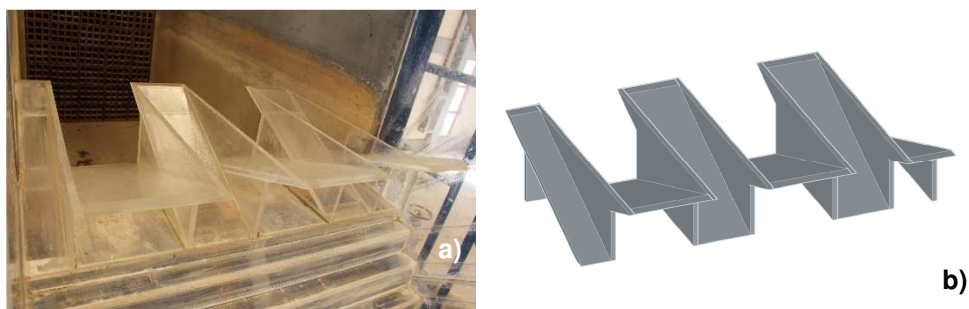


Figura 4.3 | Soleira descarregadora em teclado de piano: a) instalação experimental; b) representação esquemática

O elemento básico de uma soleira descarregadora deste tipo é definido como a unidade PKW que representa a menor extensão de uma estrutura completa, sendo o número de unidades definido por N_u . A soleira é composta por duas paredes laterais (*side wall* identificado na Figura 4.4 por s), uma tecla interior (*inlet key* identificado na Figura 4.4 por i) e duas metades de uma tecla exterior (*outlet key* identificado na Figura 4.4 por o). Os principais parâmetros que definem a geometria de uma soleira PKW são a largura total da soleira e das teclas interior e exterior (W , W_i e W_o), o desenvolvimento total da crista (L), o comprimento da soleira (B) e a altura de cada tecla (P_i e P_o) - Figura 4.4.

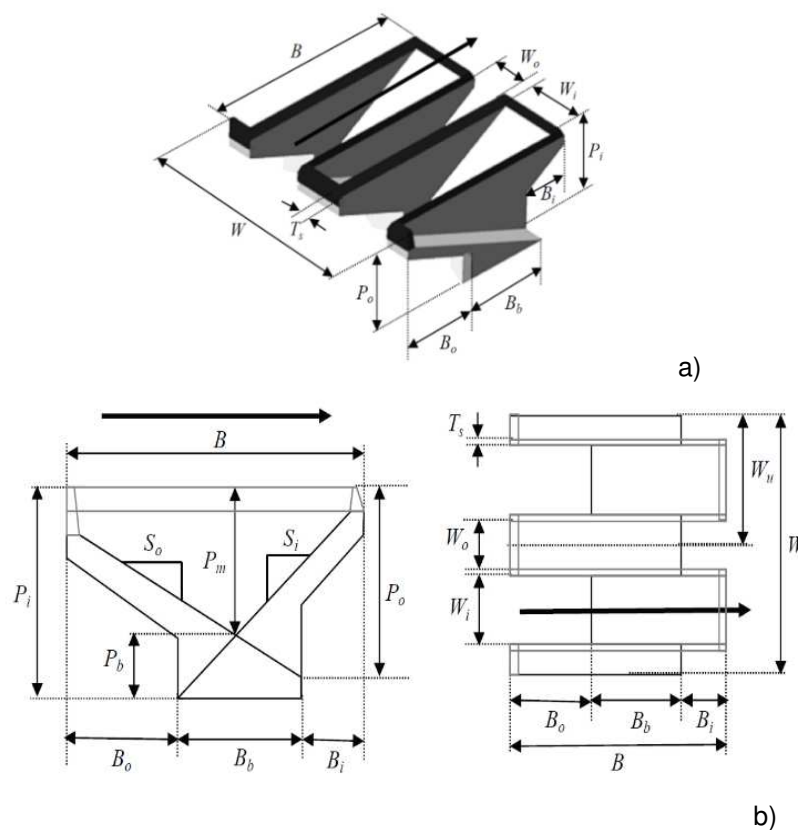


Figura 4.4 | Principais grandezas de uma soleira descarregadora em teclado de piano: a) vista 3D; b) perfil e planta (adaptado de Pralong et al., 2011)

Existem quatro tipos de soleiras descarregadoras do tipo PKW (Figura 4.5): soleiras do tipo A, que apresentam projeções a montante e a jusante; soleiras do tipo B, que apenas apresentam projeções a montante; soleiras do tipo C, que apenas possuem projeções a jusante; e soleiras do tipo D que, apesar de apresentarem o fundo inclinado, não possuem projeções.

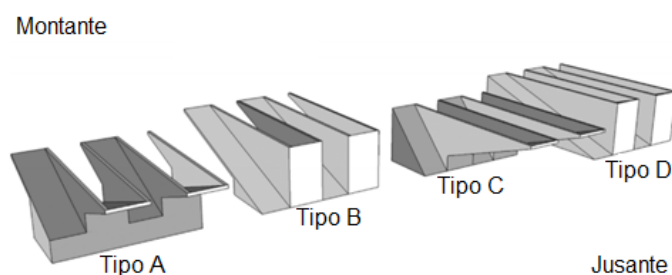


Figura 4.5 | Representação esquemática dos quatro tipos de soleiras descarregadoras em teclado de piano (adaptado de Epicum et al., 2017)

Os primeiros ensaios com soleiras PKW foram desenvolvidos, em 1999, no Laboratório Nacional de Hidráulica da empresa Electricité de France (EDF, França) e, em 2002, na Universidade de Roorke (Índia) e Universidade de Biskra (Argélia). Como resultado destes ensaios preliminares surgiram as primeiras geometrias. Uma das vantagens inicialmente constatada foi a capacidade de aumentar o caudal escoado para a mesma carga em cerca de quatro vezes, quando comparado com uma soleira descarregadora do tipo WES com a mesma largura, e cerca de 10%, quando comparado com uma soleira descarregadora em labirinto (Lempérière and Ouamane, 2003).

A primeira soleira PKW a ser utilizada como solução de reabilitação do descarregador de uma barragem existente foi projetada pelo investigador francês Lempérière, em 2001. Lempérière pretendia encontrar uma nova geometria de soleira que fosse eficiente, mas também de fácil construção, para reforço da capacidade de vazão em barragens cujo descarregador estivesse subdimensionado. Assim, em 2006, foi construída a primeira soleira PKW para a reabilitação da barragem Goulours pela EDF. Desde então, esta empresa tem desenvolvido vários projetos de reabilitação de barragens mediante a aplicação de soleiras descarregadoras do tipo PKW, nomeadamente nas barragens de St-Marc, Gloriettes (Figura 4.6), Etroit e Malarce.



Figura 4.6 | Barragem de Gloriettes (França). Aspecto da soleira PKW

Nos anos seguintes, foram sendo implementados vários projetos para novas barragens considerando soleiras descarregadoras do tipo PKW, nomeadamente na Ásia (Índia e Vietname) e em África (Argélia e Burkina Faso) (Lempérière *et al.*, 2011, Khanh *et al.*, 2011). Atualmente, segundo Ercicum *et al.* (2017), existem mais de 25 soleiras descarregadoras do tipo PKW em funcionamento ou em construção, estando 19 dessas soleiras descritas no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 | Síntese das principais características das soleiras descarregadores em teclado de piano existentes e em projeto (fonte: Gomes, 2017, adaptado de Leite Ribeiro *et al.*, 2013 e Laugier *et al.*, 2017)

País	Projeto	Tipo de PKW	Q_d (m ³ /s)	q ($\frac{Q_d}{W}$) (m ² /s)	$\frac{H_d}{P_i}$	$\frac{L}{W}$	$\frac{P_i}{W_i}$	$\frac{W_i}{W_o}$	S_i	$\frac{P_i}{T_s}$	$\frac{P_{pi}}{P_i}$	Referência
Argélia	Oued Mellegue	-	5240	0,70	0,70	4,80	-	1,00	-	-	0,00	Pfister <i>et al.</i> (2012)
Burkina Faso	Bambakari	-	1000	5,00	0,30	6,00	2,67	0,77	-	-	0,00	Lempérière <i>et al.</i> (2011)
França	Goulours	A	68	5,67	0,31	4,92	1,15	1,80	0,52	15,50	0,00	Laugier <i>et al.</i> (2017)
França	St Marc	A	138	7,67	0,32	4,28	1,35	1,41	0,48	16,80	0,00	Laugier <i>et al.</i> (2017)
França	Etroit	A	82	4,39	0,18	4,17	2,16	1,63	0,59	15,14	0,09	Laugier <i>et al.</i> (2017)
França	Gloriettes	A	90	4,86	0,27	4,69	1,30	1,53	0,46	12,00	0,00	Laugier <i>et al.</i> (2017)
França	Escoul.	-	13	2,71	0,36	4,58	1,38	1,44	0,46	6,00	0,00	Laugier <i>et al.</i> (2017)
França	Malarce	A	570	13,41	0,34	8,24	3,52	0,79	0,64	22,00	0,38	Laugier <i>et al.</i> (2017)
França	Campauleil	-	120	7,25	0,17	6,95	3,45	1,11	0,65	15,29	0,13	Laugier <i>et al.</i> (2017)
França	Charmines	-	300	6,52	0,23	5,22	1,83	1,50	0,47	12,51	0,23	Laugier <i>et al.</i> (2017)
França	Raviège	B	300	11,63	0,30	6,86	1,95	1,45	0,51	18,86	0,21	Laugier <i>et al.</i> (2017)
França	Gage	-	455	17,11	0,29	7,82	3,75	1,23	0,67	24,00	0,13	Laugier <i>et al.</i> (2017)
França	Record	-	1300	26,00	1,47	5,16	1,97	1,00	0,61	10,00	0,00	Laugier <i>et al.</i> (2017)
Índia	Lhasi	-	115	1,0	0,1	6,0	2,17	1,25	-	-	0,0	Lempérière <i>et al.</i> (2011)
Índia	Sawaa Kuddu	-	5240	38	0,6	4,9	1,33	-	-	-	-	Da Singhal e Sharma (2011)
Vietname	Van Pongh	-	8700	28,9	-	5,8	2,09	1,19	-	22	-	Ho Ta Khanh <i>et al.</i> (2011)
Vietname	Dakmi 2	-	500	6,7	-	5,0	-	-	-	-	0,0	Khanh <i>et al.</i> (2011)
Vietname	Ngan Truoi	-	1560	16,3	-	5,0	2,04	1,35	-	16	-	Khanh <i>et al.</i> (2011)
Vietname	Vinh Son 3	-	4000	40,0	-	5,0	-	-	-	-	-	Khanh <i>et al.</i> (2011)

Em que: H_d , carga hidráulica de dimensionamento; L , desenvolvimento total da crista; P_i , altura da tecla interior; P_{pi} , altura do parapeito da soleira descarregadora da tecla interior; q , caudal unitário; Q_d , caudal de dimensionamento; S_i , declive da soleira de fundo da tecla interior; T_s , espessura da parede lateral; W , largura total da soleira do tipo PKW; W_i , largura da tecla interior; W_o , largura da tecla exterior.

As soleiras descarregadoras do tipo PKW são recentes, razão pela qual as leis de vazão existentes constituem estimativas propostas com base em estudos experimentais. As principais grandezas que

influenciam a sua vazão são essencialmente a largura do canal adimensionalizada pela largura total da soleira (L/W), a carga hidráulica adimensionalizada pela altura total da soleira (H/P) e o quociente entre as larguras das teclas interiores e exteriores (W_i/W_o).

Existem duas abordagens para determinar a vazão deste tipo de soleiras: i) estima-se o coeficiente de vazão e utiliza-se este valor diretamente numa equação de vazão conhecida para uma soleira espessa (Kabiri-Samani and Javaheri, 2012; Anderson and Tullis, 2013; Ouamane and Lemperière, 2006); ii) compara-se o valor da vazão da soleira descarregadora do tipo PKW com o valor teórico de vazão de uma soleira espessa (Leite Ribeiro *et al.*, 2012).

Kabiri-Samani and Javaheri (2012) conduziram um programa intensivo de ensaios numa instalação experimental constituída por um canal com 12 m de comprimento e 0,4 m de largura, tendo feito variar o caudal unitário entre 25 e 175 l/(s.m). Anderson and Tullis (2013) desenvolveram igualmente uma expressão para o cálculo do coeficiente de vazão C_d baseado em resultados de ensaios experimentais para diversas geometrias de soleiras descarregadoras do tipo PKW, a partir de:

$$Q = \frac{2}{3} C_d L \sqrt{2g} H^{1.5} \quad (4.1)$$

em que H é a carga hidráulica sobre a crista da soleira descarregadora.

A Figura 4.7 ilustra a relação entre o coeficiente de vazão (C_d) em função da carga hidráulica adimensionalizada sobre a altura da crista (H/P) obtida por Anderson and Tullis (2013).

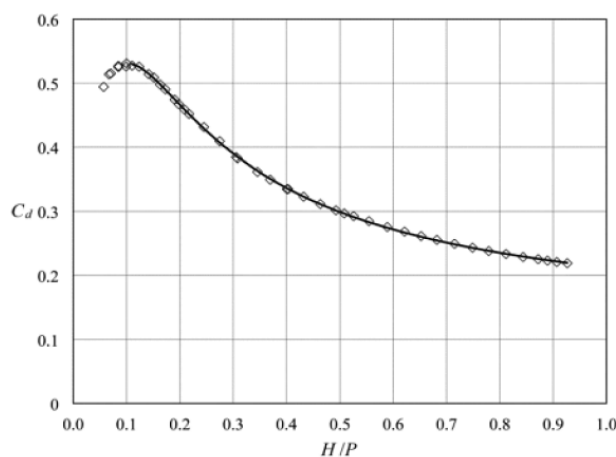


Figura 4.7 | Coeficiente de vazão para soleiras descarregadoras do tipo PKW com $W_i/W_o = 1,25$ (Anderson and Tullis, 2013)

Leite Ribeiro *et al.* (2012), com base em ensaios sistemáticos com soleiras descarregadoras do tipo PKW, comparam os valores da respetiva vazão (Q_p) com os valores teóricos para soleiras espessas (Q_s), e apresentam o quociente, r , da seguinte forma:

$$r = \frac{Q_p}{Q_s} \quad (4.2)$$

sendo:

$$Q_s = 0,42W \sqrt{2g} H^{1,5} \quad (4.3)$$

$$r = 1 + 0,24\delta \quad (4.4)$$

$$\delta = \left[\frac{(L - W) P_i}{W H} \right]^{0,9} \quad (4.5)$$

Em Portugal existe desde 2014 uma forte linha de investigação em soleiras PKW conduzida em parceria pelo LNEC e IST. A abordagem é essencialmente experimental, sendo sobretudo feita na instalação para estudo de descarregadores em degraus existente no pavilhão de Hidráulica de Estruturas do NRE (Reis, 2015; Pinto, 2017; Gomes, 2017; Gomes *et al.*, 2018).

Assim, Reis (2015), com um trabalho que envolveu um programa de testes exaustivos usando uma soleira PKW do tipo A, verificou que esta apresentava uma capacidade de vazão duas a três vezes superior à de soleiras do tipo WES; estudos conduzidos por outros investigadores chegaram a idênticas conclusões (Pinto, 2017; Gomes, 2017).

Na Figura 4.8 apresenta-se a curva de vazão obtida nos três últimos estudos supracitados para a soleira descarregadora do tipo PKW, assim como as curvas de vazão para uma soleira descarregadora do tipo WES, instalada anteriormente na instalação experimental referida, obtidas em estudos precedentes (Matos, 1999; Meireles, 2004; Cardoso, 2006).

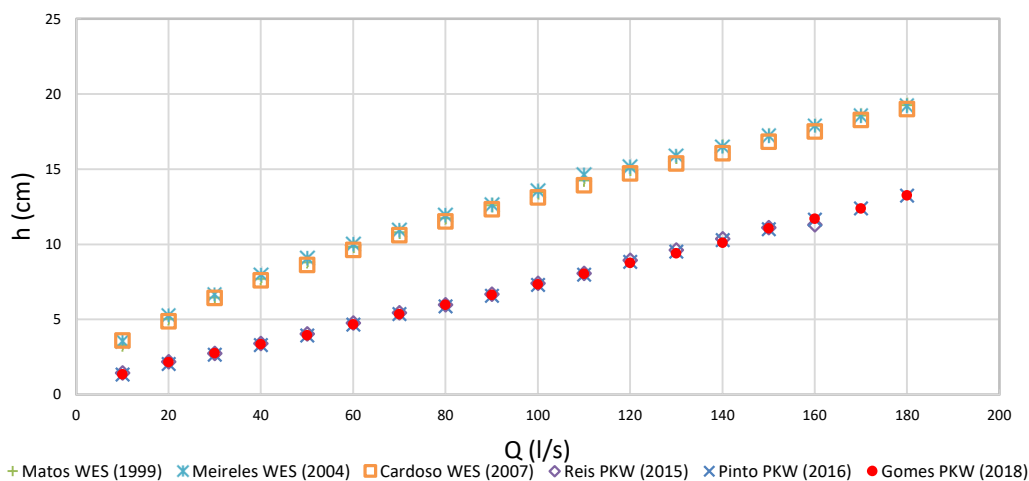


Figura 4.8 | Curvas de vazão das soleiras descarregadoras em teclado de piano e do tipo WES (Pinto *et al.*, 2018)

As curvas de vazão para a soleira PKW obtidas por Reis (2015), Pinto (2017) e Gomes (2017) são, como seria expectável, praticamente coincidentes. Analogamente aos estudos anteriores, verifica-se que o caudal escoado na soleira descarregadora do tipo PKW é consideravelmente superior ao escoado na soleira do tipo WES, em particular para pequenas cargas sobre a crista. Com efeito, naquele tipo de soleira, obteve-se um caudal cerca de três vezes superior ao da soleira descarregadora do tipo WES, para uma carga sobre a crista de 5 cm, e aproximadamente duplo para uma carga sobre a crista de 12 cm.

4.3.2 Medidas de deteção ou de prevenção não-estruturais: caracterizações *in situ* do escoamento em bacias de dissipação por impacto

A medição de grandezas *in situ* para analisar o comportamento de barragens constitui uma prática comum em engenharia de barragens. Nesta área é de realçar a atuação do LNEC que ao longo das últimas décadas ocupa um lugar de destaque na investigação e tecnologia de observação de infraestruturas em Portugal.

Note-se que podem ser medidos tantos os efeitos, por exemplo uma deformação de talude, como a causa, que neste caso pode estar associada às condições de pressões neutras no solo. De uma forma genérica, os parâmetros medidos incluem a pressão da água, as pressões totais, os assentamentos, os deslocamentos, a temperatura e as vazões de drenagem. Assim, a medição de grandezas *in situ* recorre a uma grande diversidade de instrumentos de observação, nomeadamente piezómetros, termómetros, células de pressão, marcos superficiais, inclinómetros, medidores de caudais percolados, etc. (Figura 4.9).

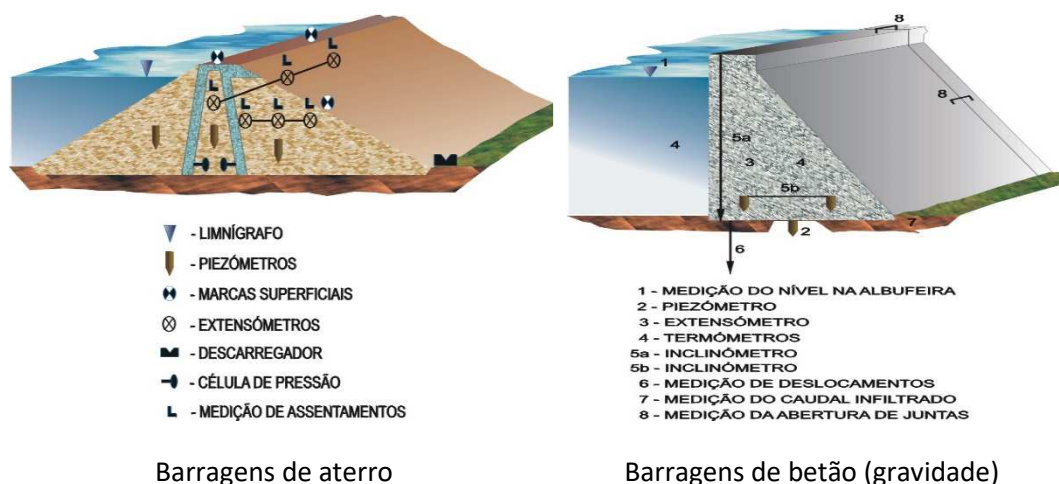


Figura 4.9 | Instrumentação típica em barragens (Fonte: Viseu, 2006)

Note-se que, tal como referido no Capítulo 3, são comuns os estudos de caracterização de escoamentos turbulentos conduzidos em instalações experimentais e modelos físicos de estruturas hidráulicas. Estes fazem uso de sensores de medição muitas vezes baseados em tecnologias avançadas (transdutores de pressão, velocímetros e medidores da concentração de ar) para obter dados posteriormente transpostos para valores de protótipo. Neste âmbito são de citar a título de exemplo a análise das flutuações de pressão associadas à ocorrência de ressaltos hidráulicos (Bowers and Tsai, 1969; Toso and Bowers, 1988; Pinheiro, 1995; Arménio *et al.*, 2000) ou ao impacto de jatos livres (Ervine *et al.*, 1997; Melo, 2001; Puertas and Dolz, 2005; Magalhães *et al.*, 2007; Manso *et al.*, 2009; Pettersson and Pettersson, 2010; Viseu e Amaral, 2015).

Contrariamente, a medição *in situ* das ações em estruturas hidráulicas sujeitas à ação do escoamento, nomeadamente pressões, flutuações de pressões, velocidades (e turbulência), é de uma forma geral inexistente e não constitui uma prática habitual instrumentar os órgãos de descarga de barragens, nomeadamente as bacias de dissipação, sendo os exemplos destas práticas raros.

Neste âmbito são de salientar os estudos com instrumentação *in situ* conduzidos na bacia de dissipação por ressalto hidráulico na UHE Porto Colômbia, no Brasil (Trierweiller *et al.* 2005; Marques *et al.*, 2007) e mais recentemente na bacia da barragem de Dalles, no rio Columbia (Deng *et al.* 2007). No entanto, tanto quanto é do conhecimento da autora, não existem referências bibliográficas nas quais dados de flutuações de pressão de alta frequência tenham sido coletados em protótipo em ambientes extremamente turbulentos como é o caso de jatos impactando em bacias de dissipação.

Neste contexto, constitui um estudo inovador o proposto recentemente à Eletricidade de Portugal que prevê a instalação de equipamento de medição de pressões e de flutuações de pressão numa bacia de impacto do descarregador de cheias do Aproveitamento Hidroelétrico de Foz Tua – AHFT (Viseu, 2014; Viseu *et al.*, 2018).

O sistema de medição é composto por dez transdutores de pressão disponíveis no mercado (marca pressão (LMK 307)). A medição é feita através de um diafragma flexível, que permite medir variações de pressão estáticas e dinâmicas, assim como picos e flutuações de pressão. Os sensores têm a capacidade de medir diferentes gamas de pressões (valores máximos até 25 bar) com elevada precisão e fiabilidade do sinal de saída (Figura 4.10). Cada sensor foi colocado no centro de placas que funcionam como “tampa de obturação” das caixas de suporte dos sensores, as quais também permitem a passagem de cabos de medição através do seu interior (Figura 4.11). As caixas foram embebidas nas lajes da bacia de impacto, mostrando a Figura 4.12 aspetos da colocação em obra.

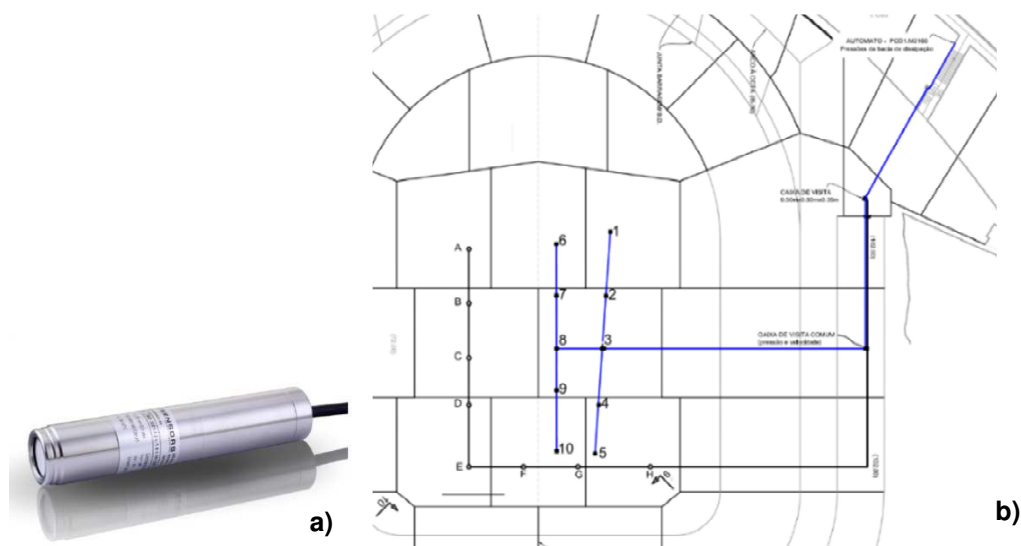


Figura 4.10 | Sistema de medição de pressões da bacia de impacto do descarregador de cheias do AHFT: a) aspeto geral do sensor de pressão LMK 307; b) localização dos transdutores (identificados com os números 1 a 10)

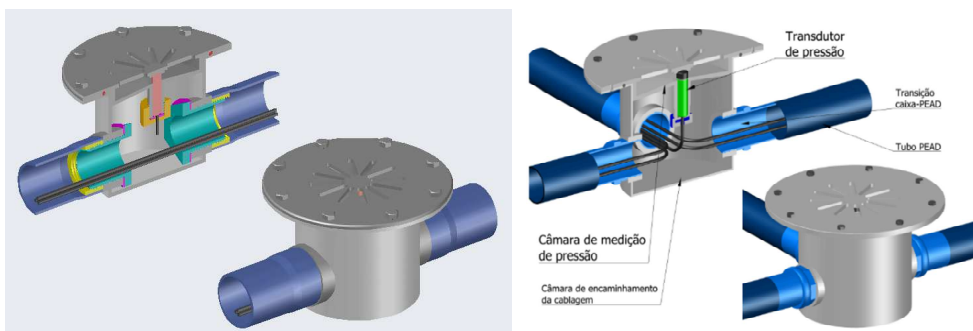


Figura 4.11 | Aspeto geral das caixas Tipo 1 e Tipo 3 para instalação dos sensores de medição de pressão e passagem de cabos



Figura 4.12 | Sequência de instalação dos transdutores de pressão LMK 307 e encaminhamento da cablagem até ao ponto de aquisição de dados (autómato). A e B: colocação do transdutor de pressão na câmara de medição da caixa de proteção; C: encaminhamento da cablagem dos diferentes transdutores pela conduta técnica da cota 72,00 até à caixa nº3; D: junção e encaminhamento de toda a cablagem pela conduta técnica da cota 72,00 até à cota 102,50; E: encaminhamento da cablagem da cota 102,50 até à galeria de visita 4 (GV4); F: ligação da cablagem individualizada aos canais predefinidos no autómato de aquisição de sinal

A calibração dos sensores revestiu-se de particular importância, já que a gama de medição é muito extensa. Os sensores foram calibrados de duas formas: i) em bancada de ensaios no LNEC antes de colocados em obra (Figura 4.13); ii) na bacia de impacto, após colocação em obra. A calibração local dos transdutores de pressão colocados na bacia de dissipação do AHFT teve como objetivo o ajuste fino da curva de calibração de cada transdutor, eliminando erros de medição associados à instalação em obra do equipamento.



a)

b)

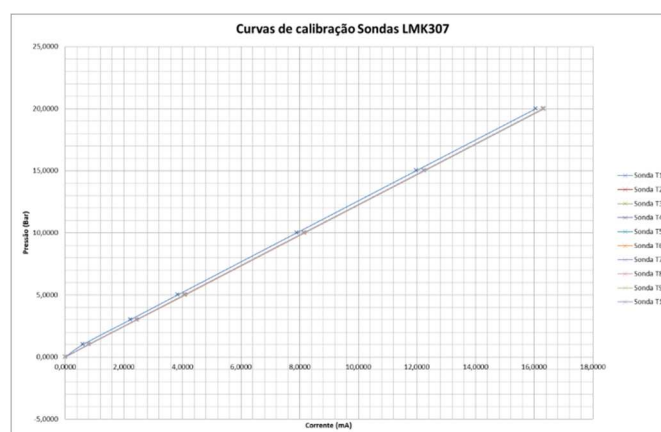


Figura 4.13 | Calibração dos sensores: a) aspeto da bancada de ensaios; b) exemplo de curva de calibração

O sistema de registo das pressões da bacia de dissipação é constituído por um datalogger PCD1.M2160 da Saia Burgess Controls (SBC), fornecido e instalado pela empresa Infocontrol – Eletrónica e Automatismo, Lda (<http://www.infocontrol.pt>).

Observe-se que, até à data, foi bastante difícil efetuar análises para testar as pressões hidrodinâmicas utilizando escoamentos provenientes do descarregador, uma vez que as comportas raramente foram operadas durante o período de teste devido a duas razões principais. Em primeiro lugar, durante a primeira fase de enchimento do reservatório, os níveis de água na albufeira mantiveram-se durante bastante tempo abaixo da cota da crista da soleira descarregadora, e, em segundo lugar, porque não ocorreram descargas, uma vez tendo sido esta cota ultrapassada. Com efeito, os últimos meses foram extremamente secos em todo o território português (fim de 2017 e princípio de 2018) e não se registaram cheias.

No entanto, foi possível obter registos de pressões, nomeadamente os que resultaram: i) da operação da descarga de fundo durante o período de 1º enchimento; ii) da operação da válvula de jato oco do caudal ecológico e iii) da operação do descarregador de cheias, num curto espaço de tempo para teste aos equipamentos eletromecânicos.

Com estes registos preliminares fez-se uma breve análise estatística com a determinação dos valores médios, máximos e mínimos, tendo ainda sido traçados mapas tridimensionais das pressões médias registadas (Figura 4.14). Estes resultados mostram que todos os transdutores respondem às operações de descarga e com picos de pressão de diferentes magnitudes, traduzindo diferentes forças exercidas nas lajes da bacia, tal como seria de esperar para este tipo de estrutura.

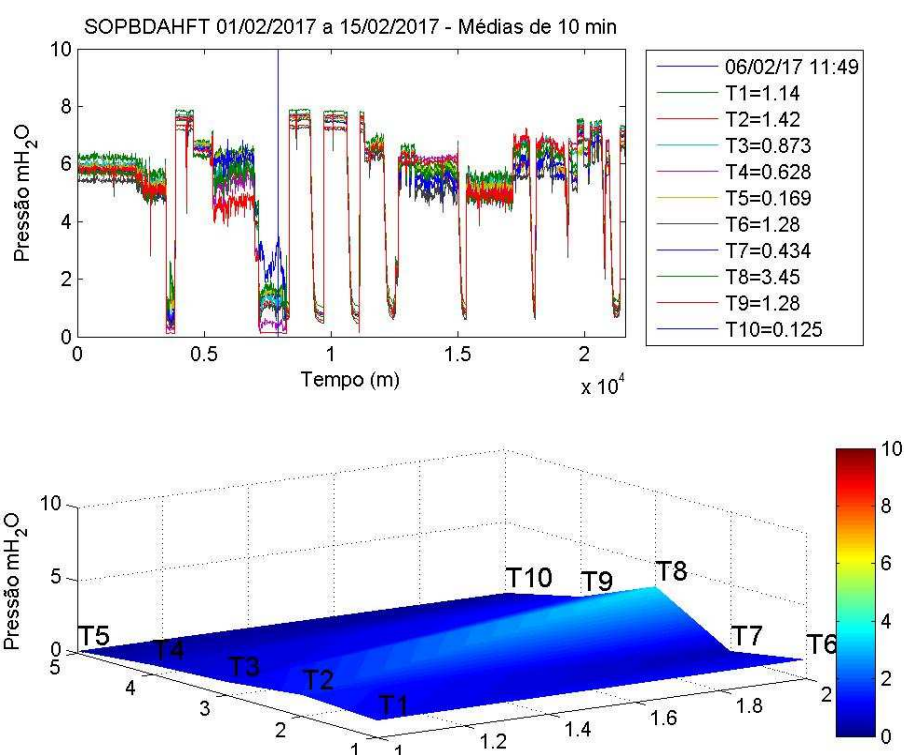


Figura 4.14 | Variação das pressões máxima e mínima relativamente à média

4.3.3 Medidas de mitigação ou de preparação: planeamento de emergência

4.3.3.1 Enquadramento geral

A maioria dos países ocidentais, nomeadamente europeus, tem uma longa história em programas de controlo de segurança em barragens, existindo igualmente legislação específica e normas na área de segurança de barragens. Nas últimas décadas, verifica-se que, para além dos aspetos tradicionais de segurança de barragens a ter em conta (aspetos esses que estão relacionados com o projeto, a construção, a observação, a manutenção e a exploração da estrutura), emergiram novos aspetos de segurança e de proteção do vale a jusante que é necessário contemplar, nomeadamente através de um planeamento de emergência. A esta tendência não é alheio o facto de grande número de barragens ter sido construída com recurso a tecnologias e métodos de cálculo não atuais, assim

como o facto de se verificar uma intensificação das condições de ocupação do território nos vales a jusante e, ocasionalmente, se testemunhar a ocorrência de acidentes graves que envolvem a perda de vidas humanas.

De facto, o planeamento de emergência em barragens é uma temática que nasceu na sequência de desastres que tiveram maior impacto na opinião pública. Assim, dos acidentes históricos envolvendo grandes barragens a nível internacional, é de referir a rotura gradual da barragem de Teton, com 123 m de altura, em 1976 nos Estados Unidos da América. Este acidente constitui hoje um dos casos clássicos de estudo entre especialistas e é um exemplo do sucesso da aplicação do planeamento de emergência, uma vez que, das 25 000 pessoas a residir na zona de risco no vale a jusante, “apenas” catorze perderam a vida (Chadwick *et al.*, 1976). Como exemplos clássicos de acidentes onde não foi possível avisar a população, figuram os da barragem de Vajont, em 1963 em Itália, e da barragem de Malpasset, em 1959 em França, onde se registou a perda de 2 600 e de 433 vidas humanas, respetivamente. Expressivo é também o caso da rotura das barragens de Banqiao, de Shimantan e de sessenta outras, mais pequenas, em Agosto de 1975 na China, que originaram a morte a cerca de 26 000 pessoas²⁷.

Constata-se, desta forma, que a tendência historicamente verificada na aplicação dos recursos apenas nas atividades de segurança de barragens e que têm tido enfoque na preservação da sua integridade estrutural tem vindo a modificar-se. A tendência mais recente impõe a combinação de esforços conjugados entre os donos das obras e as autoridades locais com vista à proteção das zonas que podem sofrer o impacto das cheias súbitas provocadas tanto pela rotura estrutural como pelas descargas efetuadas pelos órgãos hidráulicos de segurança.

Países como os EUA, a Suíça, a França e o Canadá têm já uma experiência adquirida no planeamento de emergência para barragens, dispondo de normas que incluem requisitos e critérios para o desenvolvimento de planos de emergência para barragens. Para outros países, como Portugal e Espanha, a temática do planeamento de emergência em barragens entrou na ordem do dia em termos de legislação nas últimas três décadas. A experiência normativa portuguesa pode ser considerada de sucesso em termos de definição estratégica, com os aspetos do planeamento de emergência já regulamentados no país e replicados, devidamente ajustados à realidade local, na definição de normas em vários outros países de expressão portuguesa, nomeadamente no Brasil (Lei 12.334/2010; CNRH, 2012 a); CNRH, 2012 b)), Cabo Verde e Moçambique.

Com efeito, em Portugal, as primeiras exigências legais envolvendo aspetos de proteção civil (p.e. sistemas de aviso e alerta) foram estabelecidas pelo Regulamento de Segurança de Barragens (RSB), publicado pelo Decreto-Lei n.º 11/1990, de 6 de janeiro (RSB, 1990), para as barragens de maiores dimensões e para as barragens de menores dimensões a que se associava risco potencial elevado. Em 2007 este documento é revogado, pelo Decreto-Lei n.º 344/2007, publicado em outubro

²⁷ Este número corresponde, unicamente, a mortes por afogamento, como consequência direta da rotura das barragens. Para além destas, ocorreram 230 000 outras mortes, devido à fome e às epidemias, como consequência indireta da catástrofe, que deu ainda origem a milhões de desalojados (GRAHAM, 1999).

(RSB, 2007), constituindo um aspeto importante desta nova versão do RSB a introdução da necessidade do desenvolvimento do Plano de Emergência Interno. Nesta atualização do RSB, a graduação das exigências legais de algumas das disposições regulamentares relativas ao controlo de segurança e às medidas de proteção civil é estabelecida com base numa classificação apoiada na avaliação dos danos potenciais. O âmbito de aplicação desta nova versão do RSB era o das grandes barragens, entendidas como as barragens com altura igual ou superior a 15 m, ou com altura igual ou superior a 10 m criando albufeiras com capacidade superior a 0,1 hm³. Estes critérios dificultavam a implementação do RSB já que eram abrangidas centenas de barragens, com dimensões muito dispare e envolvendo danos potenciais muito diferentes.

Em particular, a execução do RSB evidenciou claras dificuldades no caso das barragens de menor dimensão e envolvendo danos potenciais pouco significativos. Assim, muito recentemente (28 março de 2018) uma nova versão do RSB é publicada em Diário da República, pelo Decreto-Lei nº. 21/2018 (RSB, 2018).

De acordo com esta versão, o âmbito de aplicação do RSB é limitado às grandes barragens, entendidas como as barragens com altura igual ou superior a 15 m, ou com altura igual ou superior a 10 m criando albufeiras com capacidade superior a 1 hm³; esta versão continua a definir o agrupamento das barragens em função dos danos potenciais associados à onda de inundação correspondente ao cenário de acidente mais desfavorável mas introduzindo uma variável adicional: a perigosidade da barragem (e da correspondente onda de inundação). Esta última é caracterizada pelo seguinte fator:

$$X = H_{bar}^2 \sqrt{V_{alb}}$$

sendo H_{bar} a altura da barragem, em metros, e V_{alb} a capacidade da albufeira, em hm³.

Os danos potenciais são avaliados na região do vale a jusante da barragem onde a onda de inundação pode afetar a população, os bens e o ambiente: i) a) a população é avaliada em função do número de edificações fixas com carácter residencial permanente (Y); ii) os danos potenciais são avaliados tendo em consideração a existência de infraestruturas, instalações e bens ambientais importantes. São consideradas três classes de barragens (Quadro 4.3).

Quadro 4.3 | Definição da classe da barragem (RSB, 2018)

Classe	Perigosidade da barragem e danos potenciais
I	$Y \geq 10$ e $X \geq 1000$
II	$Y \geq 10$ e $X < 1000$, ou $0 < Y < 10$ independentemente do valor de X, ou Existência de infraestruturas, instalações e bens ambientais importantes
III	$Y=0$ independentemente do valor de X

4.3.3.2 *Plano de Emergência Interno*

De acordo com o RSB, as barragens de classe I devem possuir um Plano de Emergência Interno (PEI) que é um documento formal, a ser elaborado pelo Dono de Obra, no qual estão identificadas as possíveis situações de emergência da barragem em função do nível de perigo, estabelecidas as ações a serem executadas nesses casos e definidos os agentes a serem notificados de tais ocorrências, com o objetivo de minimizar danos e perdas de vidas.

A experiência do LNEC na elaboração de planos de emergência associados ao risco de habitar em vales a jusante de barragens realça a vantagem de organizar estes planos com base em cinco ações distintas:

- i) deteção do evento perigoso na barragem e classificação do nível de perigo;
- ii) tomada de decisão pelos responsáveis pela segurança da barragem (ou seja, a tentativa de controlar a situação na barragem);
- iii) notificação de todos os agentes envolvidos no planeamento de emergência;
- iv) aviso à população; e
- v) evacuação da mesma.

Assim, de uma forma mais ou menos consensual, afigura-se que o PEI deve dar resposta às três primeiras fases da “deteção”, da “tomada de decisão” e da “notificação”, às quais se podem seguir as outras duas, de “aviso” e de “evacuação” da população, que deverão ser essencialmente consideradas como pertencentes ao campo de ação de um Plano de Emergência Externo (PEE). Desta forma, considera-se que o PEI deve ser organizado em quatro partes e desenvolvido de acordo com a seguinte estrutura (USBR, 1995 a) e b); USBR, 1998; Viseu e Almeida, 2000; Viseu e Silva, 2004; Viseu, 2006; Viseu e Marcelino, 2014).

- Secção I – caracterização da situação de referência, que inclui as caracterizações da barragem, da cheia induzida pela rotura da barragem e do vale a jusante;
- Secção II – delineação do sistema de identificação das ocorrências excecionais e das circunstâncias anómalas, que corresponde à fase da “deteção e classificação do nível de perigo”;
- Secção III – definição do plano de ação, que corresponde à fase da definição das ações de resposta e da “tomada de decisão”;
- Secção IV – delineação dos sistemas de aviso e de alerta, que corresponde à fase da “notificação”.

A classificação do nível de perigo é usualmente feita em quatro níveis de perigo, sendo definidas as ações a implementar na barragem pelo responsável pelo PEI, para cada um destes níveis (Figura 4.15). A descrição das características gerais de cada nível de perigo ou situação potencial de emergência da barragem é a seguinte (Viseu e Marcelino 2014):

- Nível de perigo 0 – Normal (verde): quando não forem encontradas anomalias ou as anomalias encontradas ou a ação de eventos externos à barragem não comprometam a segurança da barragem; tais anomalias e ações devem ser controladas e monitorizadas ao longo do tempo;
- Nível de perigo 1 – Atenção (amarelo): quando as anomalias encontradas ou a ação de eventos externos à barragem não comprometam a segurança da barragem no curto prazo; tais anomalias e ações devem ser controladas, monitorizadas ou reparadas;
- Nível de perigo 2 – Alerta (laranja): quando as anomalias encontradas ou a ação de eventos externos representem risco para a segurança da barragem no curto prazo, devendo ser tomadas providências para a eliminação do problema;
- Nível de perigo 3 – Emergência (vermelho): quando as anomalias encontradas ou a ação de eventos externos à barragem representem risco de rotura iminente, devendo ser tomadas medidas para prevenção e redução dos danos materiais e humanos decorrentes do colapso da barragem.

No PEI devem ser desenvolvidas tabelas para a identificação destes níveis de perigo bem como tabelas com as ações de resposta para cada um destes níveis.

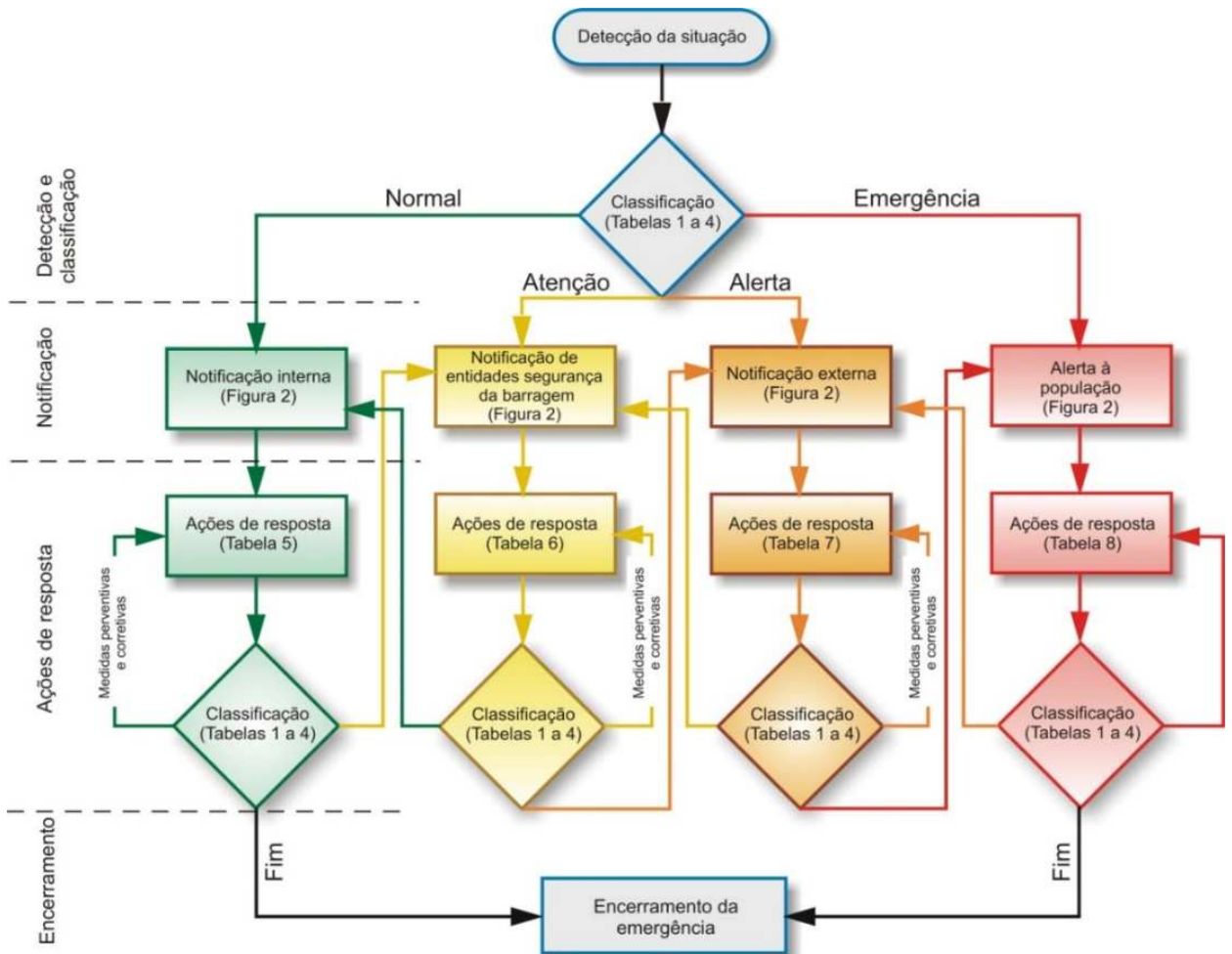


Figura 4.15 | Ações a implementar pelo Coordenador do PEI (adaptado de Viseu e Marcelino, 2014)

Outros dos aspetos importantes a nível do PEI é o cálculo da cheia induzida pela rotura da barragem que permite delinear o mapa de inundação. O mapeamento das zonas inundáveis e o conhecimento da altura e velocidade de propagação da onda em cada trecho e do seu tempo de chegada permite efetuar um zonamento do risco por diferentes graus de gravidade, uma vez que as zonas suscetíveis de serem inundadas sofrem os impactos da cheia induzida de forma distinta. Em particular, no PEI deve, igualmente, estar definida a Zona de Autossalvamento (ZAS), ou seja, a região a jusante da barragem em que se considera não haver tempo suficiente para uma intervenção das autoridades competentes em caso de acidente.

O limite ZAS tem usualmente em atenção os seguintes critérios: 10 km ou a distância que corresponda a um tempo de chegada da onda de inundação igual a trinta minutos.

4.4 Oportunidades de investigação

4.4.1 Contribuições para a avaliação do risco em barragens

4.4.1.1 Modelação da rotura de aterros

A modelação da cheia induzida pela rotura de aterros continua a ser um tópico de investigação, nomeadamente num contexto da gestão de risco envolvendo os aspetos das alterações climáticas. É, com efeito, oportuno investir numa nova geração de especialistas em risco de rotura de barragens e diques com conhecimento profundo em ferramentas de modelação física e numérica. O impacto desta pesquisa transcende o contexto português e engloba atividades das entidades de proteção civil a uma escala global.

Com efeito e apesar de, tal como já foi referido, existir atualmente um volume significativo de trabalhos sobre a ocorrência de brechas em barragens e diques de aterro, a fenomenologia do processo erosivo não é completamente compreendida e a modelação numérica deste fenómeno tem evidenciado diferenças substanciais nos resultados. Em particular, a maior fonte de incerteza na previsão da extensão da inundação e do tempo de chegada da cheia de rotura continua a ser o hidrograma efluente da brecha, ou seja, a modelação da evolução da brecha de rotura e a estimativa do seu tempo de formação (que é o parâmetro mais difícil de prever). Assim, verifica-se ser necessário ter um maior conhecimento da fenomenologia da erosão e de informação sobre rotura de aterros que permita ajudar a calibrar modelos numéricos existentes e a desenvolver modelos numéricos mais realistas, rigorosos e com maiores potencialidades. Este desiderato só pode ser cabalmente feito pela abordagem experimental e a realização de ensaios sistemáticos em aterros à escala continua a ser uma via de obtenção de conhecimento.

Neste âmbito, Amaral (2017), tendo por base a avaliação crítica de trabalhos de investigação recentes, identificou as seguintes limitações na capacidade atual para modelar experimentalmente os processos de rotura em aterros:

- o galgamento do aterro é usualmente considerado como um todo, ou seja, sem um canal piloto (Schmocker and Hager 2009, 2012) e muitos ensaios assumem condições de simetria

da evolução da brecha, ou seja, a rotura é conduzida junto a uma parede de acrílico, simulando-se apenas metade do aterro e supondo um comportamento simétrico (Jack, 1996; Coleman *et al.* 2002; Zhao, *et al.* 2015; Yang *et al.* 2015);

- os ensaios são usualmente feitos com modelos de muito pequena dimensão e usando areia ou materiais com baixa coesão para a construção dos aterros, pelo que a mistura dos solos é muitas vezes muito simples e com uma distribuição uniforme da dimensão do grão (Orendorff *et al.* 2013; Tabrizi *et al.*, 2017);
- o uso de instrumentação muito simples para monitoramento da rotura nos estudos experimentais realizados a escalas maiores, envolvendo barragens homogéneas ou zonadas com núcleos de argila (IMPACT 2005; Hanson *et al.*, 2005 a); Vaskinn *et al.*, 2004), não gerando informações detalhadas da evolução da brecha; por exemplo, no caso de IMPACT (2005), a velocidade superficial não foi medida pelo que os hidrogramas efluentes da brecha de rotura derivam de estimativas do balanço de massa e não de medições diretas;
- os testes laboratoriais da rotura de diques são normalmente realizados em instalações que não permitem a modelação do escoamento longitudinal (Müller *et al.* 2016; Schmocker *et al.* 2014), o que é particularmente inadequado no caso de diques fluviais.

No LNEC, a construção de uma instalação de grande dimensão (Figura 4.16) e os avanços recentes nas técnicas de visualização permitiram, para além do conhecimento dos processos a grande escala, dar a conhecer alguns aspetos dos detalhes de pequena escala, necessários à criação de uma ferramenta de simulação com base em processos físicos (Amaral, 2017). As maiores inovações foram: i) o uso de escalas significativamente maiores em modelos laboratoriais; ii) o estudo realista do comportamento geotécnico conferido por uma escolha criteriosa dos materiais do corpo dos aterros, envolvendo sedimentos coesivos e não-coesivos e iii) o uso de instrumentação minimamente invasiva que permite medições diretas da evolução da brecha e da velocidade do escoamento na secção da mesma. Estes avanços abrem caminho para uma nova geração de ferramentas de simulação.

Assim, o presente Programa de Investigação propõe-se seguir a linha de investigação existente e contribuir para a melhoria da capacidade atual de prever hidrogramas efluentes de barragens e de diques de terra sujeitos à rotura por galgamento, ultrapassando algumas das limitações identificadas em estudos prévios. Continuar-se-á a usar escalas significativamente maiores em modelos laboratoriais e materiais com teor de argila adequados, bem como a fazer uso de instrumentação inovadora e técnicas de visualização e medição avançadas que permitem a caracterização detalhada de várias grandezas (e.g. velocidades junto à brecha, evolução da brecha e erosão do talude); especial atenção será dada aos efeitos do fluxo longitudinal sobre a evolução de brecha (diques) e recorrer-se-á a aterros mais realistas com núcleos de argila e sistemas de drenagem interna (barragens).

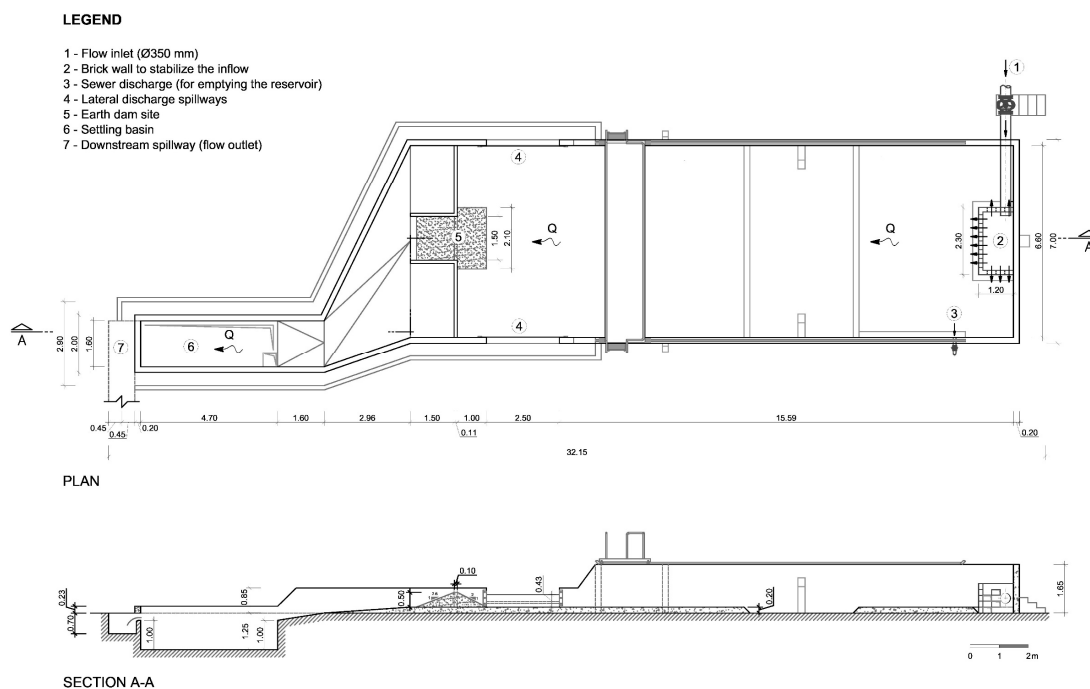


Figura 4.16 | Instalação experimental para estudo da rotura de barragens e diques de aterro (Amaral, 2017)

Em termos experimentais as maiores inovações propostas incluem:

- a condução de ensaios em aterros zonados envolvendo o estudo realista do comportamento geotécnico conferido por uma escolha criteriosa dos materiais do corpo dos aterros, com solos com teores de argila adequados;
- a condução de ensaios para avaliar a influência da existência de sistemas de drenagem interna, semelhantes aos existentes em barragens reais;
- o alargamento do estudo para diques, para avaliação a influência do escoamento não ortogonal.

Note-se que o Programa de Investigação proposto articula atividades laboratoriais e computacionais. Com efeito, a revisão bibliográfica realizada permitiu verificar que, no que diz respeito à modelação numérica, a modelação da brecha de rotura é de uma forma simplificada realizada por uma abordagem paramétrica (Viseu, 2004; Macchione, 2008; Wu 2013), considerando a brecha como um descarregador de geometria trapezoidal e assumindo condições de regime crítico na soleira do mesmo. De acordo com Amaral (2017), esta suposição pode não ser apropriada já que não prevê episódios de falha geotécnicos e a sua interação com erosão hidrodinâmica.

Assim, visando ultrapassar as fragilidades de estudos existentes, os objetivos do presente Programa de Investigação são contribuir para o avanço da caracterização dos fenómenos hidrodinâmicos e geotécnicos envolvidos na evolução temporal de brechas originadas pelo galgamento de aterros (barragens e diques). A concretização deste objetivo basear-se-á em extenso trabalho laboratorial que permitirá o desenvolvimento de um modelo conceptual da evolução temporal de brechas e consequentes hidrogramas efluentes, em barragens de terra, contemplando os aspetos hidrodinâmicos e geotécnicos desta evolução.

Propõe-se que este modelo conceptual seja desenvolvido com base na realização de um programa específico de ensaios de rotura de aterros por galgamento, conduzido na instalação existente no NRE, que incorpore o acoplamento de processos de erosão/deposição hidráulica e instabilidade geotécnica já identificados anteriormente. Estes ensaios serão efetuados com instrumentação inovadora e implementando recentes avanços das técnicas de modelação laboratorial de escoamentos não uniformes. Os resultados dos diversos ensaios serão comparados entre si e os parâmetros mais influentes na forma e pico do hidrograma efluente serão aferidos.

Em conclusão, em termos numéricos a maior inovação proposta no presente Programa de Investigação incluirá assim o desenvolvimento de um modelo conceptual integrado para prever a evolução temporal de brechas de rotura de barragens e diques sujeitos ao galgamento, incluindo os fenómenos hidrodinâmicos e geotécnicos. Desta forma, será possível obter uma nova geração de ferramentas para simulação numérica de misturas fluido-sedimento (pela combinação de um módulo geotécnico 3D e um módulo hidrodinâmico 2D), criando um modelo híbrido para simulação da evolução da brecha e do hidrograma de rotura. Os ensaios propostos permitirão igualmente criar uma base de dados que ficará disponível para a comunidade técnica e científica e poderá servir para a calibração/validação de modelos numéricos.

4.4.1.2 Avaliação do risco das barragens portuguesas com impacto em Espanha

A segurança de pessoas e bens é uma constante preocupação dos decisores políticos que são responsáveis por criar e manter as condições indispensáveis à estabilidade e desenvolvimento sustentável do território que administram. Isto implica, entre outras coisas, proteger a população contra desastres naturais ou tecnológicos, o que pode ser conseguido avaliando o risco e tentando minimizar os seus efeitos.

Em 2016 estimava-se que em Portugal existissem 258 grandes barragens em exploração, estando 182 destas classificadas de acordo com os seguintes números²⁸: 109 de classe I, 56 de classe II e 17 de classe III. Destas 109 barragens de classe I, cerca de duas dezenas encontram-se localizadas em bacias internacionais dos rios Minho, Douro, Tejo e Guadiana (Figura 4.17 a)), podendo a respetiva rotura ter impacto não só em Portugal como em Espanha (Viseu, 2007). Existem também barragens espanholas com impactos em Portugal.

Assim, uma necessidade de investigação neste âmbito consiste na avaliação do risco de cheias provocadas por barragens nos rios Ibéricos internacionais e na identificação das áreas de inundação

²⁸ Tal como já foi referido, a nova legislação de segurança de barragens (2018) altera o critério de classificação, mas afigura-se que no caso das barragens de maior dimensão se podem manter os números apurados com os critérios da legislação de 2007.

a jusante das barragens portuguesas com potencial para originar efeitos adversos para lá da fronteira. Tal implica o seguinte:

- definir os cenários de rotura das barragens;
- modelar as cheias induzidas por potenciais acidentes e proceder à cartografia das zonas inundáveis;
- avaliar a vulnerabilidade às inundações das zonas que sofrem o impacto destas cheias;
- planear procedimentos para minimizar as suas consequências.



Figura 4.17 | Barragens Portuguesas com impacto internacional e área geográfica do Programa de cooperação transfronteiriça INTERREG V-A 2014-2020

A avaliação do risco de cheias das barragens supracitadas auxiliará os decisores políticos a conhecer o risco provocado por infraestruturas de importância transfronteiriça bem como ajudará os responsáveis pela gestão destas infraestruturas a minimizar o risco que elas possam representar. A linha de investigação proposta garantirá que as avaliações de risco das diversas barragens tenham graus de desenvolvimento análogos e que estejam de acordo com a dimensão e risco induzido pelas barragens, assim como com as características de ocupação territorial dos respetivos vales a jusante.

Outro aspeto que carece de investigação é a articulação dos planos de emergência em bacias internacionais, mais concretamente nos casos em que o impacto da rotura de uma barragem se faz sentir em vários países, já que a gestão do risco associado a estas barragens carece de metodologias a definir conjuntamente por esses países. Assim, uma das necessidades de investigação prende-se com a definição de procedimentos padronizados, em Espanha e Portugal, para a mitigação do risco nos vales a jusante de infraestruturas hidráulicas com efeitos transfronteiriços. Desta forma, o Programa de Estudos propõe o desenvolvimento de um conjunto de instrumentos a utilizar de forma concertada pelos serviços e agentes de proteção civil de ambos os países que os ajudará a responder de forma eficiente em situações de emergência, com vista a minimizar a perda de vidas e a reduzir os prejuízos económicos e ambientais.

Neste aspeto, salienta-se a importância do Programa INTERREG, que é uma iniciativa da EU para promover a partilha de conhecimento e experiência entre as diversas regiões da Europa. Esta desenvolve-se em três zonas principais: cross-border (INTERREG A - Figura 4.17 b)), transnacional nas vertentes Espaço Atlântico, Sudoeste e Med (INTERREG B) e inter-regional (Interreggrama). Este programa encontra-se no seu quinto período de implementação: INTERREG V (2014-2020).

Em particular, o Programa INTERREG V-A Espanha-Portugal 2014-2020 (<http://www.poctep.eu/pt-pt/2014-2020/apresenta%C3%A7%C3%A3o-2014-2020>) é um programa específico para cooperação transfronteiriça entre os dois países com quatro objetivos prioritários, estando a gestão do risco em barragens com impacto transnacional presente em três deles: i) potenciar a investigação, o desenvolvimento tecnológico e a inovação ii) promover a adaptação às AC e a prevenção e a gestão dos riscos transfronteiriços e iii) melhorar a capacidade institucional e a eficiência da administração pública, consolidando novas estratégias de diálogo e inter-relação, que permitam avançar com novas iniciativas entre os vários atores que operam na fronteira.

4.4.2 Contribuições para a mitigação do risco em barragens

4.4.2.1 Novas soluções de projeto: as soleiras PKW

O aumento da capacidade de vazão em descarregadores de cheias é um aspeto que se relaciona essencialmente com a reabilitação de descarregadores existentes, constituindo as possíveis soluções uma temática atual de investigação. O aumento da capacidade de vazão pode, no caso de se considerarem apenas fatores hidráulicos e hidrológicos, ser feito quer modificando as estruturas por forma a adequá-las às novas situações (descarregador adicional ou executando nas

barragens de aterro obras de proteção que possibilitem o galgamento, por exemplo), quer alterando as soleiras existentes. Tal pode ser feito baixando a cota da crista da soleira descarregadora ou aumentando o desenvolvimento da mesma (soleiras poligonais, do tipo labirinto ou mais recentemente, as soleiras PKW, por exemplo).

Com efeito, tal como apresentado em 4.3.1, verifica-se que o caudal escoado sobre uma soleira descarregadora do tipo PKW é consideravelmente superior ao escoado sobre uma soleira do tipo WES, para idêntica largura do descarregador e carga sobre a crista, nomeadamente cerca de duas a três vezes superior, para um valor elevado ou reduzido da carga sobre a crista, respetivamente (Gomes *et al.*, 2018).

No LNEC existe uma instalação para estudo de descarregadores em degraus que foi adaptada para o estudo de soleiras PKW. Este facto constitui uma oportunidade para o desenvolvimento de investigação neste âmbito, implementando alterações de menor ou maior envergadura na instalação existente.

A instalação é constituída por um reservatório de entrada, uma soleira descarregadora, um canal em degraus e uma bacia de dissipação; termina num canal de restituição (Figura 4.18 a)).



Figura 4.18 | Instalação experimental para estudo de novas soleiras: a) vista de jusante e b) aspeto geral da soleira descarregadora do tipo PKW

A soleira é do tipo PKW e geometria A (*vide* Figura 4.5), sendo constituída por duas teclas interiores, duas teclas exteriores e por duas metades na extremidade (Figura 4.18 b)). A crista encontra-se 3,36 m acima da cota do fundo da bacia de dissipação e o canal descarregador é composto por um degrau de 4 cm e 34 degraus de 8 cm de altura. A soleira do tipo PKW e os degraus do descarregador são em vidro acrílico, de modo a permitir uma melhor visualização do escoamento durante os ensaios realizados. Assim, uma óbvia necessidade de investigação consiste na caracterização do escoamento para soleiras em teclado de piano, com características geométricas diferentes e para diferentes tipologias da existente, nomeadamente para as tipologias B, C e D.

Um outro tópico de investigação possível resulta de a instalação existente, canal descarregador em degraus, promover o arejamento do escoamento, de uma forma mais significativa do que a normalmente possibilitada em instalações experimentais e modelos físicos de estruturas hidráulicas. Assim, está-se em presença de uma instalação particularmente adequada para estudar diferentes tecnologias de medição de concentração de ar, um dos aspetos que este Programa de Investigação pretende aprofundar.

Finalmente, uma terceira necessidade de investigação passa pela caracterização do escoamento de emulsão ar-água ao longo de canais descarregadores com paramento liso e com degraus de diferentes alturas, de modo a investigar os diferentes potenciais de dissipação de energia.

4.4.2.2 *Medições de grandezas em protótipo*

A medição de grandezas hidráulicas em protótipo tem grande interesse para o conhecimento cabal das ações nas estruturas hidráulicas e da resposta das mesmas. Em particular, a determinação da distribuição das pressões médias e suas flutuações (“*dynamic pressures analysis*”) é de grande importância em hidráulica de estruturas, nomeadamente para o conhecimento do processo de dissipação de energia em bacias de dissipação ou de impacto e para o seu correto dimensionamento. Nestes casos, o complexo escoamento obriga geralmente a um estudo em modelo físico.

Note-se que o registo destas grandezas, para além de permitir conhecer os esforços sobre as estruturas, tem também uma importância grande nos aspetos que se relacionam com a segurança. Assim, por exemplo, as eventuais deteriorações motivadas pela cavitação em bacias de dissipação e os processos erosivos que ocorrem a jusante das mesmas podem ser causados pelas bruscas flutuações de velocidades, pressões e níveis existentes, e o seu cabal conhecimento é importante. Ademais, atualmente, a distribuição espacial das amplitudes de pressão (e de velocidades) pode ser registada utilizando equipamentos capazes de registar a suas variações numa extensa gama de frequências.

Por outro lado, tal como apresentado em 4.3.2, as medições são raramente feitas em protótipo pelo que geram dados úteis para futuros projetos e obras que têm naturalmente um grande interesse técnico-científico. As medições (de alta qualidade) *in situ* e à escala real são provavelmente a ação mais interessante em investigação no futuro e providenciarão conclusões essenciais no que diz respeito à validade dos resultados de modelos numéricos, que até agora têm sido calibrados com informação laboratorial obtida em instalações de pequena e média dimensão, i.e., que envolvem indesejáveis efeitos de escala (Chanson, 2009 e 2013).

A análise destes dados permitirá tecer considerações e recomendações sobre os efeitos de escala, em particular nos casos em que o arejamento é importante. Na verdade, neste caso, não há similaridade entre o modelo físico e o protótipo já que nem todos os números adimensionais pertinentes são iguais no modelo e no protótipo. Com efeito, os modelos físicos, por exemplo de descarregadores de cheias, são normalmente dimensionados por meio da lei de semelhança de Froude (Fr). Todavia há aspetos importantes (no caso de descarregadores em degraus ou em sifão,

por exemplo), como o arejamento do escoamento e o campo de pressões, que devem levar em conta outros parâmetros adimensionais como, por exemplo, os números de Reynolds (Re), Weber (We) e Cauchy (Ca).

Desta forma, a comparação de dados de protótipo com os dos modelos físicos tem grande interesse para o conhecimento dos fenómenos uma vez que estes últimos podem ter associados alguns efeitos de escala. A comparação de resultados do modelo físico e do protótipo permitirá discutir os erros associados ao processo de extrapolação de resultados laboratoriais para o protótipo e os possíveis erros associados aos efeitos de escala.

No LNEC procedeu-se ao estudo em modelo físico do descarregador de cheias e da bacia de impacto do AHFT – *vide* Figura 4.19 (Viseu e Amaral, 2015). Esta bacia, tal como apresentado no ponto 4.3.2, foi instrumentada com um conjunto de transdutores de pressão aquando da sua construção, o que possibilitará a medição de grandezas em protótipo (Viseu *et. al.*, 2018). Por outro lado, pretende-se igualmente empreender a modelação numérica CFD do escoamento na bacia de impacto.



Figura 4.19 | Modelo físico da Barragem do AHFT. Vista de jusante para montante

Esta situação constitui uma oportunidade para o desenvolvimento de investigação integrando dados laboratoriais e em protótipo com resultados de modelação numérica. Numa primeira fase, pretende-se comparar os resultados do modelo físico quanto a flutuações de pressão com os valores destas obtidos em protótipo de forma a levar a cabo uma análise sobre os efeitos de escala. Numa segunda fase pretende-se calibrar o modelo numérico com informação proveniente do modelo físico e do protótipo, aprofundando, adicionalmente, o conhecimento dos efeitos de escala em escoamentos altamente turbulentos em estruturas hidráulicas.

4.4.2.3 Implementação e informatização de PEI em ambiente WEBSIG

O número de barragens a que o RSB é aplicável é elevado, tendo em conta o facto de que abrange tanto as barragens com altura superior a 15 m como as barragens com albufeiras com capacidade superior a 10^6 m³. O RSB exige, adicionalmente, para as barragens de classe I, o desenvolvimento do Plano de Emergência Interno (PEI) que pode prever a implementação de um Sistema de Aviso e Alerta (SAA). Assim, quer a APA quer a ANPC, em colaboração com o LNEC, têm vindo a construir

e implementar instrumentos neste âmbito, nomeadamente *guidelines* para o desenvolvimento de planos de emergência internos e normas para a divulgação e teste destes últimos (ANPC e INAG, 2009; Sá e Viseu, 2011).

Tal como já foi referido existem em Portugal 109 grandes barragens que foram classificadas como sendo de classe I. Assim, como medidas de mitigação do risco, estão hoje já desenvolvidos em Portugal planos de emergência internos para um número significativo das barragens de classe I, com o traçado de mapas de inundação e a definição de abordagens para identificação de anomalias e para definição de ações de resposta. Com efeito, foram nos últimos anos apresentados para análise da Autoridade de Segurança de Barragens cerca de sessenta PEI, estando metade aprovados (números de 2016). De uma forma geral verifica-se que a EDP é o Dono de Obra que tem registado o maior número de planos apresentados e implementados, mantendo-se uma evolução positiva na elaboração dos PEI levada a efeito em diversas barragens hidroagrícolas, em particular nas tuteladas pela DGADR. Regista-se que a implementação destes planos não tem acompanhado o ritmo de aprovação dos mesmos. Com efeito, apesar de existirem muitos estudos elaborados e já aprovados pelas entidades competentes, a implementação de um número significativo destes não se tem na prática efetuado. Assim, um aspeto que importa aprofundar relaciona-se com a implementação e teste dos planos já desenvolvidos.

Note-se que, de uma forma geral, estes planos são desenvolvidos sob a forma de documentos escritos em papel, difíceis de ler; muito longos, e, por estas razões, de difícil uso na fase operacional. O Coordenador do PEI, que é o responsável por coordenar as ações de resposta (*vide* Figura 4.15), tem, em particular, que garantir um importante conjunto de ações em situações de emergência. Estes são aspetos que tornam particularmente atrativa a transformação do documento em papel, que constitui tradicionalmente o PEI, numa ferramenta computacional da resposta à emergência.

Assim, propõe-se no âmbito do presente Programa de Investigação o desenvolvimento de uma aplicação de apoio à emergência na barragem, informatizando todas as ações de resposta que constituem um PEI e dando acesso a toda a informação, nomeadamente a geográfica (como, por exemplo, as áreas de inundação) através de um Sistema de Informação Geográfica (SIG). Ademais, pretende-se que o sistema de apoio à gestão da emergência na barragem seja facilmente acessível, por exemplo através de uma plataforma *WEB*.

Um ambiente computacional em *WEBSIG* para dar resposta à emergência permitirá a preparação para a tomada de decisão em situações críticas e inesperadas (*vide* Figura 4.20). Este sistema de apoio à emergência em formato de aplicação informática permitirá não só avaliar as áreas de risco como também identificar as opções de localização geográfica dos recursos e o impacto nas estruturas em determinados cenários e diferentes estratégias na execução das ações de resposta. Na prática, as ferramentas computacionais da resposta à emergência ajudarão a processar os dados recolhidos (mesmo que estes não tenham sido recolhidos de forma automática), extraindo daí informação valiosa para os agentes responsáveis pela resposta.

Ademais o sistema de apoio à emergência permitirá melhorar a implementação dos PEI, sendo adicionalmente uma ferramenta que permitirá estudar situações críticas difíceis de reproduzir na

realidade (roturas da barragem, por exemplo) devido ao elevado número de variáveis envolvidas, e, assim, permitir o treino dos diversos agentes intervenientes.

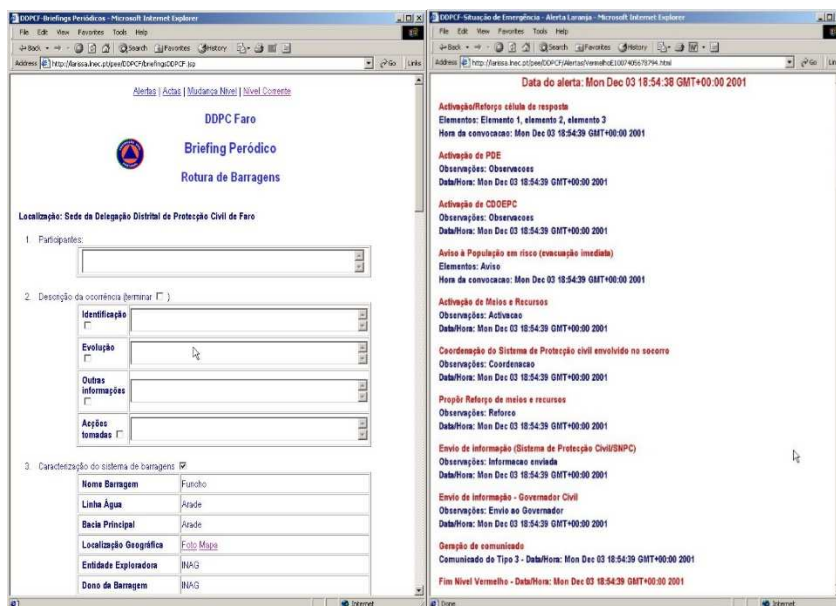


Figura 4.20 | Exemplo de janelas de um PEI em ambiente WEBSIG

Sá e Viseu (2011) consideram que o treino dos agentes que participam no planeamento de emergência deve assentar num programa de exercícios que é considerado como um processo composto por duas fases fundamentais: o teste e a avaliação. A fase de teste tem a finalidade de medir a capacidade do pessoal e das entidades darem resposta aos procedimentos pré-definidos no PEI bem como estar a prontidão dos equipamentos. A fase de avaliação tem a finalidade de permitir tecer conclusões sobre a eficácia do PEI e os ajustes e atualizações necessários para a sua melhoria.

Assim, os programas de exercícios podem tipicamente ser decompostos em quatro etapas (não sendo um requisito que todos os programas de exercícios as incluam todas), as quais, por ordem ascendente de complexidade, são: i) seminário de orientação; ii) exercício interno simples, que testa os sistemas de alerta e de aviso bem como a operacionalidade dos órgãos de segurança da barragem; iii) exercício interno integrado (*tabletop exercise*, da terminologia anglo-saxónica), que testa o sistema de resposta a nível da barragem e avalia a eficácia dos procedimentos de resposta definidos no PEI) e iv) exercício externo ou simulacro de rotura na barragem.

Acredita-se, assim, que o teste e avaliação dos PEI através do treino dos diversos agentes com recurso a uma plataforma WEBSIG permitirá, para além das atividades de investigação adicionais neste domínio da mitigação do risco associado às barragens, identificar lacunas e incoerências nos PEI desenvolvidos. Estas emergirão não somente na sequência da realização de seminários de discussão entre as entidades envolvidas nos planos e de testes aos sistemas de alerta e de aviso, como também na prática de exercícios globais no terreno integrando entidades de proteção civil locais. Assim, a preparação destes instrumentos para testar a eficácia dos planos de emergência internos de barragens desenvolvidos em Portugal constitui um domínio em que se deverá investir, em investigação associada à segurança de barragens, nos próximos anos.

5 | PROGRAMAS DE ESTUDOS

5.1 Introdução

O Programa de Investigação apresentado insere-se na Área Científica de “*Engenharia de Recursos Hídricos e Obras Hidráulicas*” e pretende dar um contributo para a investigação no domínio da hidráulica de estruturas, em algumas áreas onde se identificou haver carência de investigação no NRE. Este programa inclui a apresentação de uma síntese dos conhecimentos existentes sobre os diferentes domínios, apresenta e comenta as matérias que têm vindo a ser tratadas no NRE e tenta apontar, sistematicamente, os problemas em aberto; estes aspetos foram desenvolvidos nos Capítulos 2 a 4 do presente documento.

Assim, da análise destes capítulos afigura-se que, de uma forma geral, devam surgir novos desenvolvimentos de investigação no NRE nos seguintes domínios (*vide* Figura 1.1 no Capítulo 1):

- nos sistemas bacia hidrográfica e albufeira, abordando a temática das alterações climáticas e dos eventos extremos (cheias e secas) e a questão da otimização da exploração em situação de escassez da água;
- no sistema barragem, abordando a temática da modelação do escoamento em estruturas hidráulicas e da erosão junto e a jusante deste tipo de estruturas;
- no sistema vale a jusante, abordando a questão do risco associado à existência de barragens.

No presente Capítulo 5 é apresentada uma estratégia de investigação baseada em quatro Programas de Estudos distintos que procuram dar resposta aos problemas identificados. Para além da justificação e enquadramento, cada um dos Programas de Estudos define os objetivos da investigação, propõe metodologias e atividades, identifica os recursos necessários e os potenciais financiamentos externos bem como apresenta os benefícios e resultados esperados.

Nos subcapítulos seguintes apresentam-se os Programas de Estudos propostos.

5.2 Conceção dos Programas de estudos

Tal como referido no Capítulo 1, é proposta uma reorganização das áreas de investigação que são consideradas como prioritárias no NRE (*vide* Figura 1.3 no Capítulo 1). Assim, previu-se o desenvolvimento de quatro Programas de Estudos, subdivididos em oito projetos, distintos, mas fortemente interligados, que procuram dar respostas às necessidades de investigação identificadas.

Os Programas de Estudos foram definidos para um horizonte de oito anos e estão em parte integrados nos projetos a desenvolver pelo NRE no atual e no próximo Programa de Investigação e Inovação do LNEC (P2I), com início em 2021. A duração média de cada programa é geralmente de quatro anos.

Tal como já foi referido, a forma como os Programas de Estudos propostos se relacionam com o P2I que está a decorrer atualmente (2013-2020) é apresentada, de forma esquemática, na Figura 5.1.

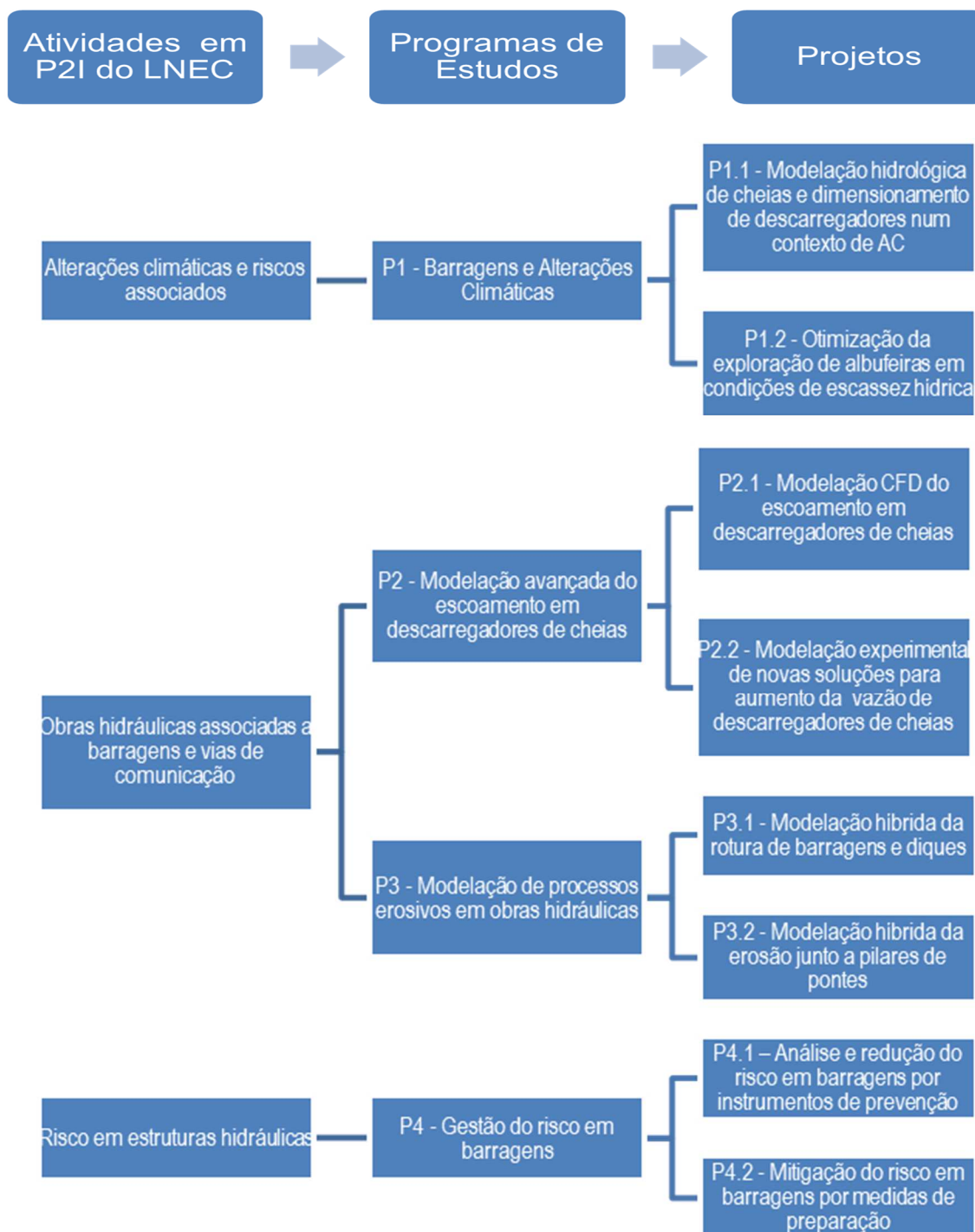


Figura 5.1 | Interligação de atividades previstas em P2I do LNEC com os Programas de Estudos e projetos propostos

O primeiro Programa de Estudos trata do sistema bacia hidrográfica e da análise do impacto das AC nos eventos de cheias e secas, ou seja, propõe-se um Programa de Estudos “*Barragens e alterações climáticas*” com contributos para a Atividade 1.1 “Alterações climáticas e riscos associados” do P2I do LNEC “Gestão do Risco e Segurança em Hidráulica e Ambiente” (cf. 1.3.3).

Os dois Programas de Estudos seguintes darão contributos para a Atividade 1.3 “Risco em estruturas hidráulicas” do P2I do LNEC “Gestão do Risco e Segurança em Hidráulica e Ambiente” e para a Atividade 2.4 “Obras hidráulicas associadas a barragens e vias de comunicação” do P2I do LNEC “Infraestruturas em Hidráulica e Ambiente”.

O segundo Programa de Estudos intitula-se “*Modelação avançada do escoamento em descarregadores de cheias*” e integra, para além da modelação CFD, a investigação em soleiras PKW.

O terceiro Programa de Estudos, intitulado “*Modelação de processos erosivos em obras hidráulicas*”, integra, para além da modelação da erosão em pilares de pontes, a modelação da rotura de aterros.

Por fim, o quarto Programa de Estudos intitula-se “*Gestão do risco em barragens*” e integra as restantes prioridades de investigação (medição de grandezas hidráulicas *in situ*, planeamento de emergência, etc.). Este último Programa de Estudos dará contributos para a Atividade 1.3 “Risco em estruturas e infraestruturas hidráulicas” do P2I do LNEC “Gestão do Risco e Segurança em Hidráulica e Ambiente”.

Em conclusão, os Programas de Estudos e Projetos propostos, identificados por um carácter alfanumérico, são os seguintes:

- P1 - As barragens e as alterações climáticas, envolvendo os seguintes projetos:
 - P1.1 – Modelação hidrológica de cheias e dimensionamento de descarregadores num contexto de AC
 - P1.2 – Adaptação às AC através da otimização da exploração de albufeiras
- P2 - Modelação avançada do escoamento em descarregadores de cheias, envolvendo os seguintes projetos:
 - P2.1 – Modelação CFD do escoamento em descarregadores de cheias
 - P2.2 – Modelação experimental de novas soluções para aumento da vazão em descarregadores de cheias
- P3 - Modelação híbrida (numérica e experimental) de processos erosivos em estruturas hidráulicas envolvendo o uso de técnicas avançadas de medição de grandezas em laboratório e de análise e visualização do escoamento e envolvendo os seguintes projetos:
 - P3.1 – Modelação híbrida da rotura de barragens e diques
 - P3.2 – Modelação híbrida da erosão junto a pilares de pontes
- P4 - Gestão do risco em barragens, envolvendo os seguintes projetos:
 - P4.1 – Análise e redução do risco em barragens por instrumentos de prevenção
 - P4.2 – Mitigação do risco em barragens por medidas de preparação

O Quadro 5.1 apresenta a lista dos Programas de Estudos e projetos propostos.

Quadro 5.1 | Principais características dos Programas de Estudos propostos

Programa de Estudos	Projetos	Âmbito do projeto	Parcerias	Atores	Entidades financiadoras
P1 Barragens e alterações climáticas	P1.1 Modelação hidrológica de cheias e dimensionamento de descarregadores num contexto de AC	I&I&D Internacional	Universidade de Berlim Hydrology Futures	APA EDP Donos de barragens	EDP FCT (bolsa) FLAD Horizonte 2020 P2I/LNEC
	P1.2 Adaptação às AC através da otimização da exploração de albufeiras	I&I&D Internacional	DHI Portugal Universidade de Berlim	APA AdP Donos de barragens	AdP FCT (bolsa) Horizonte 2020 P2I/LNEC
P2 Modelação avançada do escoamento em descarregadores de cheias	P2.1 Modelação CFD do escoamento em descarregadores de cheias	I&I&D Nacional	Universidade de Cantábria	Projetistas de barragens	FCT (projeto &bolsa) P2I/LNEC
	P2.2 Modelação experimental de novas soluções para aumento da vazão de descarregadores de cheias	I&I&D Internacional	CIC/LNEC IST	Promotores e donos de barragens	FCT (bolsa) P2I/LNEC
P3 Modelação de processos erosivos em obras hidráulicas	P3.1 Modelação híbrida (numérica e experimental) da rotura de barragens e diques	I&I&D Nacional	DG/LNEC IST	Promotores e donos de barragens	FCT (bolsa&projeto) P2I/LNEC
	P3.2 Modelação híbrida (numérica e experimental) da erosão junto a pilares de pontes	I&I&D Nacional	FEUP	Infraestruturas de Portugal	FCT (bolsa&projeto) P2I/LNEC
P4 Gestão do risco em barragens	P4.1 Análise e redução do risco em barragens por instrumentos de prevenção	I&I&D Nacional	CIC/LNEC UC	EDP	EDP FCT (bolsas) P2I/LNEC
	P4.2 Mitigação do risco em barragens por medidas de preparação	I&I&D Internacional	NE/LNEC NTI/LNEC CEDEX	APA ANPC Confederações hidrográficas espanholas	FCT (bolsas) INTERREG P2I/LNEC

O Quadro 5.1 apresenta ainda as principais características dos projetos dos Programas de Estudos em termos de:

- i) âmbito (projeto nacional, europeu ou internacional);
- ii) parceiros (principais entidades que se prevê possam colaborar no desenvolvimento dos programas);
- iii) atores (principais *stakeholders* que se prevê estarem interessados nos resultados dos programas);
- iv) entidades financiadoras (entidades que se prevê poderem vir a contribuir para o financiamento dos programas).

5.3 Estimativa de custos

A estimativa dos custos apresentada nos vários Programas de Estudos assenta num conjunto de pressupostos que a seguir se descrevem.

a) Pessoal – Custo de imputação de mão-de-obra

Os custos da atividade do pessoal do LNEC foram definidos com base nas tabelas de imputação de mão-de-obra do LNEC, descritas nas instruções nº 963, de 31 de março de 2008 (*vide* Quadro 5.2); os custos de pessoal foram afetados por um fator multiplicativo de dois, que se destina a considerar os encargos associados não contabilizados diretamente, como os custos administrativos. O tempo de afetação foi estimado em meses por categorias profissionais, sendo estas últimas as atualmente em vigor no LNEC.

Para os custos relativos à atividade dos bolsheiros, foram consideradas duas hipóteses:

- o valor das bolsas de doutoramento e de iniciação à investigação científica conferidas pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), i.e. 980 € para bolsas de doutoramento e 745 € para bolsas de mestrado, acrescidas dos descontos para a segurança social (cerca de 125 € para o Seguro Social Voluntário (SSV));
- o valor das bolsas de estudantes de doutoramento e de mestrado conferidas pelo LNEC com base no Regulamento de Bolsas LNEC de Investigação Científica (Aviso nº 3089/2004, 2ª série); atualmente estes valores são de 1620 € para bolsas de doutoramento e 1260 € para bolsas de mestrado, acrescidas de cerca de 224 € do SSV e subsídio de almoço (124,71 € para o SSV e 4,52 € /dia de subsídio de refeição; perfazendo 99,44 € para 22 dias úteis).

b) Materiais e serviços

As rubricas de deslocações no país e de missões no estrangeiro são as consideradas necessárias para a realização dos Programas de Estudos propostos. As rubricas correspondentes à aquisição de serviços e de equipamento são definidas, caso a caso, nos projetos em que se justificam.

Os custos correspondentes à aquisição de equipamento, serviços e missões foram afetados por um fator multiplicativo de 1,2, de acordo com as instruções supracitadas, para incluírem os restantes encargos associados, nomeadamente os custos administrativos.

Quadro 5.2 | Custos associados à rubrica “pessoal”

Categoria profissional	Custo unitário mensal
1. Investigador Coordenador e Principal com Habilitação do LNEC	6 500 €
2. Investigador Principal e Auxiliar do LNEC	5 700 €
3. Pessoal Técnico Superior e Técnico de Informática do LNEC	3 500 €
4. Assistente Técnico do LNEC	1 500 €
5. Bolseiro de Introdução à Investigação Científica LNEC (439 € + 224 €)	663 €
6. Bolseiro de Iniciação à investigação Científica LNEC (1260 € + 224 €)	1 484 €
7. Bolseiro de Doutoramento LNEC (1620 € + 224 €)	1 844 €
8. Bolseiro Pós-doc LNEC (2085 € + 224 €)	2309 €
9. Bolseiro de Mestrado FCT (745 € + 125 €)	870 €
10. Bolseiro de Doutoramento FCT (980 € + 125 €)	1 105 €
11. Bolseiro de Pós-Doutoramento FCT (1495 € + 125 €)	1 620 €

c) Obras/Processo Interno

Esta rubrica engloba os custos de trabalhos realizados no LNEC mas requisitados a outros departamentos e/ou núcleos, incluindo a impressão de documentos. As estimativas previstas são as consideradas necessárias para a realização dos Programas de Estudos propostos, correspondendo a quantidade ao número previsto de relatórios e teses. A edição destes produtos é diferenciada pois o custo total depende do tipo de edição e da sua tiragem.

d) Custo final

As estimativas foram feitas a preços correntes, pelo que devem ser atualizadas com a taxa de inflação que se verificar até ao início de cada Programa de Estudo. Os custos apresentados não incluem IVA.

5.4 Programa de Estudo 1 – Barragens e Alterações Climáticas

5.4.1 Considerações iniciais

O estado da arte empreendido permitiu verificar que as consequências das projeções das AC no que diz respeito às barragens se podem fazer sentir a dois níveis: i) a nível dos recursos hídricos, considerando as mudanças das disponibilidades médias; ii) a nível das necessidades, onde são previstas variações dos consumos médios. As AC não determinam apenas modificações dos valores médios do escoamento, mas também dos seus valores extremos, provocando alterações dos regimes de cheias e secas. Em particular podem ocorrer alterações da intensidade, duração e períodos de ocorrência das cheias e secas.

Assim, no que diz respeito às cheias, não são conhecidos estudos em Portugal que avaliem o impacto das projeções das AC na definição dos caudais de dimensionamento dos descarregadores. Também no que diz respeito às secas, as AC podem vir a exigir adaptações na exploração das albufeiras, nomeadamente na definição dos volumes de reserva de segurança das barragens.

O objetivo deste estudo é, assim, investigar os impactos dos mais recentes cenários de alterações climáticas sobre a ocorrência de secas e cheias ao longo do século XXI, produzindo séries climáticas e hidrométricas com elevada resolução espacial (12 por 12 km) e temporal (diária), nas principais bacias hidrográficas em Portugal, fazendo uso de modelos hidrológicos de última geração e das melhores bases de dados disponíveis. Nas bacias hidrográficas definidas pelas barragens em estudo, a resolução temporal será horária (em vez de diária), para permitir o estudo de precipitação intensa e de cheias.

Note-se que este estudo, em particular o das cheias, tem requisitos bastante mais exigentes do que o estudo dos valores médios. Com efeito, a simulação dos extremos hidrológicos é sensível aos valores extremos de precipitação e à sua duração e, ainda, à precipitação antecedente, a qual determina as condições de saturação do solo. A desagregação dos dados em valores horários deve preservar os extremos da distribuição da precipitação (a qual, como é sabido, é muito enviesada) e as suas características de duração.

O estudo das alterações nos extremos hidrológicos permitirá avaliar o impacto no dimensionamento dos descarregadores das barragens, na reserva de segurança das albufeiras e na exploração de barragens em condições de escassez.

5.4.2 Projeto 1.1 – Modelação hidrológica de cheias e dimensionamento de descarregadores de cheias num contexto de AC

5.4.2.1 Enquadramento e justificação



Each degree matters, each year matters, and each decision matters: not acting today is adding to the burden of the next generations [...]. Limiting global warming to 1.5°C is not impossible but requires strong and immediate policies.
(Valérie Masson-Delmotte, Co-Chair of Working Group I of the IPCC on 8th of October 2018 – French Senate intervention)

As barragens devem ser dimensionadas com flexibilidade para coabitar com potenciais alterações na precipitação e no escoamento nas respetivas bacias hidrográficas motivadas pelas AC. Em particular, os órgãos hidráulicos, dimensionados para eventos extremos, devem continuar a garantir condições de segurança.

Com efeito, alterações na frequência, intensidade e duração da precipitação acarretam consequências para o dimensionamento dos descarregadores das barragens, bem como para o cálculo do volume reservado para armazenamento de segurança. Se ocorrências de precipitação intensa se tornarem mais frequentes, o valor efetivo do período de retorno dos escoamentos diminui e, conseqüentemente, o tempo de vida da obra encurta.

Este projeto visa desenvolver uma metodologia para avaliação dos potenciais efeitos das AC nos eventos extremos de caudais para analisar se a vazão de descarregadores de cheias de barragens portuguesas existentes é adequada.

5.4.2.2 Objetivos

O presente projeto tem o objetivo de estimar os efeitos das AC nos valores de caudais de dimensionamento de alguns descarregadores de cheias em Portugal e permitirá identificar as estruturas que, em consequência das AC, podem ficar subdimensionadas. Esta avaliação deve ser desenvolvida com base em cenários de emissão de GEE e nas projeções de variáveis climáticas disponíveis para Portugal.

O projeto pretende, igualmente, apresentar um conjunto de medidas de adaptação que é necessário implementar no dimensionamento de órgãos de segurança de barragens e/ou na exploração de albufeiras, como, por exemplo, a necessidade de rever as regras de exploração e a definição de diferentes volumes de reserva de segurança das barragens.

Os objetivos específicos do projeto são os seguintes:

- obter séries climáticas diárias simuladas pelos modelos regionais de clima, por exemplo, do portal do clima ou dos projetos ENSEMBLES ou CORDEX nas bacias hidrográficas a montante das barragens consideradas como caso de estudo;
- gerar séries sintéticas de clima (com modelos de geração estocástica - *weather generator*) para criar séries temporais diárias de longa duração, i.e., multicentenárias; estes modelos estão atualmente disponíveis, produzindo séries temporais de variáveis climatológicas (temperatura e precipitação), sendo os parâmetros de entrada destes modelos estimados a partir de séries climáticas (observadas e projeções);
- usar o modelo Mike-River e obter valores de escoamentos máximos bem como determinar o volume e duração de episódios de cheias;
- comparar as estimativas dos caudais de cheia observados e projetados para as barragens em estudo e definir medidas de adaptação às AC.

Note-se que a severidade de uma cheia depende não só do seu pico máximo, caracterizada por uma distribuição de extremos, como também do seu volume e duração, sendo determinada pela intensidade e duração do episódio de precipitação. Com efeito, para a operação das barragens é igualmente importante conhecer a frequência de ocorrência simultânea de um elevado pico de cheia e de um grande volume de cheia, tanto para o cálculo da capacidade do descarregador, como para o cálculo do armazenamento de segurança a ser mantido na albufeira.

5.4.2.3 Metodologia proposta e planeamento de atividades

A metodologia proposta inclui o seguinte conjunto de atividades:

Atividade 1 – Revisão de conhecimentos e intercâmbio de experiências

- ⇒ Tarefa 1.1: Identificação do estado de conhecimentos sobre o efeito das AC nas precipitações intensas, em particular, em Portugal
- ⇒ Tarefa 1.2: Identificação do estado de conhecimentos sobre o efeito das AC nas cheias fluviais em Portugal
- ⇒ Tarefa 1.3: Estudo de modelos de geração estocástica para constituição de séries sintéticas do clima e ainda do modelo Mike-River para conversão das precipitações intensas em caudais de cheia
- ⇒ Tarefa 1.4: Escolha de uma bacia hidrográfica (Tejo) e identificação das barragens a estudar e das estações climatológicas e hidrométricas localizadas nas sub-bacias definidas por estas barragens (sub-bacias de estudo)

Atividade 2 – Aquisição de dados e geração de escoamentos máximos históricos

- ⇒ Tarefa 2.1: Recolha de dados topográficos, uso de solo e climatológicos para a sub-bacias em estudo e de séries de escoamento registadas nas estações hidrométricas existentes e calibração do modelo Mike-River

- ⇒ Tarefa 2.2: Análise da qualidade, aplicação de modelos de distribuição de probabilidades e análise da adequação dos modelos ensaiados às séries de registos de caudais máximos anuais
- ⇒ Tarefa 2.3: Cálculo de estimativas, designadamente dos caudais de cheia associados aos períodos de retorno de 100, 1000, 5000 e 10 000 anos

Atividade 3 – Modelação hidrológica e projeções

- ⇒ Tarefa 3.1: Recolha de séries de dados com projeções climáticas (precipitações diárias) simuladas pelos modelos regionais de clima (usando, por exemplo, a informação dos projetos ENSEMBLES ou CORDEX) e desagregação espacial e temporal
- ⇒ Tarefa 3.2: Traçado de IDF com AC e definição de fatores de correção das IDF
- ⇒ Tarefa 3.3: Análise estatística das precipitações obtidas na Tarefa 3.1 e obtenção das séries climáticas com vários séculos de duração (dão entrada no modelo de geração estocástica)
- ⇒ Tarefa 3.4: Simulação pelo modelo Mike-River das séries climáticas distribuídas espacialmente, obtidas na Tarefa 3.3, para cada sub-bacia em estudo e construção de séries com projeções de caudais máximos anuais

Atividade 4 – Comparação e medidas de adaptação

- ⇒ Tarefa 4.1: Caracterização estatística das séries hidrológicas obtidas na Tarefa 3.4, em termos de frequência, intensidade e duração dos picos de cheia
- ⇒ Tarefa 4.2: Aplicação de modelos de distribuição de probabilidades e cálculo de estimativas, designadamente dos caudais de cheia associados aos períodos de retorno de 100, 1000, 5000 e 10 000 anos
- ⇒ Tarefa 4.3: Comparação das estimativas dos caudais de cheia observados e projetados para as barragens em estudo e conclusões
- ⇒ Tarefa 4.4: Definição de medidas de adaptação às AC, nomeadamente envolvendo alteração das regras de operação para as obras existentes

Atividade 5 – Elaboração de documentos científicos

- ⇒ Tarefa 5.1: Elaboração de 2 comunicações a congressos nacionais e internacionais (◦)
- ⇒ Tarefa 5.2: Elaboração de 2 artigos para revistas (●)
- ⇒ Tarefa 5.3: Redação e entrega da tese de doutoramento (*)

O Cronograma que se apresenta no Quadro 5.3 situa temporalmente as atividades mencionadas anteriormente.

Quadro 5.3 | Cronograma do Projeto 1.1

Tarefa	1º ano				2º ano				3º ano				4º ano			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1 – Revisão de conhecimentos																
2 – Aquisição e tratamento de dados históricos																
3 – Modelação hidrológica e projeções																
4 – Comparação e medidas de adaptação																
5 – Elaboração de documentos científicos								○	●			○	●			*

5.4.2.4 Resultados esperados

Os resultados do projeto proposto podem ser subdivididos em específicos e em genéricos para o LNEC e em benefícios para a comunidade técnica e científica.

No que diz respeito aos resultados específicos para o LNEC, destacam-se:

- ⇒ Modelação climática de eventos extremos à escala regional: promover a capacidade científica e técnica que permita o desenvolvimento de curvas IDF para Portugal com incorporação das AC
- ⇒ Modelação climática e hidrológica à escala local: promover e desenvolver a capacidade científica e técnica que permita uma generalização espacial da informação climática mais consentânea com a escala, as especificidades e os requisitos das bacias hidrográficas portuguesas
- ⇒ Aquisição de *know-how* no uso de ferramentas de simulação do processo de precipitação-escoamento; modelos de desagregação temporal e de geração estocástica
- ⇒ Melhoria da estimativa dos caudais de cheias de dimensionamento de descarregadores de cheias em Portugal
- ⇒ Estudo de casos que satisfaçam o requisito de representar o regime hidrológico de bacias hidrográficas portuguesas de rios internacionais
- ⇒ Proposta de um coeficiente de segurança para o dimensionamento de sistemas resistentes às AC
- ⇒ Proposta de metodologia para definição da política de exploração de albufeiras tendo em consideração o risco de cheias em cenários de AC

No que diz respeito aos resultados genéricos para o LNEC, são de salientar:

- ⇒ Atualização do “Estado da arte”
- ⇒ Aquisição de *know-how* com interesse prático e aplicabilidade no contexto nacional e internacional
- ⇒ Aquisição de elementos para divulgação e formação
- ⇒ Estabelecimento e/ou promoção de:
 - uma plataforma de trabalhos de investigação científica (mestrado e doutoramento)
 - contactos internacionais e intercâmbio
 - um ponto focal de desenvolvimentos posteriores

No que diz respeito aos resultados específicos para a comunidade técnica nacional, o contributo deste trabalho vai no sentido de permitir a:

- ⇒ Formação de quadros técnicos
- ⇒ Consolidação do LNEC como referência institucional relativa a investigação no domínio das AC, mormente na avaliação quer dos seus potenciais impactos nos valores extremos (cheias) quer nas estruturas hidráulicas, nomeadamente no seu dimensionamento, exploração e riscos associados

5.4.2.5 Recursos necessários

Os recursos humanos previstos para o desenvolvimento deste projeto constam do Quadro 5.4 e são os seguintes:

- 6 meses de Investigador Auxiliar (IA) ou de Investigador Principal (IP)
- 6 meses de Técnico Superior
- 48 meses de Bolseiro de Doutoramento com financiamento da FCT

Este último deverá candidatar-se a uma Bolsa de Formação Avançada da FCT (<https://www.fct.pt/apoios/bolsas/concursos/>).

Os custos atribuídos à rubrica “Obra” referem-se à edição da tese de doutoramento (Base: 30 exemplares; 300 páginas). Os custos atribuídos à rubrica “Materiais e serviços” incluem a compra de um computador portátil e de dados de projeções do clima e de quatro missões.

Quadro 5.4 | Estimativa dos recursos financeiros associados ao Projeto 1.1

Rúbrica	Designação	Tempo Quantidade	Valor unitário	Total €
A	Materiais e serviços			
	Missões	4	2000	8000
	Equipamento (computador)	1	2000	2000
	Dados e projeções de clima			20000
	Total			30000
B	Pessoal			
	IA/IP	6	5700	34200
	Técnico Superior	6	3500	21000
	Total			55200
C	Obra			
	Edições		2000	2000
	Total			2000
D	Bolseiro de Doutoramento da FCT	48	1105	53040
	Arredondamento			+60
	Total (1,2A+2B+C)+D			201 500

5.4.2.6 Potenciais parcerias e financiamento

Para o desenvolvimento deste projeto no LNEC é recomendável o estabelecimento de parcerias com a APA, entidade com responsabilidade institucional na segurança das grandes barragens portuguesas (Autoridade de Segurança). Será igualmente necessário estabelecer uma parceria técnico-financeira com uma entidade potencialmente interessada nos resultados do projeto e que venha a fornecer casos de estudo, por exemplo a EDP. Procurar-se-á financiamento junto da FCT (bolsa de doutoramento e 2-3 missões de estudo). Este projeto será igualmente desenvolvido em parceria com a DHI Portugal, que tem um protocolo de cooperação com o LNEC, visando a utilização do *software* Mike-River.

A nível internacional, considera-se vantajoso que este projeto seja desenvolvido em parceria com a empresa *Hydrology Futures* dos EUA, com a qual o NRE tem submetido candidaturas a financiamento de projetos na área das AC, pelo que se procurará também financiamento junto da Fundação Luso Americana para o Desenvolvimento (FLAD). Finalmente, considera-se vantajoso que este estudo seja desenvolvido em parceria com entidades que fornecem projeções de dados climáticos em cenários de AC para a Europa, como, por exemplo, a Universidade de Berlim. Procurar-se-á financiamento junto do Programa 2020 da EU.

5.4.3 Projeto 1.2 – Adaptação às AC através da otimização da exploração de albufeiras

5.4.3.1 Enquadramento e justificação



A água é um bem essencial à vida e à sociedade; a água, no planeta Terra, é limitada e face aos usos, é escassa e, portanto, é um bem económico; é necessária a gestão das águas da natureza que contemple a proteção das fontes naturais, a conservação quantitativa e qualitativa da água e o seu uso racional e justamente distribuído.
(Grassi, 2004)

As barragens são um meio para armazenar e assegurar o fornecimento de água e constituem uma solução eficaz para ultrapassar a seca e situações de escassez de água. Os efeitos das mudanças climáticas podem afetar todo o ciclo da água; o aumento da evaporação, por exemplo, tornará as condições de seca mais prevaletentes. Assim, uma medida de adaptação às AC muito comum consiste em promover o aumento significativo da eficiência das albufeiras existentes, uma vez que uma melhor estratégia de gestão da água constitui uma medida alternativa de poupança de água e de redução de perdas, através do uso de tecnologias e práticas de boa eficiência hídrica. A mitigação do risco de seca pela otimização da exploração de albufeiras contribui para a gestão integrada dos recursos hídricos superficiais, podendo, igualmente, ser considerada como uma medida de adaptação à AC.

A Convenção sobre a Cooperação para a Proteção e o Aproveitamento Sustentável das águas das Bacias Hidrográficas Luso-Espanholas, habitualmente denominada por Convenção de Albufeira, assinada em 1998, define os caudais mínimos a garantir por Espanha na fronteira dos rios internacionais. Em caso de aprovação de declaração de seca, as partes não são obrigadas a cumprir com estes requisitos. Em 2018, por exemplo, a Confederação Hidrográfica do Tejo propôs ao Governo de Madrid para que fosse aprovada a declaração de seca. Uma medida de mitigação consistiu em usar os recursos hídricos e descargas de barragens existentes em território Português para compensar o decréscimo de escoamento vindo de Espanha.

Este projeto visa a avaliação do impacto das AC nas secas nas principais bacias hidrográficas de Portugal e o desenvolvimento de uma ferramenta de apoio à gestão da exploração de albufeiras em situação de escassez de água.

5.4.3.2 Objetivos

O projeto tem os seguintes objetivos:

- analisar, nas bacias internacionais, os escoamentos mínimos num contexto de AC, tendo em vista outros usos de água e os regimes de exploração dos aproveitamentos em Espanha; esta análise permitirá retirar recomendações sobre eventuais alterações das

regras de exploração dos aproveitamentos portugueses existentes por forma a mitigar os riscos de seca;

- desenvolver um modelo de otimização para a operação de albufeiras em situação de escassez hídrica, de forma a minimizar o conflito entre diferentes usos da água (abastecimento, rega e produção de energia), com o intuito de melhorar o apoio à decisão, aumentando a garantia do fornecimento e minimizando o risco da ocorrência de falhas;
- escolher estudos de casos que satisfaçam o requisito de representar o regime hidrológico de bacias hidrográficas definidas por barragens localizadas em regiões com risco de desertificação ou em risco de escassez hídrica; nestas regiões, a ocorrência de secas, as perdas significativas de água por evaporação e a imprevisibilidade da precipitação obrigam à adoção de regras para otimizar os usos da água.

Para além do desenvolvimento de um modelo de otimização para a operação de albufeiras, pretende-se usar o modelo de Mike-Basin (precipitação-escoamento) para avaliar o impacto de futuras mudanças climáticas nas secas nas bacias hidrográficas das principais bacias hidrográficas portuguesas. Trata-se de um modelo hidrológico detalhado que representa o balanço hidrológico entre o solo e a atmosfera e que permite simular o escoamento afluente em diversas secções de cálculo. Assim, o modelo Mike-Basin será calibrado e forçado com projeções de precipitação para simular o escoamento para o futuro próximo (2016 – 2035), médio (2046 – 2065) e final (2080-2099) do século XXI (séries temporais mensais diárias ou horárias de caudais fluviais).

As projeções climáticas serão extraídas do Portal do clima para três cenários (RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5). Serão usados dados observados de precipitação diária, temperatura e caudais bem como evapotranspiração potencial média mensal das estações climatológicas em períodos históricos para calibrar e validar o modelo Mike-Basin.

5.4.3.3 Metodologia proposta e planeamento das atividades

A metodologia proposta inclui o seguinte conjunto de atividades:

Atividade 1 – Revisão de *conhecimentos e intercâmbio de experiências*

- ⇒ Tarefa 1.1: Identificação do estado de conhecimentos em modelos de otimização da exploração de albufeiras de fins múltiplos
- ⇒ Tarefa 1.2: Identificação do estado de conhecimentos no domínio das secas, em particular, em Portugal e em regiões semiáridas dos CPLP
- ⇒ Tarefa 1.3: Estudo do modelo Mike-Basin

Atividade 2 – *Recolha e tratamento de dados*

- ⇒ Tarefa 2.1: Seleção de casos pilotos que satisfaçam o requisito de representar o regime hidrológico de bacias hidrográficas definidas por barragens em regiões com suscetibilidade à desertificação (em Portugal ou em Cabo Verde)

- ⇒ Tarefa 2.2: Identificação das barragens localizadas nas bacias hidrográficas selecionadas (uma barragem portuguesa e outra Cabo-Verdiana, por exemplo) com vista à aplicação do modelo de otimização
- ⇒ Tarefa 2.4: Caracterização das bacias hidrográficas selecionadas e recolha de dados topográficos e do uso do solo e coberto vegetal
- ⇒ Tarefa 2.3: Escolha de bacias internacionais para análise dos escoamentos mínimos num contexto de AC (Douro, Tejo e/ou Guadiana) e recolha de dados topográficos e uso de solo bem como de dados históricos de clima e escoamentos
- ⇒ Tarefa 2.4: Projeções climáticas em cenários de AC e desagregação espacial e temporal para as bacias internacionais em estudo

Atividade 3 – Desenvolvimento do modelo de otimização

- ⇒ Tarefa 3.1: Estabelecimento de critérios para definição de *triggers* para a implementação de medidas de mitigação do impacto das secas, tendo em conta os cenários de afluências e de estado de armazenamento de água na albufeira
- ⇒ Tarefa 3.2: Definição de regras para restringir os usos ou definir a melhor política de transferência de água entre usos concorrentes (rega *versus* abastecimento público), assegurando a minimização dos prejuízos decorrentes da escassez de água
- ⇒ Tarefa 3.3: Definição da função objetivo em função dos parâmetros cujos valores ótimos se pretendem determinar e com as restrições que definem o espaço de procura dos valores desses parâmetros e que podem obedecer aos seguintes requisitos principais: i) minimização das perdas por evaporação ii) minimização dos custos económicos do não abastecimento devido ao racionamento de água
- ⇒ Tarefa 3.4: Desenvolvimento do modelo de otimização para a operação de albufeiras em situação de escassez hídrica usando ferramentas numéricas disponíveis (programação linear ou dinâmica linear ou métodos heurísticos)

Atividade 4 – Implementação e teste dos modelos

- ⇒ Tarefa 4.1: Calibração e *Forcing* do modelo Mike-Basin para conversão das mudanças nas precipitações em alterações nos escoamentos médios, máximos e mínimos e a geração de projeções para escoamentos (séries mensais e diárias) em cenários de AC nas bacias internacionais selecionadas
- ⇒ Tarefa 4.2: Uso do modelo de otimização e realização de simulações para diferentes cenários de escassez de água nas bacias definidas pelas barragens selecionadas

⇒ Tarefa 4.3: Desenvolvimento e proposta de procedimentos de mitigação do risco de secas em regiões semiáridas de aplicação sistemática que se possam implementar em regiões com problemáticas análogas

⇒ Tarefa 4.4: Desenvolvimento e proposta de procedimentos de mitigação do risco de ocorrência de caudais mínimos à entrada de rios internacionais de aplicação sistemática e que se possam implementar em Portugal

Atividade 5 – Elaboração de documentos científicos

⇒ Tarefa 5.1: Elaboração de 3 comunicações a congressos nacionais e internacionais (◦)

⇒ Tarefa 5.2: Elaboração de 3 artigos para revistas (•)

⇒ Tarefa 5.3: Redação e entrega da tese de doutoramento (*)

O Cronograma que se apresenta no Quadro 5.5 situa temporalmente as atividades mencionadas anteriormente.

Quadro 5.5 | Cronograma do Projeto 1.2

Tarefa	1º ano				2º ano				3º ano				4º ano			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1 – Revisão de conhecimentos																
2 – Recolha e tratamento de dados																
3 – Desenvolvimento do modelo de otimização																
4 – Implementação e teste dos modelos																
5 – Elaboração de documentos científicos				•		◦										

5.4.3.4 Resultados esperados

Os resultados do projeto proposto podem ser subdivididos em específicos e em genéricos para o LNEC e em benefícios para a comunidade técnica e científica.

No que diz respeito aos resultados específicos para o LNEC, destacam-se:

⇒ Modelação meteorológica de eventos extremos à escala regional: promover a capacidade científica e técnica que permita o a caracterização de secas em bacia portuguesas com incorporação das AC

- ⇒ Modelo numérico de otimização para a exploração de albufeiras de fins múltiplos em períodos de seca, com o intuito de melhorar o apoio à decisão, aumentando a garantia do fornecimento e minimizando o risco da ocorrência de falhas
- ⇒ Proposta de uma metodologia concreta para definição da política de exploração de albufeiras em situação de escassez hídrica
- ⇒ Estudo de casos que satisfaçam o requisito de representar o regime hidrológico de bacias hidrográficas definidas por barragens em regiões de alta suscetibilidade à desertificação do território por fatores físicos, permitindo validar o modelo numérico

No que diz respeito aos resultados genéricos para o LNEC, são de salientar:

- ⇒ Atualização do “Estado da arte”
- ⇒ Aquisição de *know-how* com interesse prático e aplicabilidade no contexto nacional e internacional
- ⇒ Aquisição de elementos para divulgação e formação
- ⇒ Estabelecimento e/ou promoção de:
 - uma plataforma de trabalhos de investigação científica (mestrado e doutoramento)
 - contactos internacionais e intercâmbio
 - um ponto focal de desenvolvimentos posteriores

No que diz respeito aos resultados específicos para a comunidade técnica nacional, o contributo deste trabalho vai no sentido de permitir a:

- ⇒ Formação de quadros técnicos
- ⇒ Consolidação do LNEC como referência institucional relativa a investigação no domínio das AC, mormente na avaliação quer dos seus potenciais impactos nos valores extremos (secas) quer nas estruturas hidráulicas, nomeadamente no seu dimensionamento, exploração e riscos associados

5.4.3.5 Recursos necessários

Os recursos humanos previstos para o desenvolvimento deste projeto constam do Quadro 5.6 e são os seguintes:

- 6 meses de Investigador Auxiliar (IA) ou de Investigador Principal (IP)
- 6 meses de Técnico Superior
- 48 meses de Bolseiro de Doutoramento com financiamento da FCT

Este último deverá candidatar-se a uma Bolsa de Formação Avançada da FCT (<https://www.fct.pt/apoios/bolsas/concursos/>).

Os custos atribuídos à rubrica “Obra” referem-se à edição da tese de doutoramento (Base: 30 exemplares; 300 páginas).

Os custos atribuídos à rubrica “Materiais e serviços” incluem a compra de um computador portátil, de dados de projeções do clima e de quatro missões.

Quadro 5.6 | Estimativa dos recursos financeiros associados ao Projeto 1.2

Rúbrica	Designação	Tempo Quantidade	Valor unitário	Total €
A	Materiais e serviços			
	Missões	4	2000	8000
	Equipamento (computador)	1	2000	2000
	Dados e projeções de clima			20000
	Total			30000
B	Pessoal			
	IA/IP	6	5700	34200
	Técnico Superior	6	3500	21000
	Total			55200
C	Obra			
	Edições		2000	2000
	Total			2000
D	Bolseiro de Doutoramento da FCT	48	1105	53040
	Arredondamento			+60
	Total (1,2A+2B+C)+D			201 500

5.4.3.6 Potenciais parcerias e financiamento

Para o desenvolvimento deste projeto no LNEC é recomendável o estabelecimento de parcerias com a APA. Será igualmente necessário estabelecer uma parceria técnico-financeira com uma entidade potencialmente interessada nos resultados do projeto e que venha a fornecer casos de estudo, por exemplo a Águas de Portugal (AdP). Este projeto será igualmente desenvolvido em parceria com a DHI Portugal, que tem um protocolo de cooperação com o LNEC, visando a utilização do software Mike-Basin. Procurar-se-á financiamento junto da FCT (bolsa de doutoramento e 2-3 missões de estudo).

A nível internacional, considera-se vantajoso que este projeto seja desenvolvido em parceria com entidades que fornecem projeções de dados climáticos em cenários de AC para a Europa, por exemplo a Universidade de Berlim. Procurar-se-á financiamento junto do Programa 2020 da EU.

5.5 Programa de Estudo 2 - Modelação avançada do escoamento em descarregadores de cheias

5.5.1 Considerações gerais

Os escoamentos em estruturas hidráulicas associadas às grandes e médias barragens, como por exemplo em descarregadores de cheias, são altamente turbulentos e, por vezes, caracterizados por um intenso emulsionamento de ar. Nos descarregadores de cheias, em particular, a intensidade da turbulência e o complexo campo de velocidades são frequentemente impostos pela complexidade da geometria de canais e túneis bem como das estruturas de dissipação de energia.

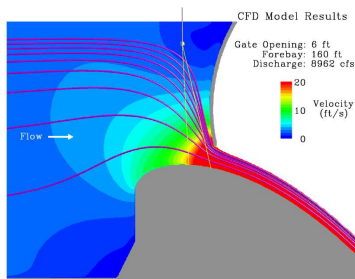
O estudo do comportamento de estruturas hidráulicas tem constado de todos os Programas de Investigação Programada (PIP) do LNEC, pretendendo-se, assim, em primeiro lugar, com o presente Programa de Estudos dar continuidade à investigação no NRE neste âmbito, mas fazendo uso dos novos avanços em ciência e tecnologia. De uma forma geral, há duas abordagens possíveis para empreender este estudo: modelação física e numérica. Este segundo Programa de Estudo propõe-se caracterizar o escoamento complexo em estruturas hidráulicas, usando estas duas abordagens distintas, mas complementares, para o mesmo sistema: os descarregadores de cheias.

A primeira é uma abordagem baseada na modelação numérica CFD do escoamento em descarregadores de cheias. Tirará partido dos recentes avanços na área, visa a implementação no NRE deste tipo de ferramenta e permitirá ultrapassar uma lacuna existente na modelação numérica de escoamentos em estruturas hidráulicas.

A segunda é uma abordagem de modelação experimental que permitirá o aprofundamento do conhecimento sobre descarregadores em degraus e novas soleiras para aumento da capacidade de vazão. No domínio da abordagem experimental propõe-se ainda a validação da modelação numérica e simultaneamente o estudo de novas tecnologias para medição de variáveis em escoamentos altamente arejados nomeadamente pela avaliação do desempenho de uma nova sonda para medição da concentração do ar.

5.5.2 Projeto 2.1 - Modelação CFD do escoamento em descarregadores de cheias

5.5.2.1 Enquadramento e justificação



As teses de investigação do LNEC na área da hidráulica. Um Património que Preparou o Futuro.

(Comemorações dos 60 anos do DHA, 2009)

No NRE, o estudo do escoamento em estruturas hidráulicas tem sido feito, e tal como já foi referido em 3.2, com base em modelos físicos, apesar de os recentes avanços das capacidades dos modelos computacionais e da tecnologia de *hardware* das últimas décadas abrirem novas oportunidades para a investigação numérica deste tipo de escoamentos. Quando se recorre à modelação numérica eliminam-se a morosidade da construção do modelo, os problemas técnicos dos ensaios em laboratório, os problemas de semelhança dinâmica dos escoamentos em escalas reduzidas e os maiores custos associados aos estudos experimentais. No entanto, os modelos físicos continuam a ter lugar, nomeadamente pelo facto da validação dos resultados numéricos ter de ser feita com as características observadas via experimental. Na modelação física, verifica-se, igualmente, que as técnicas de medição das grandezas hidráulicas têm evoluído significativamente ao longo dos anos, sendo uma oportunidade de atualização tecnológica no NRE.

Este projeto visa a modelação numérica de escoamentos sobre descarregadores e no uso de novas técnicas de medição em modelos físicos de estruturas hidráulicas. A justificação deste projeto relaciona-se com o desiderato de implementar no NRE a modelação numérica do escoamento em estruturas hidráulicas e de ganhar aptidões no uso quotidiano de tecnologia avançada na aquisição e tratamento de grandezas que caracterizam o escoamento nas instalações experimentais, nos modelos físicos e em protótipo.

Em particular, a modelação numérica de escoamentos centra-se na caracterização da turbulência e da modelação do escoamento bifásico ar-água. A validação das subrotinas numéricas desenvolvidas terá essencialmente por base os descarregadores em canal, dos quais existe muita informação no NRE recolhida com base em modelos físicos que será utilizada para calibração.

Está prevista igualmente a validação das subrotinas numéricas desenvolvidas com uso de dados provenientes da medição em protótipo de pressões e de resultados experimentais de ensaios a realizar na instalação para estudo de descarregadores em degraus usando novas técnicas de medição em modelos físicos de estruturas hidráulicas, em particular da concentração do ar.

5.5.2.2 *Objetivos*

Pretende-se usar e melhorar o modelo de *software* livre IHFoam para aplicações no âmbito das estruturas hidráulicas, i.e., para modelação das características de escoamentos turbulentos e altamente arejados sobre geometrias complexas. O estudo incidirá no seguinte tipo de estruturas hidráulicas:

- descarregadores em canais, incluindo formas de entrada, soleira descarregadora, canal e estrutura de dissipação de energia;
- descarregadores em degraus e soleiras descarregadoras PKW;
- bacia de impacto do descarregador da barragem de Foz Tua.

As subrotinas numéricas a desenvolver terão a capacidade de detetar a interface ar-água, ou seja, permitirão a modelação de escoamentos bifásicos (modelos de entrada e transporte/arrastamento de ar (*air-entrainment*)) e ainda a potencialidade de caracterizar a distribuição de velocidades e de pressões ao longo dos descarregadores, bem como as respetivas características da vazão.

O *software* IHFoam será ainda cuidadosamente analisado, nomeadamente no que diz respeito:

- às técnicas disponíveis de captura de superfície livre, avaliando qual dos métodos VOF permite conciliar estabilidade numérica, conforme a ordem de precisão dos esquemas numéricos e a metodologia de difusão numérica utilizados;
- aos modelos de turbulência existentes, por forma a melhorar a caracterização da turbulência na região não-arejada do escoamento e em particular a simulação do escoamento usando LES para permitir “insights” na estrutura do escoamento.

Os resultados da modelação numérica serão comparados com medições *in situ* e provenientes de modelos físicos ou de instalações experimentais por forma a estimar a respetiva incerteza. Assim, a modelação a realizar, experimental e em modelo físico, bem como a aquisição de dados em protótipo visa alargar o âmbito de aplicação da investigação já realizada no LNEC e em particular:

- aprofundar o conhecimento dos fenómenos;
- utilizar modelos físicos e instalações existentes para calibração do modelo IHFoam;
- atualizar a instrumentação, melhorando no NRE as técnicas de aquisição de dados e em particular na medição da concentração do ar.

5.5.2.3 *Metodologia proposta e planeamento das atividades*

A metodologia proposta inclui o seguinte conjunto de atividades:

Atividade 1 – Revisão de conhecimentos e intercâmbio de experiências

- ⇒ Tarefa 1.1: Identificação do estado de conhecimentos nos domínios dos modelos para geração de malhas
- ⇒ Tarefa 1.2: Identificação do estado de conhecimentos nos domínios dos modelos de turbulência

⇒ Tarefa 1.3: Identificação do estado de conhecimentos nos domínios dos modelos de escoamentos bifásicos: arejamento

Atividade 2 – Melhoria do modelo CFD IHFoam

⇒ Tarefa 2.1: Desenvolvimento de subrotinas para pré e pós processamento de dados para a modelação do escoamento em descarregadores

- Escolha do *software* para construção da geometria do descarregador e geração da malha
- Escolha do programa para pós-processamento e visualização de resultados
- Desenvolvimento de subrotinas para as fases de pré e pós processamento

⇒ Tarefa 2.2: Desenvolvimento de subrotinas que descrevam o escoamento em descarregadores de cheias

- Estudo de modelos de turbulência e aprofundamento do conhecimento na sua modelação por abordagens do tipo LES
- Desenvolvimento de subrotinas para incorporação de modelos de entrada e transporte/arrastamento de ar (*air-entrainment*)

Atividade 3 – Modelação física e tratamento de dados experimentais e in situ

⇒ Tarefa 3.1: Levantamento de dados nos modelos físicos em canal: perfil da superfície livre, velocidades e campo de pressões

⇒ Tarefa 3.2: Tratamento dos dados de ensaios na instalação para estudo de descarregadores em degraus, em particular as resultantes de medições das concentrações de ar (*vide* 5.5.3)

⇒ Tarefa 3.3: Tratamento dos dados adquiridos no modelo físico e *in situ* (em protótipo) na bacia de impacto do descarregador de Foz Tua, nomeadamente campo de velocidades e análise espectral das flutuações de pressões (*vide* 5.7.2)

Atividade 4 – Modelação CFD e calibração e validação do modelo

⇒ Tarefa 4.1: Modelação do escoamento em descarregadores em canal e validação do modelo numérico:

- Com resultados dos modelos físicos, no que respeita a análises quantitativas e qualitativas dos perfis de alturas de água e pressões bem como dos campos de velocidades

⇒ Tarefa 4.2: Modelação do escoamento no descarregador da barragem de Foz Tua e validação do modelo numérico:

- Com medições em modelo físico de alturas de água, velocidades bem como de pressões e flutuações de pressão

- Com medições *in situ* de pressões e flutuações de pressão

⇒ Tarefa 4.3: Modelação do escoamento na instalação para estudo de descarregadores em degraus e validação do modelo numérico:

- Com medições na instalação existente de alturas de água, velocidades, pressões e concentrações de ar

Atividade 5 – Elaboração de documentos científicos

⇒ Tarefa 5.1: Elaboração de 4 comunicações a congressos nacionais e internacionais (○)

⇒ Tarefa 5.2: Elaboração de 4 artigos para revistas (●)

⇒ Tarefa 5.3: Redação e entrega da tese de doutoramento (*)

O Cronograma que se apresenta no Quadro 5.7 situa temporalmente as atividades mencionadas anteriormente.

Quadro 5.7 | Cronograma do Projeto 2.1

Tarefa	1º ano				2º ano				3º ano				4º ano			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1 – Revisão de conhecimentos																
2 – Melhoria do modelo CFD IHFoam																
3 – Modelação física e tratamento de dados experimentais e <i>in situ</i>																
4 – Modelação CFD e validação do modelo																
5 – Elaboração de documentos científicos	○	●			●	*		○		○		●		○		●

5.5.2.4 Resultados esperados

Os resultados do projeto proposto podem ser subdivididos em específicos e em genéricos para o LNEC e em benefícios para a comunidade técnica e científica.

No que diz respeito aos resultados específicos para o LNEC, destacam-se:

- ⇒ Desenvolvimento e aplicação dos conhecimentos
- ⇒ Desenvolvimento de modelos numéricos do escoamento em descarregadores de cheias, com a vantagem adicional de permitir estudar situações mais difíceis de reproduzir em modelos físicos devido ao elevado custo e consumo de tempo

- ⇒ Subrotinas numéricas com capacidade de: i) detetar a interface ar-água; ii) modelar escoamentos bifásicos (modelos de entrada e transporte/arrastamento de ar (*air-entrainment*)); iii) caracterizar a distribuição de velocidades e de pressões ao longo de descarregadores, bem como as respetivas características da vazão
- ⇒ Base de dados para calibração de modelos numéricos com informação de medições de grandezas em modelos físicos, em instalações experimentais e *in situ*

No que diz respeito aos resultados genéricos para o LNEC, são de salientar:

- ⇒ Atualização do “Estado da arte”
- ⇒ Aquisição de *know-how* com interesse prático e aplicabilidade no contexto nacional e internacional
- ⇒ Aquisição de elementos para divulgação e formação
- ⇒ Estabelecimento e/ou promoção de:
 - uma plataforma de trabalhos de investigação científica (mestrado e doutoramento)
 - contactos internacionais e intercâmbio
 - um ponto focal de desenvolvimentos posteriores

No que diz respeito aos resultados específicos para a comunidade técnica nacional, o contributo deste trabalho vai no sentido de permitir a:

- ⇒ Formação de quadros técnicos
- ⇒ Consolidação do LNEC como referência institucional relativa a estruturas hidráulicas associadas a barragens

5.5.2.5 Recursos necessários

Os recursos humanos previstos para o desenvolvimento deste projeto constam do Quadro 5.8 e são os seguintes:

- 4 meses de Investigador Auxiliar (IA) ou de Investigador Principal (IP)
- 2 meses de Técnico Superior
- 6 meses de Assistente Técnico
- 12 meses de Bolseiro de Doutoramento LNEC
- 36 meses de Bolseiro de Pós-doutoramento FCT

O bolseiro a trabalhar neste projeto tem uma Bolsa de doutoramento do LNEC (<http://www.lnec.pt/pt/recrutamento-2/procedimentos-concursais/>) e ainda financiamento do programa de Bolsas de Formação Avançada da FCT. O bolseiro pós-doc procurará financiamento externo (<https://www.fct.pt/apoios/bolsas/concursos/>).

Os custos atribuídos à rubrica “Obra” referem-se à edição de uma tese de doutoramento (Base: 30 exemplares; 300 páginas).

Os custos atribuídos à rubrica “Materiais e serviços” incluem a compra de uma sonda para medição da concentração do ar, cinco discos externos para *backup* de resultados das simulações numéricas e uma missão anual.

Quadro 5.8 | Estimativa dos recursos financeiros associados ao Projeto 2.1

Rúbrica	Designação	Tempo Quantidade	Valor unitário	Total €
A	Materiais e serviços			
	Missões	4	2000	8000
	Equipamento (sonda de ar)	1	10000	10000
	Equipamento (sonda de ar e backups)	5	100	500
	Total			18500
B	Pessoal			
	IA/IP	4	5700	22800
	Técnico Superior	2	3500	7000
	Assistente Técnico	6	1500	9000
	Bolseiro de Doutoramento LNEC	12	1844	22128
	Total			60928
C	Obra			
	Edições		2000	2000
	Total			2000
D	Bolseiro de Doutoramento FCT	12	1105	13260
	Bolseiro Pós-Doc FCT	36	1620	58320
	Arredondamento			-136
	Total (1,2A+2B+C)+D			217 500

5.5.2.6 Potenciais parcerias e financiamentos

Este projeto deverá ser desenvolvido em parceria com uma universidade, com a orientação conjunta de uma tese de doutoramento. Neste âmbito é recomendável a continuação da parceria existente com a Universidade de Cantábria, que tem vindo a desenvolver o *software* CFD IHFoam. Procurar-se-á financiamento junto da FCT (bolsa de doutoramento e 2/3 missões de estudo) e através da submissão de um projeto na temática.

5.5.3 Projeto 2.2 – Modelação experimental de novas soluções para aumento da vazão em descarregadores de cheias

5.5.3.1 Enquadramento e justificação



Re-operation of existing dams: changing the way an existing dam is used is typically cheaper and less environmentally harmful than building a new dam, and in some cases, re-operating a dam can provide water during critical times of year without major environmental, energy-production or flood protection drawbacks.

(<http://12.000.scripts.mit.edu/mission2017/dams-and-reservoirs/>, consultado em março de 2018)

As soleiras do tipo PKW constituem casos particulares das soleiras em labirinto. Tal como nestas últimas, a forma retangular em planta permite ampliar o comprimento da crista para uma dada largura da soleira, aumentando a capacidade de vazão. Sendo uma soleira em labirinto, a soleira PKW é também uma potencial solução para projetos de barragens que necessitem de uma elevada capacidade de descarga com pequena carga associada e permite aumentar a capacidade de armazenamento das respetivas albufeiras. A soleira PKW pode ser colocada diretamente na crista de uma barragem, o que a torna numa solução muito atrativa para a reabilitação das mesmas. Com efeito, as projeções para montante e/ou para jusante características destas soleiras, limita a área de contacto com a estrutura existente (*footprint*), no caso de serem utilizadas como solução de reforço da capacidade de descarga em barragens existentes.

Por outro lado, as soleiras PKW emulsionam maiores concentrações de ar do que as soleiras do tipo WES pelo que se afigura que o regime uniforme seja atingido numa fase mais inicial no canal a jusante, o que poderá influenciar as dimensões e as características das obras de dissipação de energia.

No LNEC têm sido conduzidas, nos últimos anos, várias teses de doutoramento e dissertações de mestrado numa instalação experimental existente (a instalação para estudo de descarregadores em degraus), construída em 1998. Inicialmente a soleira descarregadora era do tipo WES, tendo sido recentemente conduzidos estudos para uma soleira PKW do tipo A. Os ensaios foram conduzidos usando um tubo de Pitot modificado para mediação da concentração do ar. Este projeto adota uma abordagem essencialmente experimental que será conduzida nesta última instalação e visa estudar soleiras PKW. Para além do estudo da capacidade de vazão, pretende-se igualmente analisar os aspetos da dissipação de energia em descarregadores em degraus (e de paramento liso) dotados de soleiras PKW.

Finalmente, a instalação para estudo de descarregadores em degraus permite adicionalmente testar de uma forma eficaz novos sensores e tecnologias de medição de grandezas hidráulicas para investigação aplicada em laboratório. Com efeito, por um lado, a caracterização experimental do escoamento neste tipo de estrutura hidráulica apresenta desafios porque é altamente arejado (i.e.,

um fenómeno que obriga à necessidade de medir concentrações do ar) e apresenta grandes oscilações, devido à presença dos degraus (i.e, dificulta a medição da profundidade do escoamento). Por outro lado, as paredes de vidro transparente do canal são particularmente atrativas para observação e monitorização do escoamento de forma não intrusiva permitindo, por exemplo, a caracterização da evolução temporal da profundidade do escoamento através de imagens obtidas de registos com câmara digitais.

5.5.3.2 *Objetivos*

O presente projeto tem por objetivo principal aprofundar o conhecimento sobre soleiras descarregadoras do tipo teclado de piano (PKW) a montante de descarregadores em degraus, em particular de soleiras do tipo B, C e D, comparando as respetivas capacidades de vazão. O projeto tem ainda os seguintes objetivos:

- estudar a dissipação de energia em descarregadores em degraus;
- realizar avanços na medição experimental de grandezas, compreendendo os seguintes aspetos: i) fazer uma prospeção de mercado e escolher uma sonda de medição de concentração de ar que permita, tal como foi referido em 3.4.4, ultrapassar a dependência do NRE do uso do tubo de pitot existente; ii) efetuar a medição das alturas do escoamento usando técnicas de processamento de imagem por recurso ao registo de câmaras digitais de vídeo de alta definição.

A existência da instalação para estudo de descarregadores em degraus permite ainda aprofundar o conhecimento do escoamento neste tipo de descarregadores, e, em particular, estudar a diferença de dissipação de energia entre estes e os de paramento liso.

Finalmente, a modelação experimental visa igualmente dotar o NRE de melhorias nas técnicas de aquisição de dados e em particular na medição da concentração do ar e das alturas de água baseada em técnicas de processamento de imagem por recurso ao registo de câmaras digitais de vídeo de alta definição.

Para cumprir aqueles objetivos, recorrer-se-á a ensaios experimentais em laboratório, onde se estudará:

- evolução da concentração média de ar ao longo do descarregador;
- evolução de alturas representativas do escoamento;
- os perfis de velocidades e de concentração de ar ao longo do descarregador.

Para o novo sensor de medição da concentração do ar, tem-se, no presente projeto, o objetivo de desenvolver um plano de calibração com quantificação dos erros e das incertezas de medição, por forma a que o NRE possa comparar diferentes sensores existentes no mercado.

5.5.3.3 Metodologia proposta e planeamento das atividades

A metodologia proposta inclui o seguinte conjunto de atividades:

Atividade 1 – Revisão de conhecimentos e intercâmbio de experiências

- ⇒ Tarefa 1.1: Identificação do estado de conhecimentos no domínio das soleiras PKW
- ⇒ Tarefa 1.2: Análise das características do escoamento em descarregadores em degraus (alturas características e equivalente do escoamento de emulsão de ar-água, velocidades e concentrações de ar)
- ⇒ Tarefa 1.3: Identificação do estado de conhecimentos na área da medição de alturas de água e técnicas de processamento de imagens bem como de velocidades e de concentração de ar em escoamentos de emulsão ar-água

Atividade 2 – Adaptações da instalação experimental e definição de equipamento de medição

- ⇒ Tarefa 2.1: Dimensionamento de soleiras PKW do tipo B, C e D e produção das peças por maquinaria com controlo numérico (CNC)
- ⇒ Tarefa 2.2: Adaptação da instalação para estudo de descarregadores em degraus: i) várias soleiras PKW (tipo B, C e D) e ii) canal de paramento liso e com várias alturas dos degraus
- ⇒ Tarefa 2.3: Análise das soluções técnicas, prospeção de mercado e avaliação dos custos de sensores para medição da concentração de ar em escoamentos emulsionados; definição das especificações para seleção da sonda para medição da concentração do ar

Atividade 3 – Realização de ensaios

- ⇒ Tarefa 3.1: Medição de vazões e comparação de coeficientes de vazão das soleiras WES e PKW tipo A, B, C e D
- ⇒ Tarefa 3.2: Medição de alturas do escoamento (perfis da superfície livre), velocidades do escoamento para degraus com 2 cm, 4 cm e 8 cm e paramento liso
- ⇒ Tarefa 3.3: Medição de concentrações de ar e ensaios com 2 sensores diferentes de medição

Atividade 4 – Tratamento dos dados

- ⇒ Tarefa 4.1: Tratamento dos dados de vazão e análise comparativa de coeficientes de vazão das soleiras WES e PKW tipo A, B, C e D
- ⇒ Tarefa 4.2: Comparação da taxa de dissipação de energia ao longo do descarregador para degraus com 2 cm, 4 cm e 8 cm e paramento liso
- ⇒ Tarefa 4.3: Avaliação do desempenho de 2 sensores diferentes de medição da concentração de ar

Atividade 5 – Elaboração de documentos científicos

- ⇒ Tarefa 5.1: Elaboração de 2 comunicações a congressos nacionais e/ou internacionais (◦)
- ⇒ Tarefa 5.2: Elaboração de 1 artigo para uma revista (●)
- ⇒ Tarefa 5.3: Redação de 1 relatório do LNEC (⊕)
- ⇒ Tarefa 5.3: Redação da dissertação de mestrado (*)

O Cronograma que se apresenta no Quadro 5.9 situa temporalmente as atividades mencionadas anteriormente.

Quadro 5.9 | Cronograma do Projeto 2.2

Tarefa	1º ano				2º ano				3º ano				4º ano			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1 – Revisão de conhecimentos																
2 – Adaptações da instalação experimental e definição de equipamento de medição																
3 – Realização de ensaios																
4 – Tratamento de dados																
5 – Elaboração de documentos científicos				⊕				◦			◦	*				●

5.5.3.4 Resultados esperados

Os resultados do projeto proposto podem ser subdivididos em específicos e em genéricos para o LNEC e em benefícios para a comunidade técnica e científica.

No que diz respeito aos resultados específicos para o LNEC, destacam-se:

- ⇒ Desenvolvimento e aplicação do conhecimento em novas soluções de descarga
- ⇒ Desenvolvimento de critérios de projeto e recomendações
- ⇒ Implementação e aperfeiçoamento de metodologias e de instrumentos para a medição e caracterização de grandezas relevantes dos escoamentos em estruturas hidráulicas, com ênfase para descarregadores de cheias e obras anexas de barragens
- ⇒ Teste e uso de instrumentação e de técnicas de aquisição de dados com aplicação nos estudos por contrato
- ⇒ Melhoria e otimização de instalações experimentais existentes
- ⇒ Aquisição de dados para calibração de modelos numéricos

No que diz respeito aos resultados genéricos para o LNEC, são de salientar:

- ⇒ Atualização do “Estado da arte”
- ⇒ Aquisição de *know-how* com interesse prático e aplicabilidade no contexto nacional e internacional
- ⇒ Aquisição de elementos para divulgação e formação
- ⇒ Estabelecimento e/ou promoção de:
 - uma plataforma de trabalhos de investigação científica (mestrado e doutoramento)
 - contactos internacionais e intercâmbio
 - um ponto focal de desenvolvimentos posteriores

No que diz respeito aos resultados específicos para a comunidade técnica nacional, o contributo deste trabalho vai no sentido de permitir a:

- ⇒ Formação de quadros técnicos
- ⇒ Consolidação do LNEC como referência institucional relativa a estruturas hidráulicas.

5.5.3.5 Recursos necessários

Os recursos humanos previstos para o desenvolvimento deste projeto constam do Quadro 5.10 e são os seguintes:

- 2 meses de Investigador Auxiliar (IA) ou de Investigador Principal (IP)
- 6 meses de Assistente Técnico
- 18 meses de Bolseiro de Iniciação à Investigação Científica LNEC
- 12 meses de Bolseiro de Mestrado com financiamento da FCT

Este último deverá obter uma Bolsa de Formação Avançada da FCT (<https://www.fct.pt/apoios/bolsas/concursos/>) para a realização do mestrado.

Os custos atribuídos à rubrica “Obra” incluem a edição de uma dissertação de mestrado (Base: 10 exemplares; 100 páginas) e de um relatório do LNEC (Base: 5 exemplares; 50 páginas). Neste item contabilizam-se ainda os custos relativos aos trabalhos de construção civil para as adaptações a realizar na instalação existente, i.e., mudança das soleiras PKW e das alturas dos degraus do canal.

Os custos atribuídos à rubrica “Materiais e serviços” incluem a compra de um computador portátil e de deslocações.

Quadro 5.10 | Estimativa dos recursos financeiros associados ao Projeto 2.2

Rubrica	Designação	Tempo Quantidade	Valor unitário	Total €	
A	Materiais e serviços				
		Deslocações	4	500	2000
		Computador	1	2000	2000
	Total				4000
B	Pessoal				
		IA/IP	2	5700	11400
		Assistente técnico	6	1500	9000
		Bolseiro de Iniciação à Investigação Científica LNEC	18	1484	26712
Total				47112	
C	Obra				
		Edições		1000	
		Adaptações da instalação experimental		6000	
Total				7000	
D		Bolseiro de Mestrado da FCT	12	870	10440
		Arredondamento			+36
Total (1,2A+2B+C)+D				116 500	

5.5.3.6 Potenciais parcerias e financiamentos

Para o desenvolvimento deste projeto é necessária a participação do Centro de Instrumentação Científica (CIC) do LNEC, tendo a presente ficha sido elaborada com o apoio deste departamento. Este projeto será igualmente desenvolvido em parceria com uma universidade, com a orientação conjunta de uma dissertação de mestrado. Neste âmbito é recomendável a continuação da parceria existente com o IST. Procurar-se-á financiamento junto da FCT (bolsa de mestrado).

5.6 Programa de Estudo 3 – Modelação de processos erosivos em obras hidráulicas

5.6.1 Considerações iniciais

O estudo do processo erosivo em obras hidráulicas é um assunto da maior importância já que pode envolver a segurança de pessoas e bens. Com efeito, acidentes tais como a rotura de barragens ou de diques e o colapso de pontes são caracterizados por elevados custos financeiros, ambientais e sociais e, em casos extremos, põem em risco vidas humanas.

O estudo dos processos erosivos em obras hidráulicas tem constado de todos os PIP do LNEC, pretendendo-se, assim, em primeiro lugar com o presente Programa de Estudos dar continuidade à investigação e ao aprofundamento do conhecimento neste âmbito. Este terceiro Programa de Estudos propõe-se estudar dois tipos diferentes de processos erosivos: os que estão presentes na rotura de aterros (barragens e diques) e os que ocorrem junto a pilares de pontes em leitos aluvionares de rios. Estes estudos basear-se-ão numa abordagem híbrida que inclui modelação física e numérica.

No que diz respeito à rotura de barragens e de diques, a estimativa da evolução da brecha e o correspondente hidrograma efluente constitui o aspeto mais sensível da sua caracterização e modelação. Estes aspetos relacionam-se com os mecanismos erosivos e envolvem processos hidráulicos, sedimentológicos e geotécnicos complexos.

Também o aumento localizado da velocidade do escoamento provocado por pilares e encontros de pontes e obstáculos salientes das margens e curvas dos rios pode originar a erosão. Embora o fenómeno da erosão localizada tenha sido amplamente investigado nas últimas décadas, essencialmente por abordagens experimentais, um melhor conhecimento da morfologia da cavidade de erosão continua a revelar-se de grande importância para um projeto seguro e económico de novas pontes, bem como para a manutenção das já existentes.

Note-se que os estudos experimentais realizados no âmbito deste Programa de Estudos contribuem, igualmente, para testar e ganhar experiência em novas tecnologias de medição em hidráulica de estruturas. Particular atenção será dada às seguintes grandezas: i) caudal medido de forma mais complexa, podendo envolver sistemas automatizados ou obrigando à multissensorização da medição da velocidade e da altura de água e à elaboração de algoritmos específicos para o cálculo do caudal; ii) volume erodido por ação do escoamento caracterizado com o uso do tratamento de imagens.

5.6.2 Projeto 3.1 – Modelação híbrida da rotura de barragens e diques

5.6.2.1 Enquadramento e justificação



Although the overall failure rate of dams is around 1%, a time-related analysis shows that this has been reduced by a factor of four or more over the last forty years. This improvement doubtlessly results from the improvements in certain investigation techniques, but it also arises from the wider dissemination of knowledge on risks.

(http://www.icold-igb.net/GB/dams/dams_safety.asp, consultado em março de 2018)

A modelação da cheia induzida pela rotura de aterros continua a ser um tópico de investigação constituindo a evolução temporal da brecha uma das principais fontes de incerteza na previsão das características da cheia decorrente da rotura gradual de uma barragem ou de um dique de aterro quando sujeito ao galgamento.

Este projeto propõe-se contribuir para a melhoria da capacidade atual de prever hidrogramas efluentes de barragens e de diques de terra sujeitos à rotura por galgamento, ultrapassando algumas das limitações identificadas no Capítulo 4 e investindo numa abordagem híbrida (experimental e numérica).

No LNEC têm sido feitas, nos últimos anos, várias dissertações de mestrado e uma tese de doutoramento neste âmbito em duas instalações experimentais existentes: o canal para estudo da dissipação de energia por ressalto hidráulico e o canal para estudo da rotura de aterros. A modelação experimental realizada no âmbito do presente projeto será conduzida nestas instalações e visa:

- incrementar o número de estudos laboratoriais conduzidos a escalas significativas em barragens de aterro com misturas coesivas, as mais utilizadas atualmente, e alargar o âmbito para: i) barragens com sistemas de drenagem interna semelhantes aos existentes em barragens reais, para avaliar a influência da existência destes sistemas; ii) diques, para avaliar a influência do escoamento não ortogonal;
- realizar avanços na medição através da multissensorização da medição da velocidade e da altura de água e da elaboração de algoritmos específicos para o cálculo do caudal.

Em termos de modelação numérica, o programa de ensaios proposto contribuirá para aprofundar o conhecimento sobre diques e barragens compostas por misturas coesivas e sistemas de drenagem interna. Pretende-se que a significância da escala utilizada seja compatível com as escalas dos diversos fenómenos presentes de forma a que os dados recolhidos permitam incorporar, nos modelos conceptuais, os efeitos geomórficos e os processos de transporte sólido, contribuindo para a transposição de algumas das limitações dos modelos numéricos existentes.

O desenvolvimento destes modelos conceptuais de evolução da brecha e do caudal escoado visa melhorar a capacidade de modelação numérica de rotura por galgamento de diques e barragens de aterro no NRE.

5.6.2.2 Objetivos

O objetivo principal do presente projeto é dar continuidade, no NRE, ao estudo dos fenómenos hidrodinâmicos e da mecânica do transporte sólido envolvidos na formação e evolução de uma brecha em aterros, formular modelos conceptuais da evolução temporal da brecha e do caudal escoado, com ênfase no caudal de ponta e desenvolver modelos numéricos mais robustos neste âmbito. Os objetivos específicos do presente projeto são:

- identificar e categorizar os fenómenos hidrodinâmicos e da mecânica do transporte sólido envolvidos na rotura gradual, por galgamento, de diques e barragens de aterro homogéneas ou zonadas;
- formular modelos conceptuais da evolução temporal da brecha e do caudal escoado, com ênfase no caudal de ponta, aplicáveis a situações genéricas e baseados na parametrização decorrente do trabalho empírico;
- desenvolver ferramentas para simulação numérica de misturas fluido-sedimento, combinando um módulo geotécnico e outro hidrodinâmico por forma a criar um modelo híbrido para simulação da evolução da brecha e do hidrograma de rotura;
- realizar ensaios em aterros zonados envolvendo o estudo do comportamento geotécnico realista conferido por uma escolha criteriosa dos materiais do corpo dos aterros, com solos com teores de argila adequados;
- realizar ensaios para avaliar a influência da existência de sistemas de drenagem interna, semelhantes aos existentes em barragens reais;
- estender o estudo para diques, para avaliação a influência do escoamento não ortogonal.

Para atingir os objetivos propostos desenvolver-se-á trabalho laboratorial baseado em ensaios controlados em modelo reduzido de barragens de aterro homogéneas e zonadas bem como em diques longitudinais com instrumentação inovadora. Recolher-se-ão dados que permitirão construir modelos conceptuais da evolução da brecha e do caudal escoado. Estes modelos contribuirão para reduzir a incerteza associada à estimativa da cheia extrema decorrente da rotura de barragens de aterro, permitindo melhorar o desempenho das ferramentas de modelação matemática utilizadas como instrumentos de previsão dos impactos da rotura. Os dados experimentais a obter servirão ainda para a calibração e validação de modelos numéricos de rotura de aterros.

5.6.2.3 Metodologia proposta e planeamento das atividades

A proposta metodológica compreende trabalho laboratorial, teórico e numérico e inclui o seguinte conjunto de atividades:

Atividade 1 – Revisão de conhecimentos e intercâmbio de experiências

- ⇒ Tarefa 1.1: Identificação do estado de conhecimentos na modelação da erosão de aterros (barragens e diques)
- ⇒ Tarefa 1.2: Identificação de tecnologias para medição de velocidades do escoamento e da erosão por processamento de imagem
- ⇒ Tarefa 1.3: Recolha de dados de campo nomeadamente envolvendo a rotura dos diques do Mondego (2001 e 2016)

Atividade 2 – Modelação experimental e tratamento de dados

- ⇒ Tarefa 2.1: Análise do trabalho experimental previamente feito no LNEC (Amaral, 2017) e escolha dos casos a aprofundar com novos testes
- ⇒ Tarefa 2.2: Adaptação da instalação experimental
- ⇒ Tarefa 2.3: Realização de novos testes envolvendo diques e barragens dotadas de sistemas de drenagem interna
- ⇒ Tarefa 2.4: Medição dos perfis de velocidade e monitorização da evolução temporal da brecha e tratamento dos dados

Atividade 3 – Modelação numérica, calibração e validação

- ⇒ Tarefa 3.1: Desenvolvimento de um modelo conceptual que descreva a evolução temporal da brecha e do caudal escoado e sua incorporação numérica
- ⇒ Tarefa 3.2: Modelação numérica e análise comparativa com resultados experimentais
- ⇒ Tarefa 3.3: Simulação com dados históricos, nomeadamente da rotura dos diques do Mondego (2001 e 2016)

Atividade 4 – Elaboração de documentos científicos

- ⇒ Tarefa 4.1: Elaboração de 3 comunicações a congressos nacionais e internacionais (◦)
- ⇒ Tarefa 4.2: Elaboração de 4 artigos para revistas (●)
- ⇒ Tarefa 4.3: Redação e entrega da tese de doutoramento (*)

O Cronograma que se apresenta no Quadro 5.11 situa temporalmente as atividades mencionadas anteriormente.

Quadro 5.11 | Cronograma do Projeto 3.1

Tarefa	1º ano				2º ano				3º ano				4º ano			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1 – Revisão de conhecimentos																
2 – Modelação experimental e tratamento de dados																
3 – Modelação numérica, calibração e validação																
4 – Elaboração de documentos científicos				•	○			•	○			•	○		•	*

5.6.2.4 Resultados esperados

Os resultados do projeto proposto podem ser subdivididos em específicos e em genéricos para o LNEC e em benefícios para a comunidade técnica e científica.

No que diz respeito aos resultados específicos para o LNEC, destacam-se:

- ⇒ Desenvolvimento, melhoria e aplicação do conhecimento
- ⇒ Ganho de *know-how* com modelos numéricos para simulação de processos de rotura de aterros e diques por incorporação, nos modelos conceptuais, dos efeitos geomórficos e dos processos de transporte sólido
- ⇒ Desenvolvimento de ferramentas de cálculo para modelação da rotura de barragens e diques
- ⇒ Melhoria e otimização de instalações experimentais existentes
- ⇒ Avanços do conhecimento em novas tecnologias de medição e caracterização de grandezas relevantes dos escoamentos, com ênfase para a caracterização de processos erosivos
- ⇒ Aquisição de dados experimentais para calibração de modelos numéricos
- ⇒ Teste e uso de instrumentação e de técnicas de aquisição de dados experimentais com aplicação nos estudos por contrato

No que diz respeito aos resultados genéricos para o LNEC, são de salientar:

- ⇒ Atualização do “Estado da arte”
- ⇒ Aquisição de *know-how* com interesse prático e aplicabilidade no contexto nacional e internacional

⇒ Aquisição de elementos para divulgação e formação

⇒ Estabelecimento e/ou promoção de:

- uma plataforma de trabalhos de investigação científica (mestrado e doutoramento)
- contactos internacionais e intercâmbio
- um ponto focal de desenvolvimentos posteriores

No que diz respeito aos resultados específicos para a comunidade técnica nacional, o contributo deste trabalho vai no sentido de permitir a:

⇒ Formação de quadros técnicos

⇒ Consolidação do LNEC como referência institucional no que se refere à rotura de barragens e diques

5.6.2.5 Recursos necessários

Os recursos humanos previstos para o desenvolvimento deste projeto constam do Quadro 5.12 e são os seguintes:

- 6 meses de Investigador Auxiliar (IA) ou de Investigador Principal (IP)
- 12 meses de Assistente Técnico
- 48 meses de Bolseiro de Doutoramento com financiamento da FCT

Este último deverá candidatar-se a uma Bolsa de Formação Avançada da FCT (<https://www.fct.pt/apoios/bolsas/concursos/>).

Quadro 5.12 | Estimativa dos recursos financeiros associados ao Projeto 3.1

Rúbrica	Designação	Tempo Quantidade	Valor unitário	Total €	
A	Materiais e serviços	Missões	4	2000	8000
		Backups	5	100	500
		Total			8500
B	Pessoal	IA/IP	6	5700	34200
		Assistente técnico	12	1500	18000
		Total			52200
C	Obra	Edições			2000
		Adaptação da instalação experimental			15000
		Total			17000
D	Bolseiro de doutoramento da FCT	48	1105	53040	
		Arredondamento			-140
Total (1,2A+2B+C)+D				184 500	

Os custos atribuídos à rubrica “Obra” incluem a edição da tese de doutoramento (Base: 30 exemplares; 300 páginas) e os trabalhos de construção civil para adaptação da instalação experimental existente.

Os custos atribuídos à rubrica “Materiais e serviços” incluem a compra cinco discos externos para *backups* de arquivo de informação e de uma missão anual.

5.6.2.6 Potenciais parcerias e financiamento

Para o desenvolvimento deste projeto no NRE é necessária a participação do Departamento de Geotecnia do LNEC, tendo a presente ficha sido elaborada com o apoio deste departamento. Este projeto será igualmente desenvolvido em parceria com uma universidade, com a orientação conjunta de uma tese de doutoramento. Neste âmbito é recomendável a continuação da parceria existente com o IST. O projeto tem já financiamento externo da FCT não só através da obtenção de uma bolsa no Programa Doutoral InfraRisk (em curso) como também através do projeto Dam&Dique Care - “Modelação numérica e caracterização experimental da formação de brechas em barragens de aterro e diques” (2018/2021).

5.6.3 Projeto 3.2 – Modelação híbrida da erosão junto a pilares de pontes

5.6.3.1 Enquadramento e justificação



Bridges are an essential part of a nation's economy. They are crucial for transporting goods and people. Significant damage to bridges can drastically damage an area's local economy and cause injury and loss of life. Bridge scour is the leading cause of bridge failure in all the world. Steps must be taken to protect against bridge scour so as to preserve the structural integrity of bridges and to maintain their role as facilitators of transportation, trade and commerce.

(<https://graduatedegrees.online.njit.edu/resources/msce/msce-infographics/bridge-scour-protection-preventing-bridge-failure/>; consultado em março de 2018)

O desenvolvimento de cavidades de erosão junto de pilares e encontros de pontes coloca frequentemente em risco a respetiva estabilidade estrutural, podendo, como consequência do seu colapso parcial ou total, originar importantes perdas patrimoniais e/ou humanas. É, portanto, fundamental conhecer a morfologia do leito em torno dos elementos que constituem a fundação de pontes.

Este projeto visa o aprofundamento do estudo da erosão junto a pilares de pontes e relaciona-se com o objetivo de implementar no NRE a modelação numérica deste tipo de fenómeno bem como de ganhar aptidões no uso quotidiano de tecnologia avançada na aquisição e tratamento de grandezas que caracterizam a erosão nas instalações experimentais, nos modelos físicos e em protótipo.

O tópico da erosão junto a pilares e encontros de pontes tem sido amplamente investigado no NRE, mormente por recurso a campanhas experimentais. Os levantamentos da morfologia da cavidade de erosão são essencialmente pontuais, o que condiciona representações mais detalhadas da superfície erodida. Em termos experimentais, pretende-se realizar avanços na medição da turbulência junto a pilares e do volume erodido por ação escoamento pelo uso de ADV, no primeiro caso, e de tratamento de imagens, no segundo caso. Esta medição da evolução temporal da cavidade de erosão sem interrupção da experiência, através da aplicação de técnicas de imagem avançada é uma técnica que possibilita uma análise contínua e não-intrusiva e apresenta uma resolução espacial e temporal bastante significativa.

Aliada a estes avanços da tecnologia de instrumentação laboratorial, tem-se assistido a um crescente desenvolvimento da modelação numérica do processo erosivo em torno de pilares de pontes, nomeadamente de ferramentas de dinâmica de fluidos computacional (CFD), para as quais é fundamental dispor de dados da morfologia do leito que permitam a calibração e a validação desses modelos. A validação dos modelos numéricos constitui igualmente um desafio muito interessante, já que existe no LNEC muita informação experimental que será utilizada para verificar a precisão dos modelos numéricos.

5.6.3.2 *Objetivos*

O estudo da erosão junto a pilares de pontes tem constado em todos os PIP do LNEC, mas investindo numa abordagem exclusivamente experimental. O presente projeto pretende assim dar continuidade a esta linha de investigação, mas fazendo uso de uma abordagem numérica e visa a implementação no NRE da modelação numérica da erosão junto a pilares de pontes e o ganho de aptidões no uso quotidiano do *software* comercial FLOW-3D, recentemente adquirido pelo LNEC. Assim, os resultados da modelação numérica serão comparados com medições *in situ* e provenientes de estudos experimentais conduzidos no CIV por forma a estimar a incerteza associada aos resultados do modelo numérico.

Com efeito, existe uma vasta base de dados adquiridos no âmbito de teses experimentais com enfoque na tese recentemente desenvolvida (Moreno, 2016) que permite de uma forma eficaz, a comparação dos resultados da modelação numérica com resultados de instalações experimentais, por forma a estimar a incerteza associada aos resultados numéricos. Como os levantamentos do interior da cavidade de erosão que constam de Moreno (2016) são essencialmente pontuais, pretende-se reproduzir alguns destes ensaios, conduzidos no CIV, mas com a caracterização cabal da cavidade de erosão e da turbulência do escoamento recorrendo a medições ADV e à aplicação de técnicas de imagem avançada. O projeto pretende, igualmente, verificar o desempenho do modelo CFD na modelação de um caso de estudo real, como, por exemplo, a Ponte Rainha Dona Amélia ou da Chamusca (no rio Tejo) ou a ponte Hintze Ribeiro (no rio Douro).

A modelação experimental a realizar, bem como a aquisição de dados em protótipo, visa alargar o âmbito de aplicação da investigação já realizada no LNEC e em particular: i) aprofundar o conhecimento do fenómeno; ii) utilizar os dados e as instalações existentes para calibração do modelo FLOW-3D; iii) atualizar a instrumentação, melhorando as técnicas de aquisição de dados disponíveis no NRE, em particular as referentes à erosão.

Para o novo sensor (Kinect) de medição da erosão constitui um objetivo do presente projeto, o desenvolvimento de um plano de calibração com quantificação dos erros e incertezas de medição, por forma a que o NRE tenha alternativas de instrumentação para este tipo de medição.

5.6.3.3 *Metodologia proposta e planeamento das atividades*

A metodologia proposta tem uma abordagem numérica e experimental e inclui o seguinte conjunto de atividades:

Atividade 1 – Revisão de conhecimentos e intercâmbio de experiências

- ⇒ Tarefa 1.1: Identificação do estado de conhecimentos na modelação CFD da erosão junto a pilares de pontes

⇒ Tarefa 1.2: Identificação do estado de conhecimentos na modelação experimental da erosão junto a pilares de pontes

⇒ Tarefa 1.3: Identificação das tecnologias existentes para medição da erosão por processamento de imagem

Atividade 2 – Modelação experimental e dados de campo

⇒ Tarefa 2.1: Análise do trabalho experimental previamente feito no LNEC (Moreno, 2016) e escolha dos casos a aprofundar com novos ensaios

⇒ Tarefa 2.2: Realização de novos ensaios com medição mais rigorosa da erosão, envolvendo a caracterização cabal da cavidade de erosão, e, em simultâneo, com a medição das velocidades junto à mesma por ADV

⇒ Tarefa 2.3: Escolha de um caso de estudo real (ponte da Chamusca, ponte Rainha Dona Amélia, no Tejo ou ponte Hintze Ribeiro, no Douro) e recolha de dados de campo

Atividade 3 – Modelação numérica e validação

⇒ Tarefa 3.1: Geração da malha com geometria do CIV e do sistema a modelar (caixa de areia do CIV e pilares)

⇒ Tarefa 3.2: Estudo de modelos de turbulência e aprofundamento do conhecimento em modelação da turbulência por abordagens do tipo LES

⇒ Tarefa 3.3: Modelação numérica dos ensaios realizados e calibração por análise comparativa com resultados experimentais

⇒ Tarefa 3.4: Simulação numérica do caso de estudo real e análise comparativa com dados de campo

Atividade 4 – Elaboração de documentos científicos

⇒ Tarefa 4.1: Elaboração de 3 comunicações a congressos nacionais e internacionais (◦)

⇒ Tarefa 4.2: Elaboração de 3 artigos para revistas (●)

⇒ Tarefa 4.3: Redação e entrega da tese de doutoramento (*)

O Cronograma que se apresenta no Quadro 5.13 situa temporalmente as atividades mencionadas.

Quadro 5.13 | Cronograma do Projeto 3.2

Tarefa	1º ano				2º ano				3º ano				4º ano			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1 – Revisão de conhecimentos																
2 – Modelação experimental e dados de campo																
3 – Modelação numérica e validação																
4 – Elaboração de documentos científicos					○			●	○			●	○		●	*

5.6.3.4 Resultados esperados

Os resultados do projeto proposto podem ser subdivididos em específicos e em genéricos para o LNEC e em benefícios para a comunidade técnica e científica.

No que diz respeito aos resultados específicos para o LNEC, destacam-se:

- ⇒ Desenvolvimento, melhoria e aplicação do conhecimento
- ⇒ Análise e desenvolvimento de ferramentas de cálculo para modelação da erosão com enfoque nas pontes
- ⇒ Ganho de *know-how* com modelos numéricos CFD para simulação de processos de erosão
- ⇒ Avanços do conhecimento em novas tecnologias de medição e caracterização de grandezas relevantes dos escoamentos, com ênfase para a caracterização de processos erosivos
- ⇒ Teste e uso de instrumentação e de técnicas de aquisição de dados experimentais com aplicação nos estudos por contrato
- ⇒ Ganho de capacidade de execução de ensaios comparativos de instrumentação fabricada por construtores diferentes para seleção da oferta mais conveniente, tendo em conta o desempenho exibido
- ⇒ Aquisição de dados experimentais para calibração de modelos numéricos

No que diz respeito aos resultados genéricos para o LNEC, são de salientar:

- ⇒ Atualização do “Estado da arte”
- ⇒ Aquisição de *know-how* com interesse prático e aplicabilidade no contexto nacional e internacional
- ⇒ Aquisição de elementos para divulgação e formação
- ⇒ Estabelecimento e/ou promoção de:

- o uma plataforma de trabalhos de investigação científica (mestrado e doutoramento)
- o contactos internacionais e intercâmbio
- o um ponto focal de desenvolvimentos posteriores

No que diz respeito aos resultados específicos para a comunidade técnica nacional, o contributo deste trabalho vai no sentido de permitir a:

- ⇒ Formação de quadros técnicos
- ⇒ Consolidação do LNEC como referência institucional no que se refere a estruturas hidráulicas associadas a vias de comunicação

5.6.3.5 Recursos necessários

Os recursos humanos previstos para o desenvolvimento deste projeto constam do Quadro 5.14 e são os seguintes:

- 6 meses de Investigador Auxiliar (IA) ou de Investigador Principal (IP)
- 12 meses de Assistente Técnico
- 48 meses de Bolseiro de Doutoramento com financiamento da FCT

Este último deverá candidatar-se a uma Bolsa de Formação Avançada da FCT (<https://www.fct.pt/apoios/bolsas/concursos/>).

Quadro 5.14 | Estimativa dos recursos financeiros associados ao Projeto 3.2

Rúbrica	Designação	Tempo Quantidade	Valor unitário	Total €
A	Materiais e serviços			
		Missões	4	2000
		Backups e Monitor		1000
		Total		9000
B	Pessoal			
		IA/IP	6	5700
		Assistente técnico	12	1500
		Total		52200
C	Obra			
		Edições		2000
		Adaptação da instalação experimental		4000
		Total		6000
D	Bolseiro de doutoramento da FCT		48	1105
	Arredondamento			-240
	Total (1,2A+2B+C)+D			174 000

Os custos atribuídos à rubrica “Obra” incluem a edição da tese de doutoramento (Base: 30 exemplares; 300 páginas) e os equivalentes a trabalhos de construção civil para adaptação da instalação experimental existente (CIV).

Os custos atribuídos à rubrica “Materiais e serviços” incluem a compra de equipamento e de quatro missões.

5.6.3.6 Potenciais parcerias e financiamento

O desenvolvimento deste projeto no NRE é feito em parceria com a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto através da orientação conjunta de uma tese de doutoramento recentemente financiada no Programa Doutoral InfraRisk (em curso). Procurar-se-á financiamento adicional junto da FCT através da submissão de um projeto na temática.

Para o desenvolvimento deste projeto no LNEC é igualmente recomendável o estabelecimento de uma parceria técnico-financeira com uma entidade potencialmente interessada nos resultados do projeto e que venha a fornecer casos de estudo, por exemplo as Infraestruturas de Portugal (IP).

5.7 Programa de Estudo 4 – Gestão do risco em barragens

5.7.1 Considerações iniciais

Nas barragens o pior cenário de acidente a considerar está associado à sua rotura. Trata-se de um acidente que pode ultrapassar largamente a escala do local onde a barragem está implantada, já que a cheia induzida pode percorrer centenas de quilómetros a jusante e ter impacto transnacional. A segurança de pessoas e bens é uma constante preocupação dos decisores políticos, que são responsáveis por criar e manter as condições indispensáveis à estabilidade e desenvolvimento sustentável do território que administram. Isto implica, entre outras coisas, proteger a população contra desastres naturais ou tecnológicos, o que pode ser conseguido avaliando o risco e tentando minimizar os seus efeitos.

A gestão do risco em barragens tem constado de todos os PIP do LNEC, pretendendo-se, assim, em primeiro lugar com o presente Programa de Estudos dar continuidade à investigação no NRE neste âmbito. Este quarto Programa de Estudo propõe-se agrupar várias ferramentas para avaliar e reduzir o risco em barragens em dois domínios: i) atuando no sentido de diminuir a probabilidade de rotura e/ou ii) investindo no decréscimo das correspondentes consequências.

Com efeito, e tal como referido no ponto 4.1, pode-se considerar o risco como o produto das consequências nefastas que resultam de um evento adverso, por exemplo a rotura de uma barragem, pela sua probabilidade de ocorrência. Os instrumentos de prevenção são os que reduzem a probabilidade de ocorrência de um acidente, detetando os fenómenos de deterioração das barragens. Constituem exemplos destes instrumentos os que permitem a deteção, em tempo útil, de eventos perigosos ou de anomalias no comportamento da barragem (Sistema de Observação) e que podem socorrer-se de ferramentas de controlo de segurança, nomeadamente a observação de grandezas *in situ*. Por outro lado, as medidas de preparação são as que reduzem as consequências, i.e., os danos produzidos pela cheia induzida, sendo tradicionalmente associadas ao planeamento de emergência.

No que diz respeito aos instrumentos de prevenção para reduzir o risco em barragens, definiu-se o Projeto 4.1 que visa desenvolver ferramentas que permitam avaliar o estado dos órgãos de segurança e a probabilidade da sua falha bem como instrumentar estruturas hidráulicas associadas a barragens por sensores *in situ* por forma a identificar possíveis deteriorações.

No que diz respeito às medidas de preparação para reduzir o risco em barragens, definiu-se o Projeto 4.2 que propõe o desenvolvimento e a melhoria de algumas ferramentas que se relacionam com o planeamento de emergência.

5.7.2 Projeto 4.1 – Análise e redução do risco em barragens por instrumentos de prevenção

5.7.2.1 Enquadramento e justificação



As storms, floods and other large weather events can place those living near a dam at risk, proper monitoring of a dam during such events is an important aspect of dam operation and maintenance. New technologies may prove beneficial by equipping plant owners and operators with real-time information and its impact on the infrastructure affected.

(Caldwell *et al.*, 2013).

Estudos de inventariação de deteriorações em barragens realizados pela ICOLD permitem inferir que cerca de 44% do total destas ocorrem nos órgãos hidráulicos. Também é elevada a percentagem de rotura de barragens causadas por fatores hidráulico-operacionais, como por exemplo, a insuficiência da capacidade de vazão ou o mau funcionamento dos órgãos de descarga.

O estudo das deteriorações que podem ocorrer em estruturas hidráulicas pode gerar informação preciosa para a fase de mitigação do risco, já que alerta não só para os problemas mais comuns em obras do mesmo tipo como também avisa para a possibilidade de poderem ocorrer situações similares no caso de novas obras.

A medição de grandezas hidráulicas em protótipo é igualmente muito importante para avaliar a segurança, já que permite o conhecimento cabal das ações que se exercem nestas estruturas e da resposta das mesmas. Note-se ainda que, o desenvolvimento de um Plano de Emergência Interno na barragem obriga, numa primeira fase, a proceder à identificação do risco na própria barragem, e um sistema em tempo real de medição de grandezas constitui uma ferramenta de avaliação e de diagnóstico excelente, já que pode alertar atempadamente para problemas existentes na obra.

Também as técnicas baseadas na análise do risco para estimar a probabilidade de acidente em barragens são cada vez mais populares para lidar com incertezas nas avaliações de segurança deste tipo de estruturas. Estas técnicas podem ser qualitativas ou quantitativas. O primeiro grupo inclui as análises que usam formas descritivas ou escalas numéricas para descrever tanto a magnitude das consequências como a probabilidade da ocorrência do acidente. Como exemplos são de referir os índices e as matrizes de classificação de risco ou a análise de modos de falha e dos seus efeitos (FMEA). A análise de risco é quantitativa quando é baseada em valores numéricos das potenciais consequências e da sua probabilidade. Como exemplos são de referir os métodos da Análise de Árvore de Eventos (*Event Tree Analyses* - ETA) e da Análise de Árvore de Falha (*Fault Tree Analyses* - FTA).

Este projeto visa o desenvolvimento de instrumentos que apoiem a identificação de deteriorações e a estimativa da probabilidade de acidente associadas aos órgãos de segurança das barragens. Está

previsto igualmente o aprofundamento do conhecimento em sistemas de medição e aquisição de grandezas *in situ*, em particular de pressões em bacias de dissipação de descarregadores de cheias de barragens.

5.7.2.2 *Objetivos*

O presente projeto tem 3 objetivos principais:

- análise das condições de segurança de descarregadores de cheias tendo por base a identificação das deteriorações que correntemente ocorrem neste tipo de estrutura hidráulica;
- análise de metodologias para estimativa da probabilidade de rotura de barragens no que concerne aos aspetos hidrológicos e hidráulico-operacionais;
- análise e seleção de novas técnicas de medição de grandezas hidráulicas em laboratório e *in situ*.

Para a concretização do primeiro objetivo pretende-se estudar as deteriorações por causas hidráulicas mais comuns e desenvolver uma ferramenta que transmita, de forma simples e objetiva a informação sobre o estado de manutenção de um descarregador, podendo ser incorporada num processo de apoio à decisão. Em particular, pretende-se o desenvolvimento de um índice de estado de manutenção e o estudo de soluções para eliminação das deteriorações mais comuns. O índice será um instrumento capaz de agregar uma grande quantidade de informação, permitindo comparar o risco relativo de diversas obras, o que constituirá uma base mais formal para estabelecer prioridades nos investimentos com vista a aumentar a segurança quando em presença de um número elevado de barragens.

O segundo objetivo visa a seleção de *software* para a estimativa da probabilidade de rotura de sistemas como, por exemplo, árvores de probabilidade de eventos ou análise de modos de falha e dos seus efeitos (FMEA) e a sua aplicação nos sistemas hidráulicos associados a barragens, que incluem os seguintes subsistemas: bacia hidrográfica, albufeira, descarregadores de cheias (incluindo comportas e equipamentos), descargas de fundo e vale a jusante.

O terceiro objetivo deste projeto é um contributo para o NRE ganhar experiência em observação e monitorização de grandezas (pressões e flutuações de pressão) em protótipo. Com efeito, embora no âmbito de um trabalho de investigação com a EDP instrumentou-se a bacia de impacto do AHFT. Esta prática ainda não é quotidiana no NRE. Pretende-se assim comparar os dados adquiridos em modelos reduzidos com as medições em protótipo e avaliar efeitos de escala. Particular atenção será dada à medição de grandezas hidráulicas (pressões e velocidades) em protótipo.

5.7.2.3 Metodologia proposta e planeamento das atividades

A metodologia proposta inclui o seguinte conjunto de atividades:

Atividade 1 – Revisão de conhecimentos e intercâmbio de experiências

- ⇒ Tarefa 1.1: Identificação do estado de conhecimentos no domínio da medição de grandezas hidráulicas: i) níveis de água; ii) velocidades e iii) pressões
- ⇒ Tarefa 1.2: Pesquisa, a nível global, dos casos de deterioração de órgãos de descarga, tendo em vista a identificação das principais causas que originam acidentes (cavitação, abrasão, erosão, sedimentos e materiais flutuantes, subpressões, etc.)
- ⇒ Tarefa 1.3: Identificação do estado de conhecimentos no que se refere aos métodos de análise de risco em barragens

Atividade 2 – Modelação física, numérica e testes em protótipo

- ⇒ Tarefa 2.1: Recolha e processamento dos dados adquiridos no protótipo referentes a pressões e flutuações de pressão
- ⇒ Tarefa 2.2: Uso e ou desenvolvimento de *software* para tratamento de dados adquiridos em protótipo referentes a pressões e à análise espectral de flutuações de pressão
- ⇒ Tarefa 2.3: Adaptação do modelo físico de Foz Tua para medição de pressões instantâneas e construção da malha do descarregador de cheias
- ⇒ Tarefa 2.4: Realização de ensaios em modelo físico e de simulações reproduzindo as descargas verificadas *in situ*
- ⇒ Tarefa 2.5: Comparação de informação de protótipo e em modelo físico e numérico

Atividade 3 – Desenvolvimento e aperfeiçoamento de instrumentos de prevenção

- ⇒ Tarefa 3.1: Seleção de descritores que sejam os mais representativos de determinadas características do descarregador (indicadores) e que traduzam entre outros: i) a importância e tipo de solução do descarregador; ii) o tipo de comporta; iii) o tipo de sistema eletromecânico, etc.
- ⇒ Tarefa 3.2: Desenvolvimento de um índice de estado de segurança de descarregadores de cheias (incluindo comportas e equipamentos eletromecânicos)
- ⇒ Tarefa 3.3: Seleção de *software* para análise de risco em barragens como, por exemplo, árvores de probabilidade de eventos ou análise de modos de falha e dos seus efeitos (FMEA)

Atividade 4 – Implementação e teste das metodologias

- ⇒ Tarefa 4.1: Seleção de um conjunto de casos de estudo em Portugal que possam ser considerados diferentes no que se refere a soluções de descarregadores de cheias e condições de manutenção
- ⇒ Tarefa 4.2: Aplicação da metodologia de análise de risco (árvore de eventos e FMEA)
- ⇒ Tarefa 4.3: Cálculo do índice do estado de segurança dos descarregadores
- ⇒ Tarefa 4.4: Desenvolvimento e proposta de procedimentos de análise de risco em barragens e identificação das deteriorações com enfoque nos órgãos de segurança
- ⇒ Tarefa 4.5: Desenvolvimento de um portfólio de medidas de prevenção na fase de projeto²⁹ e na fase de exploração³⁰ do estado de manutenção dos órgãos de segurança de barragens

Atividade 5 – Elaboração de documentos científicos

- ⇒ Tarefa 5.1: Elaboração de 2 comunicações a congressos nacionais e internacionais (◦)
- ⇒ Tarefa 5.2: Elaboração de 2 artigos para revistas (•)
- ⇒ Tarefa 5.3: Redação de 2 relatórios do LNEC (⊕)
- ⇒ Tarefa 5.4: Redação de duas dissertações de mestrado (*)

O Cronograma que se apresenta no Quadro 5.15 situa temporalmente as atividades mencionadas anteriormente.

Quadro 5.15 | Cronograma do Projeto 4.1

Tarefa	1º ano				2º ano				3º ano				4º ano			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1 – Revisão de conhecimentos																
2 – Modelação física, numérica e testes em protótipo																
3 – Desenvolvimento e aperfeiçoamento de ferramentas																
4 - Implementação e teste das metodologias																
5 – Elaboração de documentos científicos			◦	*			⊕	•			◦	*			⊕	•

²⁹ Construção de estruturas que facilitem o aumento futuro da capacidade de descarga, órgãos hidráulicos com diversas fontes de energia e com operação remota, etc.

²⁹ Inspeção de órgãos de descarga, regras de operação de comportas, partilha de informações entre donos de obra de barragens em cascata, PEI, etc.

5.7.2.4 Resultados esperados

Os resultados do projeto proposto podem ser subdivididos em específicos e em genéricos para o LNEC e em benefícios para a comunidade técnica e científica.

No que diz respeito aos resultados específicos para o LNEC, destacam-se:

- ⇒ Análise e implementação de ferramentas de análise de risco e identificação de deteriorações em órgãos de segurança de barragens e recomendações
- ⇒ Avanços do conhecimento em novas tecnologias de medição e caracterização de grandezas relevantes dos escoamentos em estruturas hidráulicas, com ênfase para descarregadores de cheias de barragens
- ⇒ Melhoria de conhecimentos sobre o comportamento estrutural das obras como reflexo do aumento da fiabilidade da instrumentação em consequência do estudo proposto
- ⇒ Aquisição de dados de protótipo para avaliação do desempenho e para calibração de modelos numéricos; ganho de conhecimento sobre efeitos de escala
- ⇒ Melhoria do conhecimento do comportamento de transdutores de pressão em regime dinâmico
- ⇒ Disponibilidade de dados adicionais relativos ao comportamento da instrumentação aplicada em observação de obras que permitirão fundamentar futuras aquisições ou novas conceções ou desenvolvimentos a efetuar
- ⇒ Ganho de capacidade de execução de ensaios comparativos de instrumentação fabricada por construtores diferentes para seleção da oferta mais conveniente, tendo em conta o desempenho exibido
- ⇒ Teste e uso de instrumentação e de técnicas de aquisição de dados *in situ* com aplicação nos estudos por contrato

No que diz respeito aos resultados genéricos para o LNEC, são de salientar:

- ⇒ Atualização do “Estado da arte”
- ⇒ Aquisição de *know-how* com interesse prático e aplicabilidade no contexto nacional e internacional
- ⇒ Aquisição de elementos para divulgação e formação
- ⇒ Estabelecimento e/ou promoção de:
 - uma plataforma de trabalhos de investigação científica (mestrado e doutoramento)
 - contactos internacionais e intercâmbio
 - um ponto focal de desenvolvimentos posteriores

No que diz respeito aos resultados para a comunidade técnica nacional, o contributo deste trabalho vai, igualmente, no sentido de permitir a:

- ⇒ Formação de quadros técnicos
- ⇒ Consolidação do LNEC como referência institucional relativa a análise do risco em estruturas hidráulicas associadas a barragens
- ⇒ Uniformização dos procedimentos de análise do risco em estruturas hidráulicas (órgãos de segurança)

5.7.2.5 Recursos necessários

Os recursos humanos previstos para o desenvolvimento deste projeto constam do Quadro 5.16 e são os seguintes:

- 2 meses de Investigador Auxiliar (IA) ou de Investigador Principal (IP)
- 4 meses de Técnico Superior
- 9 meses de Bolseiro de Iniciação à Investigação Científica LNEC
- 24 meses de Bolseiros de Mestrado com financiamento da FCT

Os bolseiros a trabalhar neste projeto deverão tentar obter uma Bolsa de Formação Avançada da FCT(<https://www.fct.pt/apoios/bolsas/concursos/>) para a realização dos mestrados.

Quadro 5.16 | Estimativa dos recursos financeiros associados ao Projeto 4.1

Rúbrica	Designação	Tempo Quantidade	Valor Unitário	Total €
A	Materiais e serviços			
	Deslocações	10	500	5000
	Equipamento (Transdutores)	10	700	7000
	Total			12000
B	Pessoal			
	IA/IP	2	5700	11400
	Técnico Superior	4	3500	14000
	Bolseiro de Iniciação à Investigação Científica LNEC	9	1484	13356
	Total			38756
C	Obra			
	Edições			1500
	Adaptação da instalação experimental			2500
	Total			4000
D	2 Bolseiros de mestrado da FCT	24	870	20880
	Arredondamento			+208
	Total (1,2A+2B+C)			117 000 €

Os custos atribuídos à rubrica “Obra” incluem a edição das dissertações de mestrado (Base: 10 exemplares; 100 páginas) e de dois relatórios do LNEC (Base: 5 exemplares; 50 páginas). Neste item contabilizam-se ainda os custos para adaptação do modelo físico do AHFT para a realização do projeto proposto. Os custos atribuídos à rubrica “Materiais e serviços” incluem a compra de 10 transdutores de pressão e deslocações.

5.7.2.6 Potenciais parcerias e financiamentos

Para o desenvolvimento deste estudo é necessária a participação do Centro de Instrumentação Científica (CIC) do LNEC, tendo a presente ficha sido elaborada com o apoio deste departamento. Este projeto será igualmente desenvolvido em parceria com uma universidade, com a orientação conjunta de uma dissertação de mestrado. Neste âmbito é recomendável a continuação da parceria existente com a Universidade de Coimbra. Será necessário manter a parceria técnico-financeira existente com a EDP e estabelecer outras novas com entidades potencialmente interessadas nos resultados do estudo e que venham a fornecer dados. Procurar-se-á financiamento junto da FCT através de candidaturas a bolsas de mestrado.

5.7.3 Projeto 4.2 – Mitigação do risco em barragens por medidas de preparação

5.7.3.1 Enquadramento e justificação



We are moving from cross-national research of separate disaster cases to transnational research demands imposed upon us by the international and transnational dimensions of modern disasters themselves.

(Uriel Rosental, 1990)

O LNEC tem, de acordo com o RSB, responsabilidades institucionais em matéria de controlo de segurança de barragens. A ação da mitigação dos riscos interno e externo, que constitui o aspeto essencial para promover a segurança efetiva das populações, tem obrigado à cooperação com a Autoridade Nacional de Proteção Civil (ANPC), no sentido da preparação de metodologias que possibilitem agir sem o alarme desnecessário das populações.

O planeamento de emergência, como meio eficaz de preparação para resposta a situações de acidente, visando a proteção da vida de pessoas, bens e ambiente, é uma tarefa que requer experiência e contínuo aperfeiçoamento. As ondas de inundação resultantes de acidentes graves em barragens propagam-se rapidamente, pelo que o tempo de resposta é um fator fundamental para a minoração do número de vítimas mortais. Os programas de exercícios devem constituir uma atividade regular em todas as barragens, já que permitem treinar os recursos humanos previstos nos planos de emergência de barragens e permitem a sua atualização e aperfeiçoamento.

Este projeto propõe o desenvolvimento de instrumentos para a mitigação do risco em barragens, mormente relacionados com o planeamento de emergência (PEI). Investe em abordagens interdisciplinares, como por exemplo o desenvolvimento de PEI transfronteiriços e a formação avançada de recursos humanos em planeamento de emergência. Neste último caso, propõe-se o desenvolvimento do PEI em ambiente *WEBSIG* por forma a permitir analisar, validar e até otimizar este tipo de planos, bem como proceder a simulações reais – simulacros, obviamente em pequena escala, seja por questões de redução de custos, seja por questões de redução do alarmismo social.

Assim, o presente projeto promoverá o conhecimento e o intercâmbio de experiências na área do planeamento de emergência entre instituições ibéricas dando resposta os princípios que constam da Diretiva Europeia da Água. Para além da avaliação das vulnerabilidades a jusante das barragens ibéricas com potencial para originar cheias induzidas com efeitos transfronteiriços, o presente projeto contribuirá para a melhoria a coordenação entre autoridades dos países afetados desenvolvendo uma plataforma de trabalho *on-line*. Desta forma, o projeto fornecerá um conjunto de instrumentos a utilizar de forma concertada pelos serviços e agentes de proteção civil de ambos os países, que os ajudará a responder de forma eficiente em situações de emergência, com vista a minimizar a perda de vidas e a reduzir os potenciais prejuízos económicos e ambientais.

5.7.3.2 *Objetivos*

A gestão do risco (*risk management*) e a avaliação do risco (*risk assessment*) são conceitos e metodologias em franco desenvolvimento com aplicação a diversos níveis (empresarial, institucional, temático, entre outros). O projeto visa contribuir para a aplicação destes conceitos no contexto da engenharia civil e da gestão de grandes infraestruturas (barragens) e pretende clarificar e consolidar aspetos associados à gestão do risco e planeamento de emergência em barragens em Portugal.

O objetivo principal é contribuir para a gestão do risco em barragens portuguesas através do desenvolvimento e a melhoria de novas ferramentas para a avaliação do risco e a gestão de situações de emergência provocadas por cheias decorrentes de acidentes em barragens, nomeadamente a rotura da infraestrutura. O presente projeto tem os seguintes objetivos específicos:

- desenvolver uma plataforma de trabalho *on-line*, fazendo uso das metodologias propostas e das novas tecnologias de comunicação por internet;
- demonstrar a exequibilidade do tipo de planos de emergência internos atualmente desenvolvidos em Portugal e preparar exercícios de teste de planos de emergência e de simulacros conjuntos com base nessa plataforma;
- avaliar o risco a casos de estudo reais de barragens portuguesas cuja rotura tem impacto transnacional e identificar as vulnerabilidades às inundações das áreas a jusante das barragens com potencial para originar efeitos adversos significativos de dimensão transfronteiriça em Portugal e Espanha;
- selecionar um caso piloto de uma barragem numa bacia internacional para caso de estudo: Douro, Tejo ou Guadiana;
- definir procedimentos padronizados, em Espanha e Portugal, para a mitigação do risco no vale a jusante de infraestruturas hidráulicas com efeitos transfronteiriços de uma forma consistente, evidenciando os respetivos benefícios e dificuldades associados e dotando as entidades ibéricas (donos de obra, Autoridades de Segurança de barragens e Sistemas de Proteção Civil) de uma capacidade operacional partilhada na análise e resposta a este tipo de risco.

5.7.3.3 *Metodologia proposta e planeamento das atividades*

A metodologia proposta inclui o seguinte conjunto de atividades:

Atividade 1 – *Revisão de conhecimentos e intercâmbio de experiências*

- ⇒ Tarefa 1.1: Identificação do estado de conhecimentos sobre legislação de segurança de barragens (normas de segurança e exploração, classificação do risco e planos de emergência)
- ⇒ Tarefa 1.2: Recolha de informação relacionada com os planos de emergência e comunicação do risco a diferentes atores (autoridades, público, “media” e organizações não

governamentais) bem como relacionada com sistemas de aviso à população em caso de emergência

⇒ Tarefa 1.3: Identificação e definição do conteúdo dos diferentes tipos de exercícios (seminário de orientação, exercício interno simples, exercício interno integrado (*tabletop exercise*) e exercício externo ou simulacro de rotura na barragem) para definição de um programa de exercícios em colaboração com a ANPC

Atividade 2 – Desenvolvimento e melhoria de ferramentas

⇒ Tarefa 2.1: Desenvolvimento de uma ferramenta para simulação de planos de emergência e estabelecimento de uma plataforma de trabalho *on-line* e uso das novas tecnologias de comunicação por internet entre os principais *stakeholders*

⇒ Tarefa 2.2: Desenvolvimento de um modelo de simulação da albufeira em *excel* para apoio ao programa de exercícios

⇒ Tarefa 2.3: Conceção e desenvolvimento de guiões para a realização de um exercício interno simples e de um *tabletop exercise* com as seguintes atribuições: i) identificação dos *stakeholders* que participam no exercício (controlador, participantes e avaliadores); ii) definição do cenário de acidente; iii) planeamento dos aspetos logísticos; iv) preparação das mensagens e v) preparação dos inquéritos para avaliação do exercício

⇒ Tarefa 2.4: Definição de medidas para a sensibilização, educação e treino da população na ZAS

Atividade 3 – Caracterização e seleção de casos de estudo

⇒ Tarefa 3.1: Identificação das barragens portuguesas de classe I e daquelas que têm o potencial para originar cheias induzidas com efeitos transfronteiriços

⇒ Tarefa 3.2: Recolha de informação sobre os estudos existentes de simulação de cheias induzidas por rotura das barragens com efeitos transfronteiriços (mapas de inundação)

⇒ Tarefa 3.3: Seleção de um caso piloto de uma barragem numa bacia hidrográfica internacional (ibérica)

⇒ Tarefa 3.4: Análise dos impactos e estimativa das vulnerabilidades por recurso à modelação das cheias induzidas por acidentes de barragens na bacia internacional em estudo, garantindo a uniformização de metodologias, de modelos e de critérios para as restantes barragens identificadas

Atividade 4 – Implementação e teste das metodologias

⇒ Tarefa 4.1: Realização de simulações de diferentes situações de emergência, visando a realização de seminários de orientação, exercícios internos simples, *tabletop exercises* e simulacros para os *stakeholders* dos casos pilotos

- ⇒ Tarefa 4.2: Desenvolvimento de guião e apoio ao Dono de Obra na preparação e participação na condução de um *tabletop exercise* para uma barragem portuguesa com impacto transfronteiriço e apoio à ANPC na preparação de um exercício de simulacro da rotura de uma barragem portuguesa com impacto transfronteiriço
- ⇒ Tarefa 4.3: Apoio à ANPC na preparação e realização de um simulacro da rotura de uma barragem portuguesa com impacto transfronteiriço promovendo a uniformização de critérios e meios de aviso e evacuação da população em risco
- ⇒ Tarefa 4.4: Desenvolvimento e proposta de procedimentos de mitigação do risco de cheias nas áreas de inundação de bacias internacionais de aplicação sistemática que se possam implementar em países da União Europeia com problemáticas análogas

Atividade 5 – Elaboração de documentos científicos

- ⇒ Tarefa 5.1: Elaboração de 2 comunicações a congressos nacionais e internacionais (◦)
- ⇒ Tarefa 5.2: Elaboração de 2 artigos para revistas (•)
- ⇒ Tarefa 5.3: Redação de 2 relatórios do LNEC (⊕)
- ⇒ Tarefa 5.4: Redação de duas dissertação de mestrado (*)

O Quadro 5.17 apresenta o cronograma com as atividades previstas.

Quadro 5.17 | Cronograma do Projeto 4.2

Tarefa	1º ano				2º ano				3º ano				4º ano			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1 – Revisão de conhecimentos																
2 – Desenvolvimento e melhoria de ferramentas																
3 – Seleção e caracterização de casos de estudo																
4 - Implementação e teste das metodologias																
5 – Elaboração de documentos científicos			◦	*			⊕	•			◦	*			⊕	•

5.7.3.4 Resultados esperados

Os resultados do projeto proposto podem ser subdivididos em específicos e em genéricos para o LNEC e em benefícios para a comunidade técnica e científica.

No que diz respeito aos resultados específicos para o LNEC, destacam-se:

- ⇒ Desenvolvimento e aplicação dos conhecimentos
- ⇒ Desenvolvimento de modelos, critérios e recomendações
- ⇒ Conciliação das abordagens na avaliação do risco de infraestruturas transfronteiriças
- ⇒ Consolidação de aspetos gerais associados à análise e apreciação dos riscos nomeadamente na participação, comunicação, decisão e responsabilidades
- ⇒ Desenvolvimento de um modelo para avaliação de danos associados a cheias induzidas;
- ⇒ Desenvolvimento de uma ferramenta para simulação de planos de emergência com a vantagem adicional de que permitirá estudar situações críticas, difíceis de reproduzir na realidade (simulacros em grande escala) devido aos elevados custos
- ⇒ Cartografia do risco de cheias dos vales a jusante das barragens com potencial para originar efeitos adversos significativos de dimensão transfronteiriça, incluindo a caracterização da perigosidade das cheias; mapas de vulnerabilidade das áreas de inundação e avaliação das perdas de vidas e dos danos em edificações e infraestruturas
- ⇒ Identificação das barragens com potencial para originar cheias induzidas com efeitos transfronteiriços

No que diz respeito aos resultados genéricos para o LNEC, são de salientar:

- ⇒ Atualização do “Estado da arte”
- ⇒ Aquisição de *know-how* com interesse prático e aplicabilidade no contexto nacional e ibérico
- ⇒ Aquisição de elementos para divulgação e formação
- ⇒ Estabelecimento e/ou promoção de:
 - uma plataforma de trabalhos de investigação científica (mestrado e doutoramento)
 - contactos internacionais e intercâmbio
 - um ponto focal de desenvolvimentos posteriores

No que diz respeito aos resultados para a comunidade técnica nacional, o contributo deste trabalho vai, igualmente, no sentido de permitir a:

- ⇒ Formação de quadros técnicos

- ⇒ Uniformização dos procedimentos de avaliação e mitigação do risco em áreas de inundação localizadas em bacias internacionais
- ⇒ Consolidação do LNEC como referência institucional no que se refere à gestão do risco e ao planeamento de emergência em barragens

5.7.3.5 Recursos necessários

Os recursos humanos previstos para o desenvolvimento deste projeto constam do Quadro 5.18 e são os seguintes:

- 2 meses de Investigador Auxiliar (IA) ou de Investigador Principal (IP)
- 3 meses de Técnico Superior
- 9 meses de Bolseiro de Iniciação à Investigação Científica LNEC
- 24 meses de Bolseiros de Mestrado com financiamento da FCT

Os bolseiros a trabalhar neste projeto deverão tentar obter uma Bolsa de Formação Avançada da FCT (<https://www.fct.pt/apoios/bolsas/concursos/>) para a realização dos mestrados.

Os custos atribuídos à rubrica “Obra” incluem a edição das dissertações de mestrado (Base: 10 exemplares; 100 páginas) e de dois relatórios do LNEC (Base: 5 exemplares; 50 páginas). Os custos atribuídos à rubrica “Materiais e serviços” incluem a compra de um computador portátil e de deslocações.

Quadro 5.18 | Estimativa dos recursos financeiros associados ao Projeto 4.2

Rúbrica	Designação	Tempo Quantidade	Valor unitário	Total €	
A	Materiais e serviços				
		Deslocações	6	500	3000
		Equipamento (Computador)			2000
		Total			5000
B	Pessoal				
		IA/IP	2	5700	11400
		Técnico Superior	3	3500	10500
		Bolseiro de Iniciação à investigação científica LNEC	9	1484	13356
		Total			35256
C	Obra				
		Edições			1500
		Total			1500
	2 Bolseiros de Mestrado da FCT	24	870	20880	
	Arredondamento			+108	
	Total (1,2A+2B+C)+D			99 000 €	

5.7.3.6 Potenciais parcerias e financiamentos

Para o desenvolvimento deste estudo no LNEC é necessária a participação do Núcleo de Ecologia do Departamento de Edifícios e do Grupo de Tecnologias da Informação em Água e Ambiente do DHA (GTI). Para este estudo é ainda recomendável o estabelecimento de parcerias com a APA e a ANPC. Procurar-se-á financiamento junto da FCT, através de candidaturas a bolsas de mestrado.

A nível internacional este programa deverá contar com a colaboração de instituições espanholas com interesse e experiência neste domínio: Centro de Estudios Y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Confederações hidrográficas dos rios Douro, Tejo ou Guadiana, Iberdrola, etc.. Foi recentemente submetida uma candidatura ao programa INTERREG que cobre a generalidade dos objetivos deste projeto não tendo sido financiada. A candidatura vai ser reformulada e novamente submetida.

PARTE B – PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

6 | PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

6.1 Considerações iniciais

O presente programa de Pós-graduação, que constitui a Parte B deste trabalho, destina-se a colmatar as necessidades de investigação identificadas no Programa de Investigação (Parte A) e as oportunidades de formação por este criado, designadamente atendendo aos recursos identificados nos Programas de Estudos apresentados no capítulo anterior.

Assim, apresenta-se e estrutura-se um programa e um leque conjugado de atividades na área da pós-graduação e da formação complementar, incluindo-se, designadamente, as propostas de realização de planos para cinco dissertações de mestrado e cinco teses de doutoramento na Área Científica de “*Engenharia de Recursos Hídricos e Obras Hidráulicas*”. Esta estratégia visa o enquadramento de jovens licenciados nas diversas áreas ligadas aos Programas de Estudos propostos e contemplam a apresentação de linhas-mestras de planos de dissertações de mestrado ou de doutoramento que podem ser desenvolvidas. Adicionalmente, estes Programas de Estudos propõem a realização de uma série de outras atividades no domínio da divulgação de *know-how* especializado, nomeadamente cursos de formação e ações de sensibilização com recurso a diversos meios e associando iniciativas internas e externas do LNEC.

Tal como já foi referido, propõe-se a realização de cinco teses de doutoramento e de cinco dissertações de mestrado para um período de oito anos previsto para o desenvolvimento deste Programa de Investigação (Figura 6.1 e Quadro 6.1). Os instrumentos a desenvolver abrangem as áreas da modelação física, experimental, numérica e *in situ*, e incluem, adicionalmente, um conjunto de metodologias de mitigação do risco e controlo de segurança em obras hidráulicas. As teses de doutoramento correspondem à criação e/ou desenvolvimento de modelos numéricos avançados bem como ao aprofundamento de conhecimento através de modelação física e experimental inovadora no NRE. Cada um dos Projetos 1.1, 1.2, 2.1, 3.1 e 3.2 terá adstrito um bolseiro (e uma tese de doutoramento) em dedicação total por quatro anos (48 meses). As dissertações de mestrado correspondem à criação e/ou desenvolvimento de metodologias e ferramentas para a gestão do risco em barragens para o NRE. Cada um dos restantes Projetos 2.2, 4.1 e 4.2 terão adstritos bolseiros (com dissertações de mestrado) em dedicação total por um ano (12 meses).

Os custos apresentados são relativos exclusivamente à atividade dos bolseiros, i.e., bolsa, missões e deslocações no país bem como custos relativos à edição da tese e consumíveis. O financiamento das bolsas resultará de candidaturas ao Programa de Bolsas de Formação Avançada da FCT (<https://www.fct.pt/apoios/bolsas/concursos/>), representando uma redução dos custos dos Programas de Estudos em que os bolseiros ficarão envolvidos. Assim, foram considerados os valores das bolsas de doutoramento e de iniciação à investigação científica conferidas pela FCT, i.e. 980 € para bolsas de doutoramento e 745 € para bolsas de mestrado; em ambos os casos se

adicionou os custos do SSV (125 €). Consideraram-se quatro anos para doutoramentos (53 040 €) e um ano para mestrados (10 440 €).

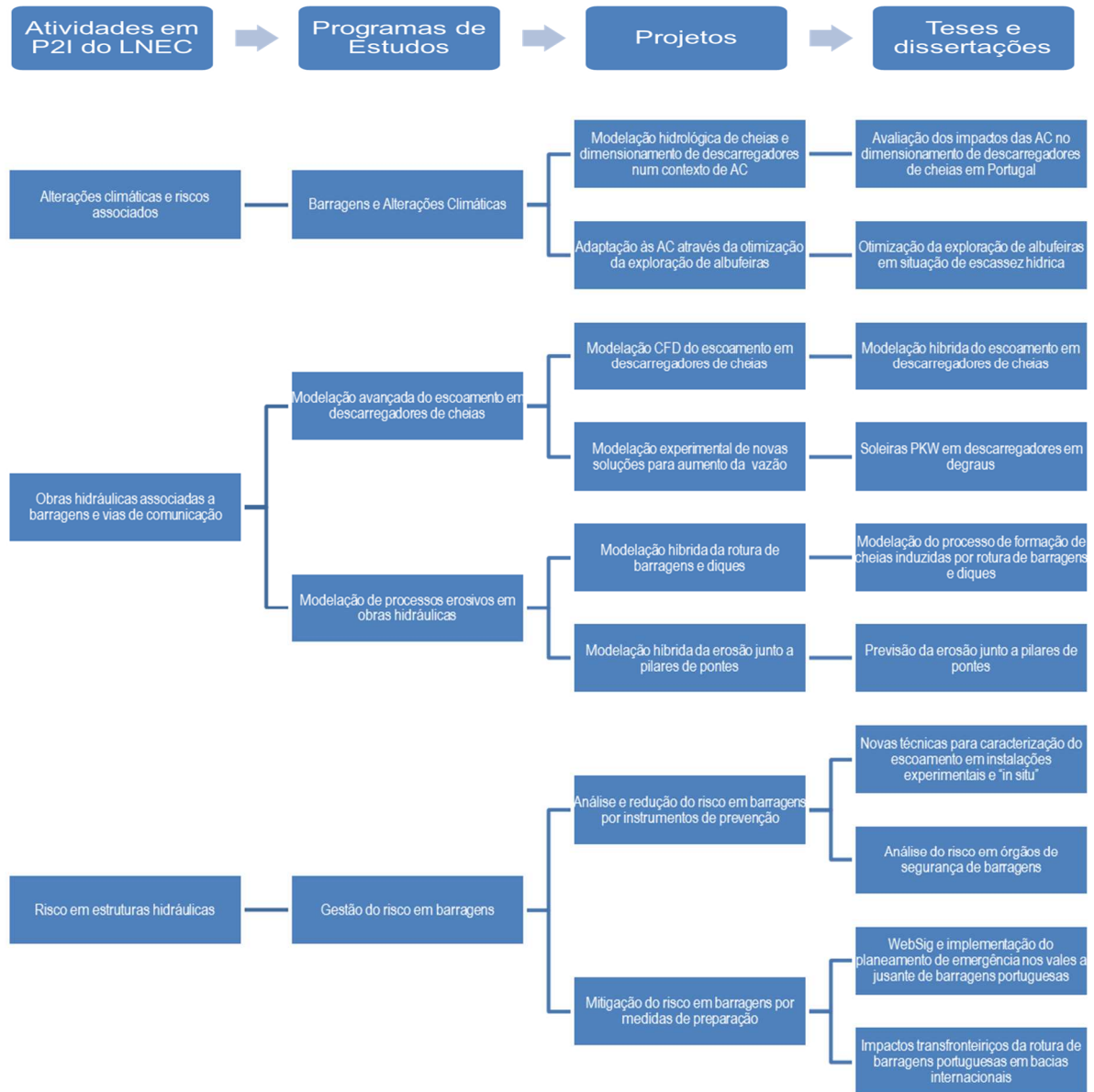


Figura 6.1 | Interligação do Programa de Pós-Graduação com as atividades em P2I do LNEC e com os Programas de Estudos e projetos propostos

	D1	D2	D3	D4	D5	M1	M2	M3	M4	M5
	Avaliação dos impactos das AC no dimensionamento de descarregadores de cheias em Portugal	Otimização da exploração de albufeiras em condições de escassez hídrica	Modelação histórica do escoamento em descarregadores de cheias	Modelação do processo de formação de cheias induzidas por rotura de barragens e diques	Previsão da erosão junto a pilares de pontes	Soleiras PKW em descarregadores em degraus	Novas técnicas para caracterização do escoamento em instalações experimentais e "in situ"	Análise do risco em órgãos de segurança de barragens	WebSig e implementação do planeamento de emergência nos vales a jusante de barragens portuguesas	Impactos transfronteiriços da rotura de barragens portuguesas em bacias internacionais
Tese e dissertações										
Programas de Estudos										
Barragens e alterações climáticas	Modelação hidrográfica de cheias e dimensionamento de descarregadores de cheias num contexto de AC									
	Adaptação às AC através da optimização da exploração de albufeiras	48 ●								
Modelação avançada do escoamento em descarregadores de cheias	Modelação CFD do escoamento em descarregadores de cheias		48 ●							
	Modelação experimental de novas soluções para aumento da vazão em descarregadores de cheias					12 ●				
Modelação de processos erosivos em obras hidráulicas	Modelação híbrida da rotura de barragens e diques			48 ●						
	Modelação híbrida da erosão junto a pilares de pontes				48 ●					
Gestão do risco em barragens	Análise e redução do risco em barragens por abordagens de prevenção						12 ●	12 ●		
	Mitigação do risco em barragens por abordagens de preparação								12 ●	12 ●

Quadro 6.1 | Relação entre os projetos dos Programas de Estudos e o Programa de Pós-Graduação

6.2 Doutoramento 1 - Avaliação dos impactos das alterações climáticas no dimensionamento de descarregadores de cheias em Portugal

6.2.1 Justificação

As obras hidráulicas devem ser dimensionadas para os caudais de ponta que tenham em consideração as AC, usando, por exemplo, curvas IDF projetadas para o futuro. Para as obras existentes deve, igualmente, ser revisto o período de retorno, com base num cenário de AC, verificando qual a sua real capacidade de vazão, de modo a se prever o risco associado.

A investigação proposta foca-se na modelação à escala regional dos processos meteorológicos e hidrológicos e consiste na aplicação de um modelo hidrológico distribuído por forma a determinar os valores dos caudais de cheia de dimensionamento de descarregadores que tenham em atenção as AC.

A tese contribuirá para o desenvolvimento do Projeto P1.1 “*Modelação hidrológica de cheias e dimensionamento de descarregadores num contexto de AC*” do Programa de estudos P1 “*As barragens e as AC*”.

6.2.2 Objetivos

O objetivo da tese é desenvolver uma metodologia para avaliação dos potenciais efeitos das AC nos eventos extremos, tendo em conta o dimensionamento de descarregadores de cheias. Esta metodologia será aplicada para caracterizar os efeitos das AC nos valores de caudais de dimensionamento de descarregadores de cheias em Portugal e permitirá identificar as estruturas que, em consequência das AC, podem ficar subdimensionadas. Identificam-se os seguintes objetivos operacionais:

- atualizar o estado da arte;
- selecionar cenários de AC e obter projeções de séries climáticas (precipitação);
- estudar e ganhar experiência com modelos para converter precipitação em escoamentos;
- estudar os efeitos das AC nas cheias;
- selecionar casos de estudo para ilustrar estes métodos;
- comparar cheias observadas e projetadas para as barragens em estudo e definir medidas de adaptação às AC.

6.2.3 Metodologia e planeamento de atividades

As atividades a desenvolver no âmbito desta tese de doutoramento são as seguintes:

Atividade 1 – Revisão de conhecimentos

⇒ Tarefa 1.1: Estudo dos efeitos das AC nas precipitações intensas e nas cheias em Portugal

- ⇒ Tarefa 1.2: Estudo de modelos de geração estocástica (*weather generator*) para criação de dados de precipitação sintéticos e do modelo Mike-River para conversão das precipitações intensas em caudais de cheia
- ⇒ Tarefa 1.3: Escolha de uma bacia hidrográfica (Tejo) e identificação das barragens a estudar e das estações climatológicas e hidrométricas localizadas nas sub-bacias definidas por estas barragens (sub-bacias de estudo)

Atividade 2 – Aquisição de dados e geração de escoamentos máximos históricos

- ⇒ Tarefa 2.1: Recolha de dados topográficos, uso de solo e climatológicos para as sub-bacias em estudo bem como de séries de escoamento registadas nas estações hidrométricas (caudais máximos anuais) e calibração do modelo Mike-River
- ⇒ Tarefa 2.2: Análise da qualidade, aplicação de modelos de distribuição de probabilidades e análise da adequação dos modelos ensaiados à série de registos de caudais máximos anuais
- ⇒ Tarefa 2.3: Cálculo de estimativas, designadamente dos caudais de cheia associados aos períodos de retorno de 100, 1000, 5000 e 10 000 anos

Atividade 3 – Modelação matemática e projeções

- ⇒ Tarefa 3.1: Recolha de séries de dados de projeções climáticas (precipitações diárias) simuladas pelos modelos regionais de clima (usando, por exemplo, a informação dos projetos ENSEMBLES ou CORDEX) e desagregação espacial e temporal
- ⇒ Tarefa 3.2: Análise estatística das precipitações obtidas na Tarefa 3.1 e obtenção das séries climáticas com vários séculos de duração por recurso a um modelo de geração estocástica
- ⇒ Tarefa 3.3: Simulação pelo modelo Mike-River das séries climáticas distribuídas espacialmente, obtidas na Tarefa 3.2, para cada sub-bacia em estudo e construção de séries com projeções de caudais máximos anuais

Atividade 4 – Comparação e medidas de adaptação

- ⇒ Tarefa 4.1: Caracterização estatística das séries hidrológicas obtidas na Tarefa 3.3, em termos de frequência, intensidade e duração dos picos de cheia
- ⇒ Tarefa 4.2: Aplicação de modelos de distribuição de probabilidades cálculo de estimativas, designadamente dos caudais máximos associados aos períodos de retorno de 100, 1000, 5000 e 10 000 anos
- ⇒ Tarefa 4.3: Comparação das estimativas dos caudais máximos observados e projetados para as barragens em estudo e conclusões
- ⇒ Tarefa 4.4: Definição de medidas de adaptação às AC, nomeadamente envolvendo alteração das regras de operação para as obras existentes

Atividade 5 – Elaboração de documentos científicos

⇒ Tarefa 5.1: Elaboração de 2 comunicações a congressos nacionais e internacionais (○)

⇒ Tarefa 5.2: Elaboração de 2 artigos para revistas (●)

⇒ Tarefa 5.3: Redação da tese de doutoramento (*)

O Quadro 6.2 apresenta um cronograma com a previsão do desenvolvimento das atividades previstas no âmbito da tese de doutoramento proposta.

Quadro 6.2 | Cronograma do doutoramento 1

Atividade \ Ano/ trimestre	1º ano				2º ano				3º ano				4º ano			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1 – Revisão de conhecimentos																
2 – Aquisição de dados e geração de escoamentos máximos históricos																
3 – Modelação matemática e projeções																
4 – Comparação e medidas de adaptação																
5 – Elaboração de documentos científicos								○	●			○	●			*

6.2.4 Custos

O Quadro 6.3 apresenta a previsão dos custos diretamente associados à realização da tese de doutoramento proposta.

Quadro 6.3 | Estimativa dos custos associados à tese de doutoramento 1

	Quantidade	Valor unitário (€)	Total (€)
Missões e deslocações no país	3	2000	6 000
Bolsa de doutoramento	48	1105	53 040
Consumíveis e outros			2 000
Total			61 040

6.3 Doutoramento 2 – Otimização da exploração de albufeiras em situação de escassez hídrica

6.3.1 Justificação

Em regiões mais suscetíveis à escassez de água, a exploração de albufeiras tem, usualmente, de responder à questão de como operar durante o período de seca, de modo a que os consumos sejam garantidos durante o maior período de tempo possível. Nos períodos de estiagem, a imprevisibilidade da chuva leva a adoção de medidas de racionalização do uso da água de modo a economizá-la e a poder utilizá-la durante um maior período de tempo. Os efeitos desta restrição podem ser ineficazes em virtude da perda por evaporação direta da albufeira. Com efeito, em regiões de clima mais seco, a precipitação média anual é muitas vezes concentrada em poucos meses e os níveis de evaporação são muito elevados ao longo de todo o ano.

A investigação proposta foca-se no estudo da melhor forma de usar o recurso “água” disponível numa albufeira de fins múltiplos, através da minimização dos custos económicos do não abastecimento devido ao racionamento e das perdas por evaporação. Nesta ótica propõe-se a realização de uma análise multicritério e o desenvolvimento de um modelo numérico de otimização da exploração de albufeiras como uma ferramenta de apoio à decisão.

A tese contribuirá para o desenvolvimento do Projeto P1.2 “Adaptação às AC através da *otimização da exploração de albufeiras*” do Programa de estudos P1 “*As barragens e as AC*”.

6.3.2 Objetivos

O objetivo da tese traduz-se no desenvolvimento do modelo de otimização para a operação de albufeiras usando ferramentas numéricas disponíveis (programação linear ou dinâmica linear ou métodos heurísticos). As situações abordadas são as seguintes: i) barragens não integradas em cascatas e sem sistemas de bombagem; ii) aproveitamentos de fins múltiplos apenas para rega e abastecimento público, estando excluídos fins de produção de hidroeletricidade.

Propõe-se uma linha de investigação que consiste na mitigação do risco de seca através da otimização da exploração de albufeiras, centrando-se nas barragens localizadas em regiões de alta suscetibilidade à desertificação do território por fatores físicos. Nestas regiões, a ocorrência de secas severas e persistentes, as significativas perdas de água por evaporação e a imprevisibilidade das chuvas obrigam à adoção de medidas de racionalização do uso da água.

O desenvolvimento do modelo numérico obriga à definição de critérios que, considerando os cenários de aflúncias e de estado de armazenamento de água na albufeira, constituam *triggers* para a implementação de medidas de mitigação do impacto das secas assim como de regras para restringir os usos ou definir a melhor política de transferência de água entre usos concorrentes, permitindo a identificação da melhor solução para a disponibilidade de água.

6.3.3 Metodologia e planeamento das atividades

A metodologia proposta inclui o seguinte conjunto de atividades:

Atividade 1 – *Revisão de conhecimentos*

- ⇒ Tarefa 1.1: Identificação do estado de conhecimentos em modelos de otimização da exploração de albufeiras de fins múltiplos
- ⇒ Tarefa 1.2: Identificação do estado de conhecimentos no domínio das secas, em particular, em Portugal e em regiões semiáridas (como por exemplo, na Comunidade dos Países de Língua Portuguesa (CPLP) e, em particular, Cabo Verde³¹)

Atividade 2 – *Desenvolvimento do modelo*

- ⇒ Tarefa 2.1: Estabelecimento de critérios para definição de *triggers* para a implementação de medidas de mitigação do impacto das secas, tendo em conta os cenários de afluências e de estado de armazenamento de água na albufeira
- ⇒ Tarefa 2.2: Definição de regras para restringir os usos ou definir a melhor política de transferência de água entre usos concorrentes (rega versus abastecimento público), assegurando a minimização dos prejuízos decorrentes da escassez de água
- ⇒ Tarefa 2.3: Definição da função objetivo que represente os critérios e as regras supracitadas, obedecendo aos seguintes requisitos principais: i) minimização das perdas por evaporação; ii) minimização dos custos económicos do não abastecimento devido ao racionamento de água
- ⇒ Tarefa 2.4: Desenvolvimento do modelo de otimização para a operação de albufeiras em situação de escassez hídrica usando ferramentas numéricas disponíveis (programação linear ou dinâmica linear ou métodos heurísticos)

Atividade 3 – *Aplicação do modelo aos casos de estudo*

- ⇒ Tarefa 3.1: Seleção de casos piloto que satisfaçam o requisito de representar o regime hidrológico de bacias hidrográficas definidas por barragens em regiões com suscetibilidade à desertificação (em Portugal ou em Cabo Verde)
- ⇒ Tarefa 3.2: Identificação das barragens localizadas nas bacias hidrográficas selecionadas (uma barragem portuguesa e outra Cabo-Verdiana, por exemplo) com vista à aplicação do modelo de otimização
- ⇒ Tarefa 3.3: Caracterização das bacias hidrográficas definidas pelas barragens em estudo e recolha de dados distribuídos do uso do solo e coberto vegetal

³¹ Com efeito, foram construídas recentemente neste país uma dezena de barragens e a otimização da exploração das respetivas albufeiras constitui uma questão em aberto.

⇒ Tarefa 3.4: Recolha de dados históricos de precipitação e evaporação para as bacias hidrográficas definidas pelas barragens em estudo

Tarefa 3.5: Uso do modelo de otimização e realização de simulações para diferentes cenários

Atividade 4 – Mitigação do risco

⇒ Tarefa 4.1: Proposta de uma metodologia concreta para definição da política de exploração de albufeiras em situação de escassez hídrica

⇒ Tarefa 4.2: Desenvolvimento e proposta de procedimentos de mitigação do risco de secas em regiões semiáridas de aplicação sistemática que se possam implementar em regiões com problemáticas análogas

Atividade 5 – Elaboração de documentos científicos

⇒ Tarefa 5.1: Elaboração de 2 comunicações a congressos nacionais e internacionais (◦)

⇒ Tarefa 5.2: Elaboração de 2 artigos para revistas (•)

⇒ Tarefa 5.3: Redação da tese de doutoramento (*)

O Quadro 6.4 apresenta um cronograma com a previsão do desenvolvimento das atividades previstas no âmbito da tese de doutoramento proposta.

Quadro 6.4 | Cronograma do doutoramento 2

Ano/ trimestre \ Atividade	1º ano				2º ano				3º ano				4º ano			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1 – Revisão de conhecimentos																
2 – Desenvolvimento do modelo																
3 – Aplicação do modelo aos casos de estudo																
4 – Mitigação do risco																
5 – Elaboração de documentos científicos					◦			•	◦			•				*

6.3.4 Custos

O Quadro 6.5 apresenta a previsão dos custos associados à realização da tese de doutoramento.

Quadro 6.5 | Estimativa dos custos associados ao doutoramento 2

	Quantidade	Valor unitário (€)	Total (€)
Missões e deslocações no país	3	2000	6 000
Bolsa de doutoramento	48	1105	53 040
Consumíveis e outros			2 000
Total			61 040

6.4 Doutoramento 3 - Modelação híbrida do escoamento em descarregadores de cheias

6.4.1 Justificação

Nos descarregadores de cheias, a intensidade da turbulência, o campo de velocidades complexo e o intenso emulsão de ar são frequentemente impostos pela complexidade da geometria das formas de entrada, dos canais e túneis bem como das estruturas de dissipação de energia. Com a presente tese de doutoramento pretende-se usar e melhorar o modelo de *software* livre IHFoam para aplicações no âmbito das estruturas hidráulicas, i.e., para a modelação das características de escoamentos turbulentos e altamente arejados sobre geometrias complexas.

Desenvolver-se-á essencialmente trabalho numérico que se centra na modelação de escoamentos bifásicos (modelos de entrada e transporte/arrastamento de ar) e da turbulência. Os resultados da modelação numérica serão comparados com medições *in situ* e provenientes de modelos físicos de barragens recentemente ensaiadas no LNEC por forma a estimar a incerteza associada aos resultados do modelo numérico. Assim, estas medições possibilitam alargar o âmbito de aplicação da investigação já realizada e garantir uma calibração que permitirá ao NRE ganhar competência na modelação numérica do escoamento em estruturas hidráulicas.

A tese contribuirá para o desenvolvimento do Projeto P2.1 “*Modelação CFD do escoamento em descarregadores de cheias*” do Programa de Estudos P2 “*Modelação avançada do escoamento em descarregadores de cheias*”.

6.4.2 Objetivos

O objetivo central da tese é a melhoria de um programa CFD que permita simular e caracterizar o escoamento em descarregadores de cheias de barragens. O modelo será validado com base em resultados que derivam de modelos físicos de descarregadores existentes no NRE e de dados adquiridos *in situ* (em protótipo) na bacia de impacto do descarregador de Foz Tua. Os objetivos específicos da tese de doutoramento proposta são os seguintes:

- estudar programas de geração de malhas;
- estudar a turbulência e os respetivos modelos de modelação;
- estudar modelos de entrada e transporte/arrastamento de ar (*air-entrainment*);
- desenvolver rotinas de cálculo baseadas em modelos conceptuais que descrevam o processo de entrada e arrastamento de ar em descarregadores de cheias;
- tratar dados adquiridos em modelo físico e *in situ* na bacia de impacto do descarregador do AHFT;
- realizar uma análise comparativa entre os resultados de modelos físicos e numéricos;
- implementar no NRE o uso de um modelo numérico que funcione em paralelo com os modelos físicos.

6.4.3 Metodologia e planeamento de atividades

As atividades a desenvolver no âmbito desta tese de doutoramento são as seguintes:

Atividade 1 – Revisão de conhecimentos

- ⇒ Tarefa 1.1: Revisão de conhecimentos no domínio dos modelos para geração de malhas
- ⇒ Tarefa 1.2: Revisão de conhecimentos no domínio dos modelos de turbulência
- ⇒ Tarefa 1.3: Revisão de conhecimentos no domínio dos modelos de escoamentos bifásicos

Atividade 2 – Melhoria do modelo CFD IHFoam para a modelação do escoamento em descarregadores

- ⇒ Tarefa 2.1: Desenvolvimento de subrotinas para pré e pós processamento de dados
 - Escolha do *software* para construção da geometria do descarregador e geração da malha
 - Escolha do programa para pós-processamento e visualização de resultados
 - Desenvolvimento de subrotinas
- ⇒ Tarefa 2.2: Desenvolvimento de subrotinas que descrevam o escoamento em descarregadores de cheias
 - Escolha do modelo de turbulência e desenvolvimento de subrotinas para LES
 - Desenvolvimento de subrotinas para modelação modelos de entrada e transporte/arrastamento de ar
- ⇒ Tarefa 2.3: Codificação e *debugging* do novo modelo

Atividade 3 – Modelação física e tratamento de dados experimentais e in situ

- ⇒ Tarefa 3.1: Levantamento de dados nos modelos físicos em canal: perfil da superfície livre, velocidades e campo de pressões
- ⇒ Tarefa 3.2: Tratamento dos dados adquiridos no modelo físico e *in situ* em protótipo na bacia de impacto do descarregador de Foz Tua, nomeadamente campo de velocidades e análise espectral das flutuações de pressões (*vide* 5.7.2)

Atividade 4 – Modelação CFD e calibração e validação do modelo

- ⇒ Tarefa 4.1: Modelação do escoamento em descarregadores em canal e calibração pela análise comparativa com resultados dos modelos físicos (análises quantitativas e qualitativas de alturas de água, pressões e velocidades)
- ⇒ Tarefa 4.2: Modelação do escoamento no descarregador da barragem de Foz Tua e validação através de:

- medições em modelo físico das pressões e flutuações de pressão
- medições *in situ* de pressões e flutuações de pressão

Atividade 5 – Elaboração de documentos científicos

- ⇒ Tarefa 5.1: Elaboração de 2 comunicações a congressos nacionais e internacionais (○)
- ⇒ Tarefa 5.2: Elaboração de 2 artigos para revistas (●)
- ⇒ Tarefa 5.3: Redação da tese de doutoramento (*)

O Quadro 6.6 apresenta um cronograma com a previsão do desenvolvimento das atividades previstas no âmbito da tese de doutoramento proposta.

Quadro 6.6 | Cronograma do doutoramento 3

Atividade	1º ano				2º ano				3º ano				4º ano			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1 – Revisão de conhecimentos																
2 – Melhoria do modelo CFD IHFoam																
3 – Modelação física e tratamento de dados experimentais e <i>in situ</i>																
4 – Modelação CFD e validação do modelo																
5 – Elaboração de documentos científicos								○			○	●			●	*

6.4.4 Custos

O Quadro 6.7 apresenta a previsão dos custos diretamente associados à realização da tese de doutoramento proposta.

Quadro 6.7 | Estimativa dos custos associados ao doutoramento 3

	Quantidade	Valor unitário (€)	Total (€)
Missões e deslocações no país	3	2000	6 000
Bolsa de doutoramento	12	1105	13 260
Bolsa de Pos-doutoramento	16	1620	58320
Consumíveis e outros			2 000
Total			79 580

6.5 Mestrado 1 – Soleiras PKW em descarregadores em degraus

6.5.1 Justificação

O estudo de órgãos de descarga não convencionais tem-se intensificado nas últimas décadas, tendo a procura de novas soluções vindo a ser desenvolvida com o objetivo de reduzir o custo do descarregador, que pode chegar a atingir cerca de 40% do custo global da barragem. As soleiras do tipo PKW constituem uma solução relativamente recente e as referências bibliográficas à data são pouco numerosas. Por outro lado, estes tipos de soleiras emulsionam maiores concentrações de ar em relação às soleiras do tipo WES, esperando-se atingir o regime uniforme numa fase mais inicial, o que poderá influenciar as dimensões e características das obras de dissipação de energia a jusante do descarregador de cheias.

Com a presente dissertação de mestrado pretende-se estudar a vazão de soleiras PKW e a dissipação de energia em descarregadores em degraus (e de paramento liso) dotados deste tipo de soleiras. A modelação experimental visa igualmente o ganho de experiência na medição da concentração do ar em estruturas hidráulicas.

A dissertação tem uma abordagem essencialmente experimental, que será conduzida numa instalação existente no NRE (instalação para estudo de descarregadores em degraus). Para além do estudo da vazão em soleiras descarregadoras do tipo PKW pretende-se analisar os seguintes aspetos: altura do escoamento, dissipação de energia ao longo dos degraus e concentrações de ar. Para a medição desta última grandeza será utilizado um tubo de Pitot modificado e testado um novo sensor.

A tese contribuirá para o desenvolvimento do Projeto P2.2 “*Modelação experimental de novas soluções para aumento da vazão em descarregadores de cheias*” do Programa de Estudos P2 “*Modelação avançada do escoamento em descarregadores de cheias*”.

6.5.2 Objetivos

A dissertação de mestrado visa contribuir para o avanço do conhecimento do desempenho de soleiras do tipo PKW e das técnicas de medição de grandezas do escoamento com superfície livre, com especial ênfase na concentração de ar. Os objetivos específicos da dissertação proposta são os seguintes:

- testar vários tipos de soleiras PWK, em particular do tipo B, C e D, para comparar as capacidades de vazão com uma soleira tipo A e WES;
- comparar a dissipação de energia para cada tipo de soleira, considerando a jusante da soleira descarregadora as opções de: canal com degraus (2 cm, 4 cm ou 8 cm) e canal de paramento liso, a jusante;
- caracterizar o escoamento de emulsão ar-água para as situações de canal com degraus e liso, a jusante da soleira descarregadora, para comparar a dissipação de energia.

Serão utilizados dois sensores diferentes e definido um conjunto de ensaios que os permita testar de forma a avaliar experimentalmente o seu desempenho e realizar uma análise comparativa das respetivas medições.

6.5.3 Metodologia e planeamento das atividades

As atividades a desenvolver no âmbito desta dissertação de mestrado são as seguintes:

Atividade 1 – Revisão de conhecimentos

- ⇒ Tarefa 1.1: Identificação do estado de conhecimentos no domínio das soleiras PKW
- ⇒ Tarefa 1.2: Análise das características do escoamento em descarregadores em degraus (alturas características e equivalente do escoamento de emulsão de ar-água e concentrações de ar)
- ⇒ Tarefa 1.3: Identificação do estado de conhecimentos na área da medição de alturas de água e técnicas de processamento de imagens bem como de concentração de ar em escoamentos de emulsão ar-água

Atividade 2 – Preparação da instalação experimental e escolha do equipamento de medição

- ⇒ Tarefa 2.1: Dimensionamento da soleira descarregadora PKW do tipo B
- ⇒ Tarefa 2.2: Adaptação da instalação experimental: i) soleira PKW do tipo B; ii) canal com paramento liso
- ⇒ Tarefa 2.3: Escolha do equipamento para medição da concentração de ar

Atividade 3 – Realização de ensaios

- ⇒ Tarefa 3.1: Medição de vazões da soleira descarregadora PKW do tipo B
- ⇒ Tarefa 3.2: Medição de alturas representativas do escoamento (perfis da superfície livre, velocidades do escoamento e concentrações de ar) ao longo do canal descarregador com degraus de 8 cm de altura e com paramento liso

Atividade 4 – Tratamento dos dados

- ⇒ Tarefa 4.1: Tratamento dos dados de vazão e análise comparativa de coeficientes de vazão das soleiras WES e PKW tipo A e B
- ⇒ Tarefa 4.2: Comparação da taxa de dissipação de energia ao longo do canal para degraus com 8 cm de altura e paramento liso

Atividade 5 – Elaboração de documentos científicos

- ⇒ Tarefa 5.1: Elaboração de uma comunicação a um congresso nacional ou internacional (◦)

⇒ Tarefa 5.3: Redação da dissertação de mestrado (*)

O Quadro 6.8 apresenta um cronograma com a previsão do desenvolvimento das atividades previstas no âmbito da dissertação de mestrado proposta.

Quadro 6.8 | Cronograma do mestrado 1

Atividade	1º T			2º T			3º T			4º T		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1 – Revisão de conhecimentos												
2 – Preparação da instalação experimental e escolha do equipamento de medição												
3 – Realização de ensaios												
4 – Tratamento de dados												
5 – Elaboração de documentos científicos									o			*

6.5.4 Custos

O Quadro 6.9 apresenta a previsão do custos diretamente associados à realização da dissertação de mestrado proposta.

Quadro 6.9 | Estimativa dos custos associados ao mestrado 1

	Quantidade	Valor unitário (€)	Total (€)
Deslocações no país	2	500	1 000
Bolsa de mestrado FCT (745 € + SSV)	12	870	10 440
Consumíveis e outros			1 000
Total			12 440

6.6 Doutoramento 4 - Modelação do processo de formação de cheias induzidas por rotura de barragens e diques

6.6.1 Justificação

A simulação da cheia induzida pela rotura de uma barragem obriga à modelação de dois processos distintos: o processo de formação da cheia induzida, que se relaciona com a evolução temporal da brecha que se forma no corpo da barragem e o correspondente hidrograma efluente, e o processo de propagação da cheia induzida ao longo do vale a jusante. A modelação numérica do processo de formação da cheia induzida tem sido empreendida especialmente desde a década de 1980, sendo de uma forma geral, usados modelos paramétricos onde o caudal efluente é calculado “modelando” a brecha como um descarregador de soleira espessa de dimensões variáveis no tempo.

A evolução temporal da brecha depende de uma interação entre a fenómenos geotécnicos do aterro e hidrodinâmicos do escoamento pelo que modelos baseados em métodos físicos, i.e., considerando a rotura geotécnica do aterro e sua interação com a erosão hidrodinâmica. Trata-se de um processo complexo cuja cabal caracterização não foi suficientemente feita até à data e que carece de informação fidedigna sobre roturas em barragens, para empreender não só a modelação numérica do processo de evolução da brecha, como também para realizar com sucesso os respetivos processos de validação e de calibração.

Com a presente tese de doutoramento pretende-se melhorar a capacidade atual de modelar o processo de formação da brecha em aterros sujeitos ao galgamento por forma a obter hidrogramas efluentes mais precisos. Em particular serão caracterizados em pormenor os fenómenos hidrodinâmicos e da mecânica do transporte sólido envolvidos na formação e evolução da brecha por forma a incorporá-los na modelação numérica da rotura gradual, por galgamento, de aterros. Serão estudadas barragens de aterro homogéneas e com sistemas de drenagem interna semelhantes aos existentes em barragens reais (para avaliar a influência da existência de sistemas) e diques (para avaliar a influência do escoamento não ortogonal).

A tese contribuirá para o desenvolvimento do Projeto P3.1 “*Modelação híbrida da rotura de barragens e diques*” do Programa de Estudos P3 “*Modelação de processos erosivos em obras hidráulicas*”.

6.6.2 Objetivos

O objetivo central da tese é o desenvolvimento de um programa CFD que permita modelar o processo de formação da brecha. O modelo será validado com base em resultados experimentais. Os objetivos específicos da tese de doutoramento proposta são os seguintes:

- realizar ensaios em aterros envolvendo: a) o estudo do comportamento geotécnico realista conferido por uma escolha criteriosa dos materiais do corpo dos aterros, com solos com teores de argila adequados; b) a avaliação da influência da existência de sistemas de

- drenagem interna, semelhantes aos existentes em barragens reais; c) o alargamento do estudo para diques, para avaliação a influência do escoamento não ortogonal;
- obter uma descrição teórica mais precisa dos fenómenos geotécnicos e hidrodinâmicos envolvidos no processo de rotura por galgamento, especificamente no que diz respeito à relação entre o processo de “alargamento” da brecha e o aumento da vazão e formular modelos conceptuais da evolução temporal da brecha e do caudal escoado, com ênfase no caudal de ponta;
 - desenvolver um modelo numérico, abrangendo tanto os aspetos da geotecnia como os hidráulicos no processo de formação da brecha em aterros.

Para atingir os objetivos propostos desenvolver-se-á trabalho laboratorial baseado em ensaios controlados em modelo reduzido de diques e barragens de aterro. Recolher-se-ão dados que permitirão construir modelos conceptuais da evolução da brecha e do caudal escoado. Estes modelos contribuirão para reduzir a incerteza associada à estimação da cheia extrema decorrente da rotura de barragens de aterro, permitindo melhorar o desempenho das ferramentas de modelação matemáticas existentes. Os dados experimentais a obter servirão ainda para a calibração e validação de modelos numéricos de rotura de aterros.

6.6.3 Metodologia e planeamento de atividades

A proposta metodológica compreende trabalho laboratorial, numérico e teórico. Propõe-se levar a cabo uma extensa campanha de ensaios em modelo reduzido de diques e barragens de aterro homogéneas e dotadas de sistemas internos de drenagem com instrumentação inovadora. O trabalho laboratorial decorrerá numa instalação construída para o efeito no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Os modelos conceptuais basear-se-ão na análise dos resultados experimentais. As atividades a desenvolver no âmbito desta tese de doutoramento são as seguintes:

Atividade 1 – Revisão de conhecimentos

- ⇒ Tarefa 1.1: Identificação do estado de conhecimentos no domínio da rotura por galgamento de diques e barragens de aterro
- ⇒ Tarefa 1.2: Recolha de dados de campo nomeadamente envolvendo a rotura dos diques de Mondego (2001 e 2016)

Atividade 2 – Modelação e tratamento de dados experimentais

- ⇒ Tarefa 2.1: Adaptação da instalação (atualmente a decorrer)
- ⇒ Tarefa 2.2: Realização de ensaios com diques e barragens de perfis homogéneos e dotadas de sistemas de drenagem interna
- ⇒ Tarefa 2.3: Medição dos perfis de velocidade e monitorização da evolução temporal da brecha e tratamento dos dados

Atividade 3 – Desenvolvimento de subrotinas para a modelação do escoamento efluente de brechas em aterros

- ⇒ Tarefa 3.1: Desenvolvimento de um modelo conceptual para descrever o escoamento efluente da brecha e a rotura geotécnica do aterro
- ⇒ Tarefa 3.2: Escrita da formulação matemática do modelo
- ⇒ Tarefa 3.3: Codificação e *debugging* do novo modelo

Atividade 4 – Modelação numérica, calibração e validação

- ⇒ Tarefa 4.1: Modelação e validação com dados experimentais
- ⇒ Tarefa 4.2: Modelação e validação com dados históricos, nomeadamente da rotura dos diques do Mondego (2001 e 2016)

Atividade 5 – Elaboração de documentos científicos

- ⇒ Tarefa 5.1: Elaboração de 2 comunicações a congressos nacionais e internacionais (○)
- ⇒ Tarefa 5.2: Elaboração de 2 artigos para revistas (●)
- ⇒ Tarefa 5.3: Redação da tese de doutoramento (*)

O Quadro 6.10 apresenta um cronograma com a previsão do desenvolvimento das atividades previstas.

Quadro 6.10 | Cronograma do doutoramento 4

Atividade \ Ano/ trimestre	1º ano				2º ano				3º ano				4º ano			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1 – Revisão de conhecimentos																
2 – Modelação e tratamento de dados experimentais																
3 – Desenvolvimento de subrotinas para a modelação do escoamento efluente de brechas em aterros																
4 – Modelação numérica, calibração e validação																
5 – Elaboração de documentos científicos					○				○			●			●	*

6.6.4 Custos

O Quadro 6.11 apresenta a previsão dos custos diretamente associados à realização da tese de doutoramento proposta.

Quadro 6.11 | Estimativa dos custos associados ao doutoramento 4

	Quantidade	Valor unitário (€)	Total (€)
Missões e deslocações no país	3	2000	6 000
Bolsa de doutoramento	48	1105	53 040
Consumíveis e outros			2 000
Total			61 040

6.7 Doutoramento 5 – Previsão da erosão junto a pilares de pontes

6.7.1 Justificação

As erosões localizadas junto de fundações de pontes construídas em leitos aluvionares são uma causa frequente de danos estruturais ou de colapso destas obras de arte. A análise, avaliação, monitorização ou previsão das variações de cota do fundo dos leitos aluvionares, generalizadas ou localizadas, são extremamente importantes para o diagnóstico e garantia das respetivas condições de segurança.

O tópico da erosão junto a pilares e encontros de ponte tem sido amplamente investigado, mormente por recurso a abordagens empíricas, campanhas experimentais e, mais recentemente, simulações numéricas. Não obstante estes avanços, há ainda falta de dados experimentais sobre a geometria da cavidade de erosão, nomeadamente através da aplicação de técnicas de imagem avançada. Por outro lado, aliada a alguns avanços da tecnologia de instrumentação laboratorial, tem-se assistido a um crescente desenvolvimento da modelação numérica do processo erosivo em torno de pilares de pontes, nomeadamente de ferramentas de dinâmica de fluidos computacional (CFD), para a qual é fundamental dispor de dados da morfologia do leito que permitam a calibração e a validação desses modelos.

O objetivo central da tese é caracterizar em pormenor os fenómenos hidrodinâmicos e da mecânica do transporte sólido envolvidos na formação da cavidade de erosão junto a pilares simples de pontes usando avanços da tecnologia de instrumentação laboratorial no que diz respeito à medição da turbulência junto aos pilares por ação escoamento (uso de ADV) e do volume erodido no (aplicação de técnicas de imagem avançada). Pretende-se igualmente melhorar a capacidade atual de modelar numericamente o processo erosivo em torno de fundações de pontes, usando ferramentas de dinâmica de fluidos computacional (CFD) e aprofundando o conhecimento em modelação da turbulência por abordagens do tipo LES.

Para atingir os objetivos propostos desenvolver-se-á trabalho laboratorial no CIV do LNEC para simular os ensaios considerados mais importantes da tese Moreno, 2016 e recolher dados adicionais. Em particular, serão gerados DTM da cavidade de erosão em vários momentos dos ensaios e caracterizada a turbulência do escoamento. Estes dados contribuirão para reduzir a incerteza associada à estimação da erosão e servirão para a calibração dos modelos de turbulência e de modelação do escoamento bifásico água-sedimento do modelo CFD escolhido.

A tese contribuirá para o desenvolvimento do Projeto P3.2 “*Modelação híbrida da erosão junto a pilares de pontes*” do Programa de Estudos P3 “*Modelação de processos erosivos em obras hidráulicas*”.

6.7.2 Objetivos

O objetivo central da tese de doutoramento é contribuir para o aprofundamento dos conhecimentos acerca do fenómeno de erosão junto a pilares de pontes em leitos aluvionares, com base na

caracterização de pormenor dos fenómenos hidrodinâmicos e da mecânica do transporte sólido envolvidos na formação e evolução da cavidade de erosão.

Em particular propõe-se uma abordagem experimental que permita caracterizar cabalmente a cavidade de erosão, uma vez que tradicionalmente esta é apenas caracterizada por medições pontuais que permitem apenas identificar a profundidade máxima, fazendo uso de tecnologia de aquisição avançadas e baseadas no tratamento de imagens. O trabalho laboratorial decorrerá no CIV do LNEC.

A proposta metodológica compreende ainda a simulação de um caso de estudo real usando o *software* FLOW-3D.

Identificam-se, assim, os seguintes objetivos operacionais:

- aplicar técnicas experimentais inovadoras para a medição das variáveis que caracterizam a turbulência e a erosão junto a cavidades de erosão;
- identificar as rotinas de cálculo automático que melhor descrevem a evolução temporal da cavidade de erosão e ganhar experiência de modelação CFD no que concerne a modelação da turbulência e da erosão;
- desenvolver formulações que permitam uma reprodução da geometria de cavidades e da sua relação com a profundidade de erosão, parâmetro usualmente utilizado no dimensionamento das fundações de pontes;
- comparar resultados experimentais e os obtidos por simulação numérica;
- simular numericamente a erosão junto a pilares de um caso de estudo real.

6.7.3 Metodologia e planeamento de atividades

As atividades a desenvolver no âmbito desta tese de doutoramento são as seguintes:

Atividade 1 – *Revisão de conhecimentos e adaptação de instalações*

- ⇒ Tarefa 1.1: Identificação do estado de conhecimentos no domínio da erosão junto a pilares de pontes
- ⇒ Tarefa 1.2: Identificação das tecnologias existentes para medição da erosão por processamento de imagem
- ⇒ Tarefa 1.3: Adaptação da instalação experimental

Atividade 2 – *Modelação experimental e tratamento de dados*

- ⇒ Tarefa 2.1: Análise do trabalho experimental previamente feito no LNEC (Moreno, 2016) e escolha dos casos a aprofundar com novos ensaios
- ⇒ Tarefa 2.2: Realização de novos ensaios com medição mais rigorosa da erosão, envolvendo a caracterização cabal da cavidade de erosão, e, em simultâneo, com a medição das velocidades junto à cavidade

⇒ Tarefa 2.3: Medição dos perfis de velocidade e monitorização da evolução temporal da erosão.

⇒ Tarefa 2.4: Tratamento dos dados

Atividade 3 – Modelação numérica (uso do modelo comercial FLOW-3D para simulação da evolução temporal da cavidade de erosão)

⇒ Tarefa 3.1: Geração da malha com geometria do CIV e do sistema a modelar (caixas de areia e pilares)

⇒ Tarefa 3.2: Modelação numérica dos ensaios realizados

⇒ Tarefa 3.3: Comparação dos dados experimentais e numéricos e calibração do modelo FLOW-3D

Atividade 4 – Aplicação a um caso de estudo

⇒ Tarefa 4.1: Seleção de um caso de estudo (ponte da Chamusca, ponte Rainha Dona Amélia, no Tejo ou ponte Hintze Ribeiro, no Douro)

⇒ Tarefa 4.2: Simulação numérica do caso de estudo

Atividade 5 – Elaboração de documentos científicos

⇒ Tarefa 5.1: Elaboração de 2 comunicações a congressos nacionais e internacionais (◦)

⇒ Tarefa 5.2: Elaboração de 2 artigos para revistas (•)

⇒ Tarefa 5.3: Redação da tese de doutoramento (*)

O Quadro 6.12 apresenta um cronograma com o desenvolvimento das atividades previstas.

Quadro 6.12 | Cronograma do doutoramento 5

Atividade	1º ano				2º ano				3º ano				4º ano			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1 – Revisão de conhecimentos																
2 – Modelação experimental e tratamento de dados																
3 – Modelação numérica																
4 – Aplicação a um caso de estudo																
5 – Elaboração de documentos científicos					◦			•	◦			•				*

6.7.4 Custos

O Quadro 6.13 apresenta a previsão dos custos diretamente associados à realização da tese de doutoramento proposta.

Quadro 6.13 | Estimativa dos custos associados ao doutoramento 5

	Quantidade	Valor unitário (€)	Total (€)
Missões e deslocações no país	3	2000	6 000
Bolsa de doutoramento	48	1105	53 040
Consumíveis e outros			2 000
Total			61 040

6.8 Mestrado 2 - Novas técnicas para caracterização do escoamento em instalações experimentais e *in situ*

6.8.1 Justificação

O estudo do comportamento de estruturas hidráulicas compreende o conhecimento de alturas de água, velocidades e das variações de pressão ao longo das mesmas. Dispor de métodos de instrumentação que permitam estimar, tão exatamente quanto possível, a altura do escoamento (compreendendo a emulsão de ar), a pressão, a velocidade e o caudal é a condição basilar para o funcionamento das instalações experimentais que estudem o desempenho de estruturas hidráulicas.

A medição de grandezas hidráulicas em protótipo é também uma atividade muito importante para o conhecimento cabal das ações nas estruturas hidráulicas e da resposta das mesmas. Em particular, a determinação das características da distribuição das pressões médias e suas flutuações (“*dynamic pressures analysis*”) é de grande importância em hidráulica de estruturas, nomeadamente para o conhecimento do processo de dissipação de energia em bacias de dissipação ou de impacto e para o seu correto dimensionamento. Este tipo de medição é raramente feito em protótipo e a informação derivada é de difícil obtenção, pelo que estas medições permitem tecer conclusões no que diz respeito à validade dos resultados de modelos numéricos, calibrados com informação laboratorial obtida em instalações de pequena e média dimensão, envolvendo indesejáveis efeitos de escala.

Com a presente dissertação de mestrado pretende-se ganhar experiência em observação e monitorização de grandezas (pressões e flutuações de pressão) em protótipo. Serão igualmente realizados ensaios em modelo físico. A comparação de resultados do modelo físico e do protótipo permitirá discutir os erros associados ao processo de extrapolação de resultados laboratoriais para o protótipo e os possíveis erros associados aos efeitos de escala.

A tese contribuirá não só para o Programa de Estudo P4 “*Gestão do risco em barragens*” como ainda para o desenvolvimento do Programa de Estudo P2 “*Modelação avançada do escoamento em descarregadores de cheias*”.

6.8.2 Objetivos

A dissertação visa em primeiro lugar contribuir para o avanço das técnicas de medição de grandezas do escoamento com superfície livre. Apesar de incluir ensaios com medição de níveis e velocidades, será dada ênfase às pressões e flutuações de pressão medidas *in situ*.

Um segundo objetivo da tese é a comparação de resultados em modelo físico e em protótipo para avaliar os erros associados ao processo de extrapolação de resultados laboratoriais para o protótipo, nomeadamente os associados aos efeitos de escala. Estes objetivos serão concretizados com base na recolha e tratamento de informação colhida na bacia de impacto do AHFT e no respetivo modelo físico.

6.8.3 Metodologia e planeamento das atividades

As atividades a desenvolver no âmbito desta tese de doutoramento são as seguintes:

Atividade 1 – *Revisão de conhecimentos*

⇒ Tarefa 1.1: Identificação do estado de conhecimentos no domínio da medição de grandezas hidráulicas: i) níveis de água; ii) velocidades e iii) pressões

Atividade 2 – *Aquisição e tratamento de dados em modelo físico*

⇒ Tarefa 2.1: Adaptação do modelo físico de Foz Tua para medição de pressões instantâneas

⇒ Tarefa 2.2: Realização de ensaios em modelo físico reproduzindo as descargas in situ

⇒ Tarefa 2.3: Medição de grandezas: alturas de água, velocidades e pressões

⇒ Tarefa 2.4: Tratamento dos dados referentes a pressões e flutuações de pressão

Atividade 3 – *Aquisição e tratamento de dados de protótipo*

⇒ Tarefa 3.1: Recolha e processamento dos dados adquiridos no protótipo referentes a pressões e flutuações de pressão

⇒ Tarefa 3.2: Uso e ou desenvolvimento de software para tratamento de dados adquiridos em protótipo referentes a pressões e flutuações de pressão

⇒ Tarefa 3.3: Comparação de informação de protótipo e em modelo físico

Atividade 4 – *Elaboração de documentos científicos*

⇒ Tarefa 4.1: Elaboração de uma comunicação a um congresso nacional ou internacional (◦)

⇒ Tarefa 4.2: Redação da dissertação de mestrado (*)

O Quadro 6.14 apresenta um cronograma com a previsão do desenvolvimento das atividades previstas no âmbito da dissertação de mestrado proposta.

Quadro 6.14 | Cronograma do mestrado 2

Atividade	Trimestre/mês	1º T			2º T			3º T			4º T		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1 – Revisão de conhecimentos													
2 – Aquisição e tratamento de dados em modelo físico													
3 – Aquisição e tratamento de dados de protótipo													
4 – Elaboração de documentos científicos										◦			*

6.8.4 Custos

O Quadro 6.15 apresenta a previsão dos custos diretamente associados à realização da dissertação de mestrado proposta.

Quadro 6.15 | Estimativa dos custos associados ao mestrado 2

	Quantidade	Valor unitário (€)	Total (€)
Deslocações no país	2	500	1 000
Bolsa de mestrado FCT (745 € + SSV)	12	870	10 440
Consumíveis e outros			1 000
Total			12 440

6.9 Mestrado 3 – Análise do risco em órgãos de segurança de barragens

6.9.1 Justificação

O desenvolvimento do PEI da barragem obriga, numa primeira fase, proceder à identificação do risco na própria barragem, ou seja, à caracterização dos potenciais incidentes e acidentes; também a análise estatística das deteriorações, realizada a partir de casos históricos, constitui informação preciosa para a fase de mitigação do risco, já que alerta não só para os problemas mais comuns em obras do mesmo tipo como também avisa para a possibilidade de poderem ocorrer situações similares no caso de novas obras.

Por outro lado, técnicas baseadas na análise do risco são um instrumento cada vez mais popular para lidar com incertezas nas avaliações de segurança de barragens (Hartford e Baecher, 2004; Caldeira, 2005). No NRE existe muita experiência na avaliação das consequências da rotura de uma barragem, mas não na análise do risco das causas. Sabendo que estas são muitas vezes associadas a problemas nos órgãos de segurança e exploração, afigura-se ser oportuno dotar o NRE em instrumentos de análise do risco quantitativas.

Com a presente dissertação de mestrado visa o desenvolvimento de instrumentos que apoiem a identificação de deteriorações e a probabilidade de acidente associado aos órgãos de segurança de barragens.

A tese contribuirá para o desenvolvimento do Projeto P4.1 “*Análise e redução do risco em barragens por abordagens de prevenção*” do Programa de Estudos P4 “*Gestão do risco em barragens*”.

6.9.2 Objetivos

A presente dissertação de mestrado tem os seguintes objetivos específicos:

- propor uma metodologia para identificação das condições de segurança de um descarregador de cheias tendo por base a identificação das deteriorações que correntemente ocorrem nas estruturas hidráulicas e o desenvolvimento de um índice de estado de manutenção;
- desenvolver uma ferramenta que transmita, de forma simples e objetiva a informação sobre o estado de manutenção de um descarregador, podendo ser incorporada num processo de apoio à decisão; o índice será um instrumento capaz de agregar uma grande quantidade de informação, permitindo comparar o risco relativo de diversas obras, o que constituirá uma base mais formal para estabelecer prioridades nos investimentos com vista a aumentar a segurança quando em presença de um número elevado de barragens.
- selecionar *software* para a estimativa da probabilidade de rotura de barragens como por exemplo árvores de probabilidade de eventos ou análise de modos de falha e dos seus efeitos (FMEA) e a sua aplicação nos sistemas hidráulicos associados a barragens; estes

incluem os seguintes subsistemas: bacia hidrográfica, albufeira, descarregadores de cheias (incluindo comportas e equipamentos), descargas de fundo e vale a jusante.

6.9.3 Metodologia e planeamento das atividades

As atividades a desenvolver no âmbito desta dissertação são as seguintes:

Atividade 1 – Revisão de conhecimentos

- ⇒ Tarefa 1.1: Pesquisa, a nível global, dos casos de deterioração de órgãos de descarga, tendo em vista a identificação das principais causas que originam acidentes e deteriorações por causas hidráulicas (cavitação, abrasão, erosão, sedimentos e materiais flutuantes, subpressões, etc.)
- ⇒ Tarefa 1.2: Identificação do estado de conhecimentos no que se refere aos métodos de análise de risco em barragens
- ⇒ Tarefa 1.3: Seleção de *software* para análise de risco em barragens como por exemplo árvores de probabilidade de eventos ou análise de modos de falha e dos seus efeitos (FMEA)

Atividade 2 – Desenvolvimento de um índice que se pretende seja representativo do estado de segurança estrutural e hidráulico-operacional do descarregador

- ⇒ Tarefa 2.1: Seleção de descritores que sejam os mais representativos de determinadas características do descarregador (indicadores) e que traduzam entre outros: i) a importância e tipo do descarregador; ii) o tipo de comporta; iii) o tipo de sistema eletromecânico, etc.
- ⇒ Tarefa 2.2: Atribuição de pesos a cada tipo de indicador segundo um sistema de quantificação da respetiva importância
- ⇒ Tarefa 2.3: Normalização dos indicadores numa escala comum (estes geralmente são expressos em unidades e escalas distintas) e na agregação dos indicadores, visando uma medida (ou um valor) simples do impacto
- ⇒ Tarefa 2.4: Desenvolvimento de um índice representativo do estado de segurança de descarregadores de cheias (incluindo comportas e equipamentos eletromecânicos)

Atividade 3 – Implementação e teste das metodologias desenvolvidas

- ⇒ Tarefa 3.1: Seleção de um conjunto de casos de estudo em Portugal que possam contemplar diferentes soluções de descarregadores de cheias e com condições de manutenção dispare
- ⇒ Tarefa 3.2: Cálculo do índice do estado de segurança dos descarregadores
- ⇒ Tarefa 3.3: Aplicação da metodologia de análise de risco (árvore de eventos e FMEA)

Atividade 4 – Elaboração de documentos científicos

⇒ Tarefa 4.1: Elaboração de uma comunicação a um congresso nacional ou internacional (◦)

⇒ Tarefa 4.2: Redação da dissertação de mestrado (*)

O Quadro 6.16 apresenta um cronograma com a previsão do desenvolvimento das atividades previstas no âmbito desta dissertação.

Quadro 6.16 | Cronograma do mestrado 3

Atividade	1º T			2º T			3º T			4º T		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1 – Revisão de conhecimentos												
2 – Desenvolvimento de um índice de deterioração para descarregadores												
3 – Implementação e teste das metodologias desenvolvidas												
4 – Elaboração de documentos científicos									◦			*

6.9.4 Custos

O Quadro 6.17 apresenta a previsão dos custos diretamente associados à realização da dissertação de mestrado proposta.

Quadro 6.17 | Estimativa dos custos associados ao mestrado 3

	Quantidade	Valor unitário (€)	Total (€)
Deslocações no país	2	500	1 000
Bolsa de mestrado FCT (745 € + SSV)	12	870	10 440
Consumíveis e outros			1 000
Total			12 440

6.10 Mestrado 4 – *WEBSIG* e implementação do planeamento de emergência nos vales a jusante de barragens portuguesas

6.10.1 Justificação

Em Portugal, a regulamentação de segurança obriga as barragens de classe I a implementarem um Plano de Emergência Interno (PEI) para dar resposta a situações de emergência. Foram já desenvolvidos PEI para diversas barragens, tendo-se assistido, nos anos mais recentes, a uma aquisição de experiência quer nas entidades que outorgam estes planos (APA e ANPC), quer nos Dono de Obra e empresas de consultoria que os apoiam no desenvolvimento desses planos. Note-se que de uma forma geral, os PEI são desenvolvidos sob a forma de documentos escritos em papel, difíceis de ler; muito longos, e, por estas razões, de difícil uso na fase operacional. Por outro lado, o teste e verificação da eficácia dos planos existentes só pode ser feito com base na realização de um programa de exercícios já que a ocorrência de um acidente grave com barragens é um acontecimento raro. Os exercícios podem igualmente apontar para a necessidade de alterações ou ajustes no PEI, numa tentativa contínua de tornar mais rápida e eficiente a resposta a situações de crise.

Com a presente dissertação de mestrado pretende-se o desenvolvimento uma aplicação em ambiente *WEBSIG* para os PEI por forma a permitir analisar, validar e otimizar este tipo de planos, bem como proceder a simulações reais – simulacros, obviamente em pequena escala, seja por questões de redução de custos, seja por questões de redução do alarmismo social.

A tese contribuirá para o desenvolvimento do Projeto P4. “*Mitigação do risco em barragens por abordagens de preparação*” do Programa de Estudos P4 “*Gestão do risco em barragens*”.

6.10.2 Objetivos

Esta dissertação de mestrado visa definir uma ferramenta para testar a eficácia dos planos de emergência internos de barragens e efetuar a sua aplicação a uma barragem de classe I.

O objetivo deste trabalho é contribuir para a melhoria do atual estado de preparação e resposta a emergências envolvendo barragens em Portugal. Pretende-se que as entidades exploradoras de barragens e de proteção civil aprofundem a experiência e implementem adequadamente os PEI existentes com base na realização de um conjunto tipificado de exercícios. O trabalho desenvolverá também orientações para a elaboração e exercitação dos planos de emergência externos de barragens. Por fim, visa-se igualmente envolver a população na Zona de Autossalvamento (ZAS), verificando se reconhece o sistema de aviso e o significado dos sinais sonoros bem como se conhece o plano de evacuação, essencialmente, o acesso mais curto à sua Zona de Concentração Local (ZCL).

Centrando-se sobretudo nas atribuições e responsabilidades das entidades exploradoras de barragens, a abordagem deste trabalho visará essencialmente a exercitação dos Planos de

Emergência Internos (PEI) e, quando necessário, a sua articulação com os Planos de Emergência Externos (PEE) da responsabilidade do sistema de Proteção Civil.

As orientações para a elaboração de um programa de exercícios para testar a eficácia dos planos de emergência de barragens apresentadas neste trabalho resultarão de uma consulta à experiência internacional, devidamente adaptada à realidade nacional, e da sua aplicação a situações concretas, tendo por base o disposto na legislação portuguesa de segurança de barragens e em Sá e Viseu, 2009. O trabalho tem como objetivos:

- promover a coordenação e cooperação entre as diferentes entidades envolvidas nas ações de emergência (governamentais e locais) e as entidades exploradoras de barragens;
- demonstrar a exequibilidade do tipo de planos de emergência internos atualmente desenvolvidos em Portugal;
- obter progressivamente planos de emergência mais aperfeiçoados e eficazes.
- desenvolver a capacidade da população que reside na ZAS para agir e recuperar no caso da ocorrência de um acidente com uma barragem.

6.10.3 Metodologia e planeamento das atividades

As atividades a desenvolver no âmbito desta dissertação são as seguintes:

Atividade 1 – Revisão de conhecimentos

- ⇒ Tarefa 1.1: Identificação e definição do conteúdo dos diferentes tipos de exercícios (seminários de orientação, exercícios internos simples, *tabletop exercises* e simulacros) para cabal definição dos exercícios, em colaboração com a ANPC e do Dono de Obra da barragem que será escolhida para caso piloto
- ⇒ Tarefa 1.2: Identificação das barragens portuguesas de classe I
- ⇒ Tarefa 1.3: Seleção de um caso piloto de uma barragem para realização dos exercícios e treino e análise aprofundada do respetivo PEI

Atividade 2 – Desenvolvimento de instrumentos e definição das seguintes metodologias

- ⇒ Tarefa 2.1: Conceção e desenvolvimento de guiões para a realização de um seminário de orientação, de um exercício interno simples e de um *tabletop exercise* com as seguintes especificações: i) identificação dos atores que participarão no exercício (controlador, participantes e avaliadores); ii) definição do cenário de acidente; iii) planeamento dos aspetos logísticos; iv) preparação das mensagens e v) preparação dos inquéritos para avaliação do exercício
- ⇒ Tarefa 2.2: Desenvolvimento de um modelo de simulação da albufeira em *excel* para apoio à condução dos exercícios
- ⇒ Tarefa 2.3: Ganho de experiência no uso da ferramenta WEBSIG para simulação de planos de emergência

⇒ Tarefa 2.4: Definição de medidas para a sensibilização, educação e treino da população na ZAS

Atividade 3 – Implementação e teste das metodologias desenvolvidas

- ⇒ Tarefa 3.1: Apoio ao Dono de Obra na condução de um seminário de orientação
- ⇒ Tarefa 3.2: Apoio ao Dono de Obra na realização de um exercício interno simples (teste dos sistemas de alerta e de aviso bem como da operacionalidade dos órgãos de segurança)
- ⇒ Tarefa 3.3: Apoio ao Dono de Obra na condução de um - *tabletop exercise* (teste do sistema de resposta a nível da barragem e avaliação da eficácia dos procedimentos de resposta definidos no PEI)
- ⇒ Tarefa 3.4: Lista de recomendações para melhoria do PEI existente

Atividade 4 – Elaboração de documentos científicos

- ⇒ Tarefa 4.1: Elaboração de uma comunicação a um congresso nacional ou internacional (◦)
- ⇒ Tarefa 4.2: Redação da dissertação de mestrado (*)

O Quadro 6.18 apresenta um cronograma com o planemanto das atividades previstas.

Quadro 6.18 | Cronograma do mestrado 4

Atividade	Trimestre/mês											
	1º T			2º T			3º T			4º T		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1 – Revisão de conhecimentos												
2 – Desenvolvimento de instrumentos												
3 – Implementação e teste das metodologias desenvolvidas												
4 – Elaboração de documentos científicos									◦			*

6.10.4 Custos

O Quadro 6.19 apresenta a previsão dos custos diretamente associados à realização da dissertação de mestrado proposta.

Quadro 6.19 | Estimativa dos custos associados ao mestrado 4

	Quantidade	Valor unitário (€)	Total (€)
Deslocações no país	2	500	1 000
Bolsa de mestrado FCT (745 € + SSV)	12	870	10 440
Consumíveis e outros			1 000
Total			12 440

6.11 Mestrado 5 - Impactos transfronteiriços da rotura de barragens portuguesas em bacias internacionais

6.11.1 Justificação

Segundo o Grupo de Trabalho “*Segurança de Infraestruturas Hidráulicas e Cheias*”³², existem cerca de 21 barragens portuguesas nas bacias internacionais dos rios Minho, Douro, Tejo e Guadiana com potencial para originar cheias induzidas com efeitos transnacionais. Para gerir o risco traduzido por estas infraestruturas é necessário: i) conhecer o impacto das cheias induzidas por potenciais acidentes e obter a cartografia das zonas inundáveis; ii) avaliar a vulnerabilidade às inundações das zonas que sofrem o impacto destas cheias; e iii) planear procedimentos para minimizar as suas consequências.

Com a presente dissertação de mestrado pretende-se conhecer o risco de cheias provocadas por acidentes em barragens com potencial para originar danos de dimensão transfronteiriça em Espanha e Portugal e testar a eficácia dos planos de emergência internos de barragens desenvolvidos para barragens em rios internacionais.

A dissertação analisará se as avaliações de risco existentes têm graus de desenvolvimento análogos e se estão de acordo com a dimensão e risco das barragens, assim como com as características de ocupação territorial dos respetivos vales a jusante.

A tese investe em abordagens interdisciplinares, como por exemplo o desenvolvimento de PEI transfronteiriços e contribuirá para o desenvolvimento do Projeto P4. “*Mitigação do risco em barragens por abordagens de preparação*” do Programa de Estudos P4 “*Gestão do risco em barragens*”.

6.11.2 Objetivos

A dissertação de mestrado pretende ser um contributo para auxiliar os decisores políticos a conhecer o risco provocado por infraestruturas de importância transfronteiriça e os responsáveis pela gestão destas infraestruturas na minimização do risco que elas possam representar. Tem como objetivos específicos:

- avaliar o risco das barragens portuguesas com potencial para originar efeitos adversos significativos de dimensão transfronteiriça em Portugal e Espanha, i.e., cuja rotura tem impacto transnacional;
- selecionar um caso piloto de uma barragem numa bacia hidrográfica internacional (Douro, Tejo ou Guadiana) para caso de estudo;

³² Trata-se de um dos cinco grupos da Comissão para a Aplicação e o Desenvolvimento da Convenção sobre Cooperação para a Proteção e o Aproveitamento Sustentável das Águas das Bacias Hidrográficas Luso-Espanholas (CADC).

- definir procedimentos padronizados, em Espanha e Portugal, para a mitigação do risco no vale a jusante de infraestruturas hidráulicas com efeitos transfronteiriços.

Desta forma, o projeto fornecerá um conjunto de instrumentos a utilizar de forma concertada pelos serviços e agentes de proteção civil de ambos os países que os ajudará a responder de forma eficiente em situações de emergência, com vista a minimizar a perda de vidas e a reduzir os potenciais prejuízos económicos e ambientais.

6.11.3 Metodologia e planeamento das atividades

As atividades a desenvolver no âmbito desta dissertação são as seguintes:

Atividade 1 – Revisão de *conhecimentos*

- ⇒ Tarefa 1.1: Identificação das barragens portuguesas cuja rotura tem potencial para originar cheias induzidas com efeitos transfronteiriços
- ⇒ Tarefa 1.2: Recolha de informação sobre os estudos existentes de simulação de cheias induzidas por rotura das barragens com efeitos transfronteiriços (mapas de inundação)
- ⇒ Tarefa 1.3: Recolha de informação relacionada com os planos de emergência e comunicação do risco a diferentes atores (autoridades, ao público, “media” e organizações não governamentais) bem como relacionada com sistemas de aviso à população em caso de emergência

Atividade 2 – Seleção de caso de estudo e organização da informação

- ⇒ Tarefa 2.1: Análise das metodologias e dos critérios usados na condução dos estudos existentes de simulação de cheias induzidas por rotura das barragens com efeitos transfronteiriços (modelos de simulação, condições iniciais, trecho de simulação, etc.)
- ⇒ Tarefa 2.2: Desenvolvimento de uma base de dados com os mapas de inundação, análise dos impactos e estimativa das vulnerabilidades associadas a cheias induzidas por rotura das barragens com efeitos transfronteiriços
- ⇒ Tarefa 2.3: Seleção de uma barragem numa bacia hidrográfica internacional para caso de estudo e análise do respetivo PEI

Atividade 3 – Desenvolvimento de instrumentos comuns

- ⇒ Tarefa 3.1: Conceção e desenvolvimento de um guião para a realização de um simulacro para a barragem caso de estudo: i) identificação dos atores que participarão no exercício (controlador, participantes e avaliadores); ii) definição do cenário de acidente; iii) planeamento dos aspetos logísticos; iv) preparação das mensagens e v) preparação dos inquéritos para avaliação do exercício

⇒ Tarefa 3.2: Apoio na realização de um curso para as agências envolvidas no planeamento de emergência em barragens sobre infraestruturas com impacto transfronteiriço e exercícios de simulacro

⇒ Tarefa 3.3: Desenvolvimento e proposta de procedimentos de mitigação do risco de cheias nas áreas de inundação de bacias internacionais de aplicação sistemática que se possam implementar em países da União Europeia com problemáticas análogas; incluindo desenvolvimento de critérios conjuntos para aviso e evacuação da população em risco em bacias internacionais.

Atividade 4 – *Elaboração de documentos científicos*

⇒ Tarefa 4.1: Elaboração de uma comunicação a um congresso nacional ou internacional (○)

⇒ Tarefa 4.2: Redação da dissertação de mestrado (*)

O Quadro 6.20 apresenta um cronograma com a previsão do desenvolvimento das atividades previstas no âmbito desta dissertação.

Quadro 6.20 | Cronograma do mestrado 5

Atividade	1º T			2º T			3º T			4º T		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1 – Revisão de conhecimentos												
2 – Modelação numérica												
3 – Desenvolvimento de instrumentos comuns												
4 – Elaboração de documentos científicos									○			*

6.11.4 Custos

O Quadro 6.21 apresenta a previsão dos custos diretamente associados à realização da dissertação de mestrado proposta.

Quadro 6.21 | Estimativa dos custos associados ao mestrado 5

	Quantidade	Valor unitário (€)	Total (€)
Deslocações no país	2	500	1 000
Bolsa de mestrado FCT (745 € + SSV)	12	870	10 440
Consumíveis e outros			1 000
Total			12 440

7 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Programa de Investigação apresentado insere-se na Área Científica de “*Engenharia de Recursos Hídricos e Obras Hidráulicas*” e tem por objetivo reforçar o conhecimento do LNEC no domínio das estruturas hidráulicas associadas a barragens, em qualquer das fases do seu ciclo de vida útil: projeto, construção, manutenção e exploração. O LNEC encontra-se particularmente bem posicionado para responder a este desafio, já que reúne um corpo de investigadores com competências científicas e tecnológicas multidisciplinares, que abrangem todo este ciclo e que permitem abordar esta questão de forma integrada e transversal.

Assim, este Programa de Investigação pretende ser uma contribuição para o aprofundamento dos conhecimentos que se relacionam com: i) a hidrologia e o efeito das alterações climáticas nos escoamentos afluentes a barragens e ii) os escoamentos junto às estruturas hidráulicas, envolvendo não só as ações resultantes como o impacto no ambiente que as rodeia. O Programa de Investigação centra-se também: i) no desenvolvimento e aperfeiçoamento de metodologias e ferramentas de apoio ao estudo do comportamento hidráulico das estruturas, tais como modelação física e numérica e medições *in situ*; ii) na mitigação do risco destas estruturas, incluindo a observação sistemática e sua monitorização, o diagnóstico do seu estado de segurança hidráulico-estrutural e o planeamento de emergência.

O tema escolhido para este Programa de Investigação e de Pós-Graduação intitulado “*Contributos para o avanço da investigação em hidráulica de estruturas no LNEC*” relaciona-se com o trabalho de investigação desenvolvido no NRE. Com efeito, este núcleo acumulou ao longo das últimas décadas uma larga experiência e reputação na temática da hidráulica de barragens, não só a nível nacional como também em sede internacional, mas esta temática necessita nos anos próximos de investimento em investigação e recursos. Assim, a escolha do tema resultou de uma reflexão sobre a investigação que é atualmente promovida no NRE nesta área e destina-se a dar continuidade à estratégia de desenvolvimento científico existente no núcleo, identificando os domínios mais carenciados de investigação neste âmbito.

O tema foi selecionado com o objetivo de consolidar a posição do LNEC como uma instituição de referência sobre a temática. Trata-se de um programa essencialmente dirigido para o NRE, mas que assenta também no estabelecimento de fortes parcerias interdepartamentais e interinstitucionais. Assim, optou-se por considerar prioritários os estudos a serem desenvolvidos no LNEC relativamente àqueles que podem ser promovidos em parceria com outras instituições, por forma a garantir um crescimento e amadurecimento internos destas temáticas.

Como resultado apresenta-se, na parte A deste Programa de Investigação, uma síntese dos conhecimentos existentes e uma apresentação crítica dos problemas já tratados e dos problemas em aberto. Foram identificadas quatro áreas de investigação (Figura 7.1):

- as barragens e as alterações climáticas, com enfoque nos extremos, i.e., as cheias e as secas, e envolvendo as áreas da modelação hidrológica de cheias e da otimização da exploração de albufeiras em condições de escassez hídrica;
- a modelação numérica avançada em hidráulica de estruturas, envolvendo as áreas da modelação do escoamento, utilizando esquemas Computational Fluid Dynamics (CFD) e considerando sobretudo os descarregadores de cheias;
- a modelação experimental de processos erosivos em hidráulica de estruturas com enfoque na rotura de aterros (barragens e diques) e na erosão junto a pilares de pontes, e envolvendo o uso de técnicas avançadas de medição de grandezas e de análise e visualização do escoamento;
- a gestão do risco em barragens envolvendo aspetos do reforço de capacidade de descarregadores, da medição de grandezas em protótipo e do planeamento de emergência.

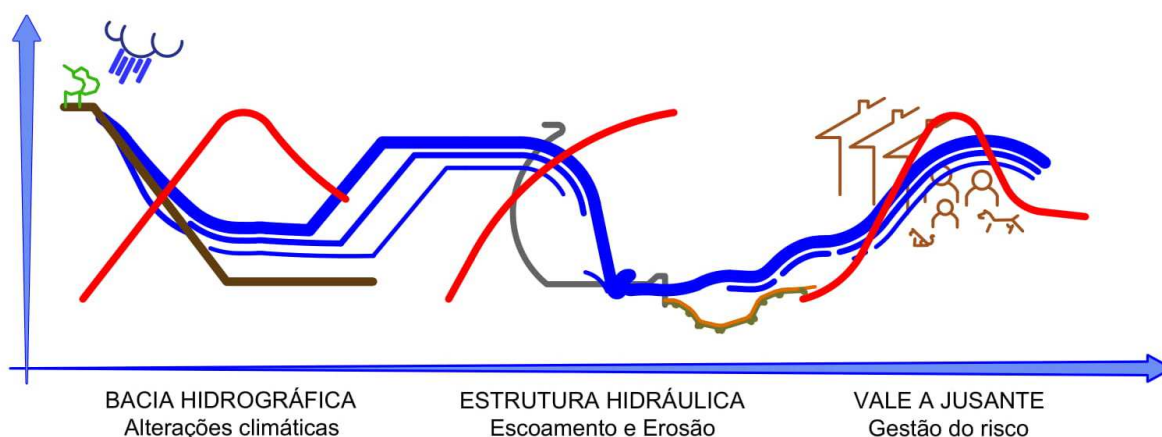


Figura 7.1 | Áreas de investigação que constam do presente Programa de Investigação

Associados a estas áreas, apresentam-se quatro Programas de Estudos que procuram dar resposta aos problemas identificados, propondo as metodologias, os recursos necessários, os objetivos a atingir e os benefícios esperados da sua realização. Os instrumentos a desenvolver abrangem as áreas da modelação física, experimental, numérica e *in situ*, e incluem adicionalmente um conjunto de metodologias e de instrumentos de mitigação do risco e controlo de segurança em obras hidráulicas.

O primeiro Programa de Estudos aborda a temática das alterações climáticas e no seu impacto no sistema barragem em dois aspetos distintos: i) no dimensionamento dos descarregadores de barragens com enfoque no fenómeno extremo das cheias e ii) na otimização da exploração de albufeiras em situações de seca.

O segundo Programa de Estudos incide nos descarregadores de cheias também em dois aspetos distintos: i) na modelação numérica CFD do escoamento e ii) no estudo de soleiras descarregadoras PWK.

O terceiro Programa de Estudos tem como objeto de estudo os processos erosivos nas barragens (e os diques) e junto a pilares de pontes. Para além do aprofundamento do conhecimento destes fenómenos, este Programa de Estudo visa ainda a utilização de novas técnicas de análise e visualização do escoamento que permitam aprofundar o conhecimento de grandezas hidráulicas recorrendo a instrumentação essencialmente “não invasiva” e melhorar o conhecimento do NRE em novas técnicas de medição em modelação física.

O quarto e último Programa de Estudos visa agrupar várias ferramentas para a mitigação do risco em barragens através de medidas de prevenção e de medidas de preparação visando a consolidação de metodologias de planeamento e gestão de emergências provocadas por rotura de barragens.

Estes Programas de Estudos foram definidos para um horizonte de oito anos e definem oito projetos que estão integrados nas atividades a desenvolver pelo NRE ao abrigo do presente P2I (2013-2020) e do próximo, com início em 2021.

A dimensão dos oito projetos é compatível com a realização de mestrados e de doutoramentos. Assim, apresenta-se e estrutura-se, na Parte B deste Programa de Investigação, um leque de atividades na área da pós-graduação e da formação complementar, incluindo-se, designadamente, propostas de realização de planos para cinco teses de doutoramento e cinco dissertações de mestrado na Área Científica de “*Engenharia de Recursos Hídricos e Obras Hidráulicas*”, para o período de oito anos previsto para a elaboração deste Programa de Investigação.

Com efeito, a estratégia deste Programa de Pós-Graduação baseia-se nas oportunidades de formação pós-graduada associadas ao Programa de Investigação, visa o enquadramento de jovens licenciados e mestres nas diversas áreas ligadas aos estudos propostos e contempla a apresentação de linhas-mestras de planos de doutoramentos e de mestrados que podem ser desenvolvidos no âmbito das áreas dos diversos Programas de Estudos.

Alguns anos após a escolha do tema, que foi feita praticamente no início das funções de chefia do Núcleo de Recursos Hídricos e de Estruturas Hidráulicas, alguns dos projetos previstos já estão em fase de desenvolvimento. Outros se lhe seguirão, aproveitando a oportunidade de envolver elementos, motivados e qualificados, mais jovens no processo de consolidação da posição do LNEC como um polo de excelência sobre esta temática, de modo a que as entidades do setor das barragens possam continuar a contar com o necessário apoio técnico e científico na definição de soluções no projeto, construção, manutenção e exploração de estruturas hidráulicas.

AGRADECIMENTOS

A autora agradece a Sílvia Amaral, Lourenço Mendes, Ricardo Jónatas, Teresa Alvarez e Ana Margarida Bento...os seus orientandos, pela oportunidade que as respetivas orientações criaram no amadurecimento das diversas temáticas tratadas e pelo estímulo permanente que as suas questões foram colocando ao longo do tempo, permitindo a sua aprendizagem contínua. Este trabalho é também o deles.

A autora agradece igualmente a António Muralha, Elsa Alves, Emília Novo, Fernanda Rocha, João Fernandes, José Falcão de Melo, Lourenço Mendes, Manuel Oliveira, Maria Alzira Santos, Maria José Henriques, Natália Lopes, Nuno Aido, Ricardo Jónatas, Rui Rodrigues, Sílvia Amaral, Solange Mendes, Teresa Leitão e Tiago Martins...o NRE, uma equipa de excelência, eficaz, empreendedora, solidária e particularmente bem preparada técnica e cientificamente, com a qual o LNEC conta incondicionalmente para dar cabal resposta aos desafios que vão se colocando à sua atividade no âmbito dos recursos hídricos e das estruturas hidráulicas.

Por fim, a autora agradece a António Tavares de Castro, Jorge de Matos, Mariza Costa-Cabral, Rui Martins e Rui Rodrigues, que apoiaram cientificamente o estudo com contribuições nas respetivas áreas de saber e especialização, pela troca de experiências que fomentaram a discussão e que contribuíram decisivamente para tornar o trabalho mais claro e rigoroso.

Lisboa, LNEC, dezembro de 2018

AUTORIA

Maria Teresa Viseu

8 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

8.1 Capítulo 1

- Alves, E.T., 2007 – “Sedimentação em Albufeiras”. Tese de doutoramento, IST, Lisboa.
- Amaral, S.T., 2017 – “Experimental characterization of the failure by overtopping of embankment dams”. Tese de doutoramento, IST, Lisboa.
- Barbosa, A.E., 1999 – “Highway runoff pollution and design of infiltration ponds for pollutant retention in semi-arid climates”. Tese de doutoramento, Aalborg University, Aalborg, Dinamarca.
- Branco P., 2013 – “Improving connectivity for river fish”. Tese de doutoramento, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa.
- Couto, L.T., 2000 – “Erosões localizadas junto de esporões fluviais e encontros de pontes”. Tese de doutoramento, IST, Lisboa.
- Fernandes, J.N., 2013 – “Compound channel uniform and non-uniform flows with and without vegetation in the floodplain”. Tese de doutoramento, IST, Lisboa.
- Franco A.B., 1996 – “Modelação computacional e experimental de escoamentos provocados por roturas de barragens”. Tese de doutoramento, IST, Lisboa.
- Gonçalves Henriques, R., 1993 – “Os Sistemas de Informação Geográfica e a modelação hidrológica no domínio das águas superficiais”. Programa de Investigação do LNEC, Lisboa.
- Leitão, T.E., 1997 – “Metodologias para a reabilitação de aquíferos poluídos”. Tese de doutoramento, FCUL, Lisboa.
- Lopes, R., 2011 – “Capacidade de vazão, energia específica residual e caracterização do escoamento de emulsão ar-água em soleiras descarregadoras em labirinto”. Tese de doutoramento, IST, Lisboa.
- Matos, J., 1999 – “Emulsão de ar e dissipação de energia do escoamento em descarregadores em degraus”. Tese de doutoramento, IST, Lisboa.
- Matos, R. et al., 2013 – “Proposta de Plano Estratégico 2020. Documento de Reflexão Interna”. Departamento de Hidráulica e Ambiente, LNEC, Lisboa.
- Meireles, I., 2011 – “Hidráulica de descarregadores em degraus: estudo experimental-numérico-teórico”. Tese de doutoramento, Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Melo, J.F., 2001 – “Acções hidrodinâmicas em soleiras de bacias de dissipação de energia por jactos”. Tese de doutoramento, IST, Lisboa.
- Moreno, M., 2016 – “Experimental study of local scour around complex piers”. Tese de doutoramento, FEUP, Porto.
- Nogueira, H.I., 2014 – “Experimental characterization of unsteady gravity currents developing over smooth and rough beds”. Tese de doutoramento, Universidade de Coimbra.
- Novo, M.E., 2007 – “Alterações Climáticas e seus impactos nos recursos hídricos subterrâneos em ilhas. caso de estudo: Açores – Ilha Terceira”. Tese de doutoramento, Universidade dos Açores.
- Oliveira, M.M., 2004 – “Recarga de águas subterrâneas: métodos de avaliação”. Tese de doutoramento, FCUL, Lisboa.

- Pinheiro, A.N., 1995. “Acções hidrodinâmicas em soleiras de bacias de dissipação de energia por ressalto”. Tese de doutoramento, IST, Lisboa.
- Relvas, A.T., 2008 – “Descarregadores de cheias de blocos de betão prefabricados em forma de cunha sobre barragens de aterro”. Tese de doutoramento, IST, Lisboa.
- Rocha, F., 1997 – “Modelação da eutrofização em rios. Utilização de técnicas heurísticas na calibração de um modelo de simulação”. Tese para Especialista do LNEC, Lisboa.
- Rodrigues, R.R., 1995 – “Hidrologia de ilhas vulcânicas”. Tese para Especialista do LNEC e da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Lisboa.
- Silva, A.T., 2010 – “Ecohydraulics of pool-type fishways for the Iberian barbel (*Luciobarbus bocagei* Steidachner, 1864)”. Tese de doutoramento, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa.
- Viseu, T., 2006 – “Segurança dos vales a jusante de barragens - metodologias de apoio à gestão do risco”. Tese de doutoramento, IST, Lisboa.

8.2 Capítulo 2

- Acero F.J., Garvía J.A. and Gallego M.C., 2011 – “Peaks-over-threshold study of trends in extreme rainfall over the Iberian Peninsula”. *J Climate*, pp. 1089–1105, DOI: 10.1175/2010JCLI3627.1.
- Alam, M.S. and Elshorbagy, A., 2015 – “Quantification of the climate change-induced variations in Intensity-Duration-Frequency curves in the Canadian Prairies”. *J. Hydrol.* 527, pp.990–1005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.059>.
- Alcamo, J., Flörke, M. and Märker, M., 2007 – “Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic change”. *Hydrol. Sci. J.* 52(2), pp. 247–275.
- Alfieri, L., Burek, P., Feyen, L. and Forzieri, G. 2015 – “Global warming increases the frequency of river floods in Europe”. *Hydrology and Earth System Sciences* 19(5), pp. 2247–2260.
- Andréasson, J., Bergstrom, S. and Carlsson, B., 2004 – “Hydrological change-climate change impact simulations for Sweden”. *AMBIO A Journal of the Human Environment*, 33(4), pp. 228–234.
- APA, 2014 – “Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Tejo. Relatório Técnico. Versão extensa, Parte 2 – Caracterização e diagnóstico da região hidrográfica”. Ministério da Agricultura, do Mar, do Ambiente e do Ordenamento do Território, ARH Tejo.
- Arnell, N. and Reynard, N.S., 1996 – “The Effects of Climate Change Due to Global Warming on River Flows in Great Britain”. *Journal of Hydrology* 183(3-4), pp. 397–424, September.
- Arheimer, B. and Lindstrom, G., 2015 – “Climate impact on floods: changes in high flows in Sweden in the past and the future (1911-2100). *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(2), pp. 771–784.
- Bates, B.C., Kundzewicz, Z.W., Wu, S. and Palutikof, J.P., 2008 – “Climate Change and Water”. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva: IPCC Secretariat.
- Beniston, M., Stephenson, D.B., Christensen, O.B., Ferro, C.A., Frei, C., Goyette, S., Halsnaes, K., Holt, T., Jylhä, K., Koffi, B., Palutikof, J., Schöll, R., Semmler, T. and Woth, K., 2007 – “Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections”. *Climatic Change*, pp. 81:71–95, DOI 10.1007/s10584-006-9226-z.
- Bosshard, T., Sven Kotlarski, S., Zappa M. and Schar, C., 2014 – “Hydrological Climate-Impact

- Projections for the Rhine River: GCM–RCM. Uncertainty and Separate Temperature and Precipitation Effects”. *Journal of Hydrometeorology*, Volume 15, April, pp. 697–713.
- Brandão, C., Rodrigues, R. e Pinto da Costa, J., 2001 – “Análise de fenómenos extremos. Precipitações intensas em Portugal Continental”. Direcção dos Serviços de Recursos Hídricos, Instituto da Água, dezembro.
- Brunet, M., Jones, P.D., Sigró, J., Saladié, O., Aguilar, E., Moberg, A., Della-Marta, P.M., Lister, D., Walther, A. and López, D., 2007 – “Temporal and spatial temperature variability and change over Spain During 1850–2005”. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, D12117, DOI:10.1029/2006JD008249.
- Carbone G.J., Rhee J., Mizzell H. and Boyles, R., 2008 – “A regional–scale drought monitor for the Carolinas. *Bulletin of the American Meteorological Society* 89, pp. 20–28.
- Cardoso da Silva, L.M., Freitas, M.A.S., Silveira, P.B.M., 2003 – “Aplicativo para operação de reservatório em situações de escassez - Fase II”. *Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Porto Alegre: ABRH.
- Carter, T.R. et al., 2000 – “Climate Change in the 21st Century. Interim Characterisations based on the New IPCC Emissions Scenarios”. Finnish Environment Institute, Helsinki, Finland.
- Chang, T.J., Kleopa, X. and Teoh, C.B., 1995 – “Use of flood-control reservoirs for drought management”. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 121 (1), pp. 34–42.
- Chang, L.C., Chang, F.J., Wang, K.W. and Dai, S.Y., 2010 – “Constrained genetic algorithms for optimizing multi use reservoir operation”. *Journal of Hydrology*, 390, pp. 66–74.
- De Castro M., Martín-Vide J. and Alonso S., 2005 – “El Clima de España: pasado, presente y escenarios de clima para el siglo XX”. In “Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del Cambio Climático en España”, Ministério de Medio Ambiente, Madrid, Spain, pp. 1–64.
- Collins W.D., Bitz C.M., Blackmon M.L., Bonan G.B., Bretherton C.S., Carton J.A., Chiang P., Doney S.C., Hack J.J., Henderson T.B., Keihl J.T., Large W.G., McKenna D.S., Santer B.D. and Smith R.D., 2006 – “The Community Climate System Model Version 3 (CCSM3)”. *J Clim* 19, pp. 2122–2143.
- Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.L., Fichet, T., Friedlingstein, P., Gao, X., Gutowski, W.J., Johns, T., Krinner, G., Shongwe, M., Tebaldi, C., Weaver, A. J. and Wehner, M., 2013 – “Chapter 12 - Long-term climate change: Projections, commitments and irreversibility”.
- Costa-Cabral, M., Trigo, R., Viseu, T., Castro, A.P., Jesus, R. e Silva, P.A., 2012 – “Impactos da variabilidade e alterações climáticas sobre os recursos hídricos e extremos hidrológicos ibéricos: Consequências para a produção hidroelétrica”. Proposta Técnica apresentada à EDP, Hydrology Futures, LLC, USA, Universidade de Lisboa, Portugal & Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal, abril.
- Cudennec, C., Leduc, C. and Koutsoyiannis, D., 2007 – “Dryland hydrology in Mediterranean regions - a review”. *Hydrological Sciences Journal*, 52(6), pp. 1077–1087.
- Dariane, A.B. and Moradi, A.M., 2009 – “Reservoir operating by ant colony optimization for continuous domain (ACOR). Case study: Dez reservoir”. *International Journal of Mathematical, Physical and Engineering Science*, 3:2, pp.125–129.

- Delworth T.L., Broccoli A.J., Rosati A., Stouffer R.J., Balaji V., Beesley J.A., Cooke W.F., Dixon K.W., Dunne J., Dunne K.A., Durachta J.W., Findell K.L., Ginoux P., Gnanadesikan A., Gordon C.T., Griffies S.M., Gudgel R., Harrison M.J., Held I.M., Hemler R.S., Horowitz L.W., Klein S.A., Knutson T.R., Kushner P.J., Langenhorst A.R., Lee H.C., Lin S.J., Lu J., Malyshev S.L., Milly P.C.D., Ramaswamy V., Russell J., Schwarzkopf M.D., Shevliakova E., Sirutis J.J., Spelman M.J., Stern W.F., Winton M., Wittenberg A.T., Wyman B., Zeng F. and Zhang R. 2006 – “GFDL's CM2 global coupled climate models. Part 1: Formulation and simulation characteristics”. *J Climate* 19(5), pp. 643–674.
- DGA (Direcção Geral do Ambiente), 1999 – “Relatório do Estado do Ambiente”.
- Diansky N.A. and Volodin E.M., 2002 – “Simulation of present-day climate with a coupled Atmosphere-ocean general circulation mode”. *Izv. Atmos Ocean Phys (Engl. Transl.)* 38(6):732–747.
- Donnelly, C., Greuell, W., Andersson, J., Gerten, D., Pisacane, G., Roudier, P. and Ludwig, F., 2017 – “Impacts of climate change on European hydrology at 1.5, 2 and 3 degrees mean global warming above preindustrial level”. *Climatic Change* 19(3), pp. 1–14.
- European Commission, 2007 a) – “Communication from the Commission to the European Parliament and the Council - Addressing the challenge of water scarcity and droughts in the European Union”. {SEC (2007) 993} {SEC (2007) 996}, Brussels, July, 2007.
- European Commission, 2007 b) – “Green Paper from the Commission to the Council”. The European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions - Adapting to climate change in Europe – options for EU action {SEC (2007) 849}, Brussels, June, 2007.
- Fadhel, S., Rico-Ramirez, M. A. and Dawei, H., 2017 – “Uncertainty of Intensity–Duration–Frequency (IDF) curves due to varied climate baseline periods. *Journal of Hydrology* 547, pp. 600–612.
- Flato G.M. and Boer G.J., 2001 – “Warming asymmetry in climate change simulations”. *Geophys Res Lett* 28, pp. 195–198.
- Fowler H.J., Ekstrom M., Blenkinsop S., Smith A.P., 2007 – “Estimating change in extreme European precipitation using a multi-model ensemble”. *Journal of Geophysical Research*, vol. 112, d18104, DOI:10.1029/2007jd008619.
- Furevik T., Bentsen M., Drange H., Kindem I.K.T., Kvamstø N.G., 2003 – “Description and evaluation of the Bergen climate model: ARPEGE coupled with MICOM”. *Clim Dyn* 21(1), pp. 27–51.
- Gao X. and Giorgi F., 2008 – “Increased aridity in the Mediterranean region under greenhouse gas forcing estimated from high resolution simulations with a regional climate model”. *Global and Planetary Change* 62 (2008), pp. 195–209.
- García J.A., Gallego M.C., Serrano A. and Vaquero J.M., 2007 – “Trends in block-seasonal extreme rainfall over the Iberian Peninsula in the second half of the twentieth century”. *J Climate* 20 pp. 113–130.
- Garcia-Herrera R., Paredes D., Trigo R.M., Trigo I.F., Hernández H., Barriopedro D. and Mendes M.T., 2007– “The outstanding 2004/05 drought in the Iberian Peninsula: Associated atmospheric circulation”. *J Hydrometeor* 8, pp. 483–498.
- Gates, W.L., Boyle, J.S., Covey, C., Dease, C.G., Doutriaux, C.M., Drach, R.S., Fiorino, M., Gleckler,

- P.J., Hnilo, J.J., Marlais, S.M., Phillips, T.J., Potter, G.L., Santer, B.D., Sperber, K.R., Taylor, K.E. and Williams, D.N., 1999 – “An overview of the results of the atmospheric model intercomparison project (AMIP I)”. *Bull. Am. Met. Soc.*, 80, pp. 29-55.
- Ghazvinei, P.T., Darvishi, H.H., Hashim, R.B. and Musavi, S.H., 2016 – “Assessment of climate change and land use development effects on dam reliability”. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016(1).
- Gleick, P. H., 1987 – “The development and testing of a water-balance model for climate impact assessment: modeling the Sacramento basin”. *Water Resources Research*.
- Gonzalez-Hidalgo, J.C., Lopez-Bustins, J.A., Štěpánek, P., Martin-Vide Martin, J. and Luis, M., 2009 – “Monthly precipitation trends on the Mediterranean fringe of the Iberian Peninsula during the second-half of the twentieth century (1951–2000)”. *Int. J. Climatol.* 29, pp. 1415–1429, DOI: 10.1002/joc.1780.
- Goodess, C. M. and Jones, P.D., 2002 – “Links between circulation and changes in the characteristics of Iberian rainfall”. *Int. J. Climatol.* 22, pp.1593–1615, DOI: 10.1002/joc.810.
- Gordon C., Cooper C., Senior C.A., Banks H., Gregory J.M., Johns T.C., Mitchell J.F.B. and Wood R.A., 2000 – “The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments”. *Clim Dyn*, 16(2-3), pp. 147–168.
- Gordon H.B., Rotstayn L.D., McGregor J.L., Dix M.R., Kowalczyk E.A., O’Farrell S.P., Waterman L.J., Hirst A.C., Wilson S.G., Collier M.A., Watterson I.G. and Elliott T.I., 2002 – “The CSIRO Mk3 climate system model”. CSIRO Atmospheric Research Technical Paper 60. CSIRO, Division of Atmospheric Research, Victoria, Australia.
- Gosling, S.N., Zaherpour, J., Mount, N.J., Hattermann, F.F., Dankers, R., Arheimer, B., Breuer, L., Ding, J., Haddeland, I., Kumar, R., Kundu, D., Liu, J., Van Griensven, A., Veldkamp, T.I.E., Vetter, T., Wang, X. and Zhang, X., 2016 – “A comparison of changes in river runoff from multiple global and catchment-scale hydrological models under global warming scenarios of 1 °C, 2 °C and 3°C “. *Climatic Change* 141(3), pp. 577–595.
- Hall, J., Arheimer, B., Borga, M., Brazdil, R., Claps, P., Kiss, A., Kjeldsen, T.R., Kriauciuniene, J., Kundzewicz, Z.W., Lang, M., Llasat, M.C., Macdonald, N., McIntyre, N., Mediero, L., Merz, B., Merz, R., Molnar, P., Montanari, A., Neuhold, C., Parajka, J., Perdigao, R.A.P., Plavcova, L., Rogger, M., Salinas, J.L., Sauquet, E., Schaer, C., Szolgay, J., Viglione, A. and Bloeschl, G., 2014 – “Understanding flood regime changes in Europe: a state-of-the-art assessment”. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(7), pp. 2735–2772.
- Hartmann, D.L. 1994 – “Global Physical Climatology”. Academic Press, ISBN 0-12-328530-5.
- IPCC, 1990 – “Climate Change: The IPCC Scientific Assessment. Contribution of Working Group I to the First Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change”. Houghton, J.T., G.J. Jenkins and J.J. Ephraums (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 365 pp.
- IPCC, 1992 – “Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Report prepared by Working Group I”. Houghton, J.T., B.A. Callander and S.K. Varney (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 200 pp.

- IPCC, 1996 – “Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change”. Houghton, J.T., L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 572 pp.
- IPCC, 2000 – “Special Report on Emissions Scenarios”. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Nakićenović, N., Swart, R. (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- IPCC, 2001 – “Climate Change 2001: The Scientific Basis”. Contribution of the Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- IPCC 2007 – “Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change”. Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z and others (eds), Cambridge University Press, Cambridge, URL: <http://www.ipcc.ch/>.
- IPCC 2014 – “Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability”. Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, URL: <http://www.ipcc.ch/>.
- IPSL 2005 – “The new IPSL climate system model: IPSL-CM4”. Institut Pierre Simon Laplace des Sciences de l’Environnement Global, Paris, France, 73 pp.
- James, R., Washington, R., Schleussner, C.F., Rogelj, J. and Conway, D., 2017 – “Characterizing half-a-degree difference: a review of methods for identifying regional climate responses to global warming targets”, *Wiley Interdisciplinary Reviews-Climate Change* 8(2), pp. 1–23.
- Jungclaus J.H., Botzet M., Haak H., Keenlyside N., Luo J.J., Latif M., Marotzke J., Mikolajewicz U. and Roeckner E., 2006 – “Ocean circulation and tropical variability in the AOGCM ECHAM5/MPI-OM”. *J Climate* 19(16), pp. 3952–3972.
- K-1 model developers, 2004 – “K-1 coupled model (MIROC) description”. K-1 technical report, 1, Center for Climate System Research, University of Tokyo, Tokyo, Japan, 34 pp.
- Karamouz, M. and Araghinejad, S., 2008 – “Drought mitigation through long-term operation of reservoirs: case study”. *Journal of Irrigation and drainage Engineering*, 134 (4), 471–478.
- Kay, A.L. and Jones, D. A., 2012 – “Transient changes in flood frequency and timing in Britain under potential projections of climate change”. *International Journal of Climatology* 32(4), pp. 489–502.
- Kittel, T.G.F., Giorgi, F. and Meehl, G.A., 1998 – “Intercomparison of regional biases and doubled CO₂-sensitivity of coupled atmosphere-ocean general circulation model experiments”. *Climate Dynamics*, 14, pp. 1–15.
- Klipsch, J.D., 2003 – “HEC-ResSim, Reservoir simulation system user’s manual, version 2.0”. Davis, California, U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center, Report CPD-82, 426 p.
- Kumar, D.N. and Reddy, M.J., 2006 – “Ant colony optimization for multi-purpose reservoir operation”. *Water Resources Management*, 20, pp. 879–898.
- Kundzewicz, Z.W., Mata, L.J., Arnell, N., Döll, P., Kabat, P., Jiménez, B., Miller, K., Oki, T., Şen, Z. and Shiklomanov, I., 2007 – “Freshwater resources and their management. *Climate Change 2007:*

- Impacts, Adaptation and Vulnerability”. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (ed. by Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J. and Hanson C.E.), pp. 173–210. Cambridge University Press, UK.
- Kuo, C.C., Gan, T.Y. and Hanrahan, J.L., 2014 – “Precipitation frequency analysis based on regional climate simulations in Central Alberta”. *J. Hydrol.* 510, pp. 436–446.
- Labadie, J., 1999 – “Generalized dynamic programming package: GSDUP”. Documentation and user manual, Departement of Civil Engineering, Colorado State University.
- Labadie, J., 2004 – “Optimal operation of multireservoir systems: state-of-art review”. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130 (2), pp. 93–111.
- Legutke S. and Voss R., 1999 – “The Hamburg atmosphere-ocean coupled circulation model ECHO-G”. Technical report 18, German Climate Computer Centre (DKRZ), Hamburg, Germany, (62 p).
- Lehner, B., Doell, P., Alcamo, J., Henrichs, T. and Kaspar, F., 2006 – “Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe: a continental, integrated analysis”. *Climatic Change*, Vol 75, pp. 273–299 DOI: 10.1007/s10584-006-6338-4.
- López-Moreno J.I., Beguería S., Vicente-Serrano S.M. and García-Ruiz J.M., 2007 – “Influence of the North Atlantic Oscillation on water resources in central Iberia: precipitation, streamflow anomalies and reservoir management strategies”. *Water Resources Research* 43: W09411. DOI:10.1029/2007WR005864.
- López-Moreno, J.I. and Vicente-Serrano, S.M., 2008 – “Positive and Negative Phases of the Wintertime North Atlantic Oscillation and Drought Occurrence over Europe: A Multitemporal-Scale Approach”. *Journal of Climate*, Volumen 21, Número 6, pp. 1220–1243.
- López-Moreno, J.I., Vicente-Serrano, S.M., Angulo-Martínez, M., Beguería, S. and Kenawy, A., 2010 – “Trends in daily precipitation on the northeastern Iberian Peninsula, 1955–2006”. *International Journal of Climatology*, Volumen 30, Número 7, pp. 1026–1041.
- Maurer E.P., Brekke L., Pruitt T. and Duffy P.B., 2007 – “Fine-resolution climate projections enhance regional climate change impact studies”. *Eos Trans. AGU* 88(47), p. 504, URL: http://www.agu.org/eos_elec/2007/47-504.html.
- Mays, L.W. and Tung, Y.K., 1992 – “Hydrosystems engineering and management”. McGraw-Hill, New York, (530 p)
- McKee, T.B., Doesken, N.J. and Kleist, J., 1993 – “The relationship of drought frequency and duration to time scale. In Proc. Of the 8th Conference on applied climatology, Anaheim, California, 179–184.
- Mearns, L.O., Giorgi, F., McDaniel, L. and Shields, C., 1995 – “Analysis of daily variability of precipitation in a nested regional climate model: comparison with observations and doubled CO2 results”. *Global and Planetary Change*, Volume 10, Issues 1–4, April, pp. 55–78, URL: [https://doi.org/10.1016/0921-8181\(94\)00020-E](https://doi.org/10.1016/0921-8181(94)00020-E).
- Meehl G.A., Covey C., Delworth T., Latif M., McAvaney B., Mitchell J.F.B., Stouffer R.J. and Taylor K.E., 2007 a) – “The WCRP CMIP3 multi-model dataset: A new era in climate change research”. *Bull Amer Meteor Soc* 88, pp. 1383–1394.
- Meehl, G.A., Stocker, T.F., Collins, W.D., Friedlingstein, P., Gaye, A.T., Gregory, J.M., Kitoh, A., Knutti,

- Murphy, J.M., Noda, A., Raper, S.C.B., Watterson, I.G., Weaver, A.J. and Zhao, Z.C., 2007 b) – “Global Climate Projections”. In: S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller (eds), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Milly P.C., Betancourt J., Falkenmark M., Hirsch R.M., Kundzewicz Z.W., Lettenmaier D.P. and Stouffer R.J., 2008 – “Stationarity Is Dead: Whither Water Management?”. *Science* 01 Feb 2008, Vol. 319, Issue 5863, pp. 573–574, DOI: 10.1126/science.1151915.
- Miranda P., Coelho F.E.S., Tomé A.R., Valente, M.A., Carvalho, A., Pires, C., Pires, H.O., Pires, V.C. and Ramalho, C., 2002 – “20th century Portuguese climate and climate scenarios in Climate Change in Portugal”. *Scenarios, Impacts and Adaptation Measures - SIAM Project* (Santos FD, Forbes K, Moita R, eds), Lisbon: Gradiva Publishers, pp. 23–831.
- Mirhosseini, G., Srivastava, P. and Fang, X., 2014 – “Developing rainfall intensity-duration-frequency curves for Alabama under future climate scenarios using artificial neural networks”. *J. Hydrol. Eng.* 19 (11), DOI: Artn 04014022 10.1061/(Asce) He.1943-5584.0000962.
- Mirhosseini, G., Srivastava, P. and Stefanova, L., 2013 – “The impact of climate change on rainfall Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves in Alabama”. *Reg. Environ. Change* 13, pp. 25–33, URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s10113-012-0375-55>.
- Muñoz-Díaz D. and Rodrigo F.S., 2004 – “Impacts of the North Atlantic Oscillation on the probability of dry and wet winters in Spain”. *Climate Research* 27, pp. 33–43.
- National Institute of Water and Atmosphere, 2010 – “Tools for estimating the Effects of Climate Change on Flood Flow. A guidance for local Government in New Zealand”. Ministry for the Environment, New Zealand Government.
- Novo, M.E., 2018 – “BINGO PROJECT: Impacts of Climate Change on Lower Tagus Aquifers”. Poster in International Conference on Natural Hazards and Risks in a Changing World, University of Potsdam, Germany, 4-5 October 2018.
- Novo, M.E., Oliveira, M.M. and Martins, T., 2018 – “PROJECTO BINGO: Impactos das Alterações Climáticas nos Aquíferos do Baixo Tejo”. 18.º ENASB/SILUBESA, Porto, 10 - 12 Outubro 2018.
- Oliveira, R.P. and Loucks, D.P., 1997 – “Operating rules for multireservoir systems”. *Water Resources Research*, 33, pp. 839–852.
- Oliveira, R.P., Simões, J. e Lopes, J.P., 2010 – “Estratégia Nacional de Adaptação aos Impactos das Alterações Climáticas relacionados com os Recursos Hídricos (ENAAC-RH). Impactos das alterações climáticas relacionadas com os recursos hídricos – Região hidrográfica do Tejo (RH5) e bacia hidrográfica do rio Tejo em território espanhol”. Versão de trabalho, Lisboa.
- Palmer, W., 1965 – “Meteorological Drought”. Research paper No. 45, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, Washington, D.C.
- Parry, M.L., 2000 – “Assessment of potential effects and adaptations for climate change in Europe: The Europe ACACIA Project”. Jackson Environment Institute, University of East Anglia, Norwich, UK, (320 p).
- Pereira, L.S., Rosa, R.D. and Paulo, A.A., 2007 – “Testing a modification of the Palmer Drought

- Severity Index for Mediterranean environments”. In: G. Rossi, T. Vega, B. Bonaccorso (eds.) *Methods and Tools for Drought Analysis and Management*. Springer, Dordrecht, pp. 149-167.
- Pimenta, T., Santos, M.J. and Rodrigues, R., 1997 – “A proposal of indices to identify desertification prone áreas”. *Jornadas de reflexión sobre el Anexo IV de aplicación para el Mediterráneo Norte, Convénio de lucha contra la desertificación, Murcia, Spain, 22-23 May*.
- Prudhomme, C., Reynard, N. and Crooks, S. 2002 – “Downscaling of global climate models for flood frequency analysis: where are we now?”. *Hydrol. Process.* 16, pp. 1137–1150, DOI: 10.1002/hyp.1054.
- Rajczak, J., Pall, P. and Schar, C., 2013 – “Projections of extreme precipitation events in regional climate simulations for Europe and the Alpine Region”. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 118(9), pp.3610– 3626.
- Reynard, N.S., Prudhomme, C. and Crooks, S.M. 1998 – “Climate change impacts for fluvial flood Defence”. Report to Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, FD0424-C, (25p).
- Reynard, N., Crooks, S., Wilby, R. and Kay, A., 2004 – “Climate change and flood frequency in the UK”, URL: <http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/2976/1/N002976CO%5B1%5D.pdf>.
- Rodrigues, R.J., 2018 – “Model for CC water projections and land use scenarios completed and analysed for surface waters in the Tagus River Basin”. In Deliverable 3.4 of BINGO H2020 Project, July.
- Rodríguez, R., Navarro, X., Casas, M.C., Ribalaygua, J., Russo, B., Pouget, L. and Redaño, A., 2014 – “Influence of climate change on IDF curves for the metropolitan area of Barcelona (Spain)”. *Int. J. Climatol.* 34 (3), pp. 643–654, URL: <http://dx.doi.org/10.1002/joc.3712>.
- Rodrigo, F.S. and Trigo, R.M., 2007 – “Trends in daily rainfall in the Iberian Peninsula from 1951 to 2002”. *International Journal of Climatology*, 27, pp. 513–529, DOI: 10.1002/joc.1409.
- Rodrigo, F.S., 2009 – “Changes in the probability of extreme daily precipitation observed from 1951 to 2002 in the Iberian Peninsula”. *Int. J. Climatol.* 30, pp.1512–1525, DOI: 10.1002/joc.1987.
- Rojas, R., Feyen, L., Bianchi, A. and Dosio, A. 2012 – “Assessment of future flood hazard in Europe using a large ensemble of bias-corrected regional climate simulations”. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 117 (D17109).
- Roudier, P., Andersson, J. C. M., Donnelly, C., Feyen, L., Greuell, W. and Ludwig, F., 2016 – “Projections of future floods and hydrological droughts in Europe under a+2degrees C global warming”. *Climatic Change* 135(2), pp. 341–355.
- Russel, G.L., Gornitz, V. and Miller, J.R., 2000 – “Regional sea level changes projected by NASA/GISS atmosphere-ocean model. *Clim. Dun.* 16, pp.789–797.
- Russo, S., Sillmann, J. and Fischer, E. M., 2015 – “Top ten European heatwaves since 1950 and their occurrence in the future”. *Environ. Res. Lett.*, 10, 124003, DOI:10.1088/1748-9326/10/12/124003.
- Salas-Mélia D., Chauvin F., Déqué M., Douville H., Gueremy J.F., Marquet P., Planton S., Royer J.F. and Tyteca S., 2005 – “Description and validation of the CNRM-CM3 global coupled model”. CNRM working note 103, Centre National de Recherches Météorologiques, Météo-France, Toulouse, France, 36 pp.
- Santos, F.D., Forbes, K. and Moita, R., 2001 – “Climate Change in Portugal. Scenarios, Impacts and

- Adaptation Measures - SIAM Project". Grávida. Lisboa.
- Santos, J.F., Pulido-Calvo, I. and Portela, M. M., 2010 – “Spatial and temporal variability of droughts in Portugal”. *Water Resources Research*, 46, W03503, DOI: 0.1029/2009WR008071.
- Santos, J. F. e Portela, M. M., 2010 – “Caracterização de secas em bacias hidrográficas de Portugal Continental: aplicação do índice de precipitação padronizada, SPI, a séries de precipitação e de escoamento”. 10º Congresso da Água, Associação Portuguesa dos recursos Hídricos, APRH, Alvor, Portugal (in portuguese).
- Sechi, G.M. and Sulis, A., 2010 – “Intercomparison of Generic Simulation Models for Water Resource Systems”. *Proceedings of the International Congress on Environmental Modelling and Software*, Ottawa, Canada.
- Shih, J.S. and ReVelle, C., 1995 – “Water-supply operation during drought: a discrete hedging rule”. *European Journal of Operational Research*, 82, pp.163–175.
- SIAM, 2002 – “Climate change in Portugal. Scenarios, Impacts and Adaptation Measures – “SIAM Project”. F. D. Santos, K. Forbes, R. Moita (editors). Grávida, Lisbon, Portugal.
- SIAM II, 2006 – “Alterações Climáticas em Portugal. Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação - Projecto SIAM II”, F.D. Santos e P. Miranda (editores), Grávida, Lisboa.
- Schreider S.Y., Jakeman A.J., Pittock A.B. and Whetton P.H., 1996 – “Estimation of possible climate change impacts on water availability, extreme flow events and soil moisture in the Goulburn and Ovens Basin, Victoria”. *Clim Change* 34, pp. 513–546.
- Stein, S., Miller, C., Stout, S. and Webb, J., 2001 – “Big sandy river basin STELLA reservoir regulation model”. *Proceedings of the World Water and Environmental Resources Congress*, ASCE, Orlando, Florida.
- Steinmann A., Hayes M. and Cavalcanti L., 2005 – “Drought indicators and triggers, in drought and water crises”. *Science, technology and management issues*, Wilhite, D. (ed), CRC press - Taylor & Francis group, ISBN: 0-847-2771-1, pp.71–92.
- Struglia M.V., Mariotti A. and Filograsso A., 2004 – “River discharge into the Mediterranean Sea: Climatology and aspects of the observed variability”. *J Climate* 17, pp. 4740 – 4751, DOI:10.1175/JCLI-3225.1.
- Tabari H., Hosseinzadehtalaei P., Willems P., Saeed S., Brisson E. and Van Lipzig N., 2016 – “How will be future rainfall IDF curves in the context of climate change?”. In *Proceedings of the 4th IAHR Europe Congress*, Liege, Belgium, 27–29 July 2016.
- Tallaksen, L.M. and Van Lanen, H.A.J., 2004 – “Hydrological Drought: Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater”. Elsevier, (579 p).
- Tesfay, A. and Quraishi, S., 2017 – “Impact of Climate Change on the Development of Rainfall Intensity, Duration and Frequency Curves in Chiro and Hurso Stations of Eastern Ethiopia”. *Earth Sciences*. Vol. 6, No. 5, 2017, pp. 97–105., DOI: 10.11648/j.earth.20170605.16, ISSN: 2328-5974 (Print); ISSN: 2328-5982 (Online).
- Tsakiris, G., Pangalou, D. and Vangelis, H., 2007 – “Regional Drought Assessment Based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water Resour Manage* (2007), 21, pp. 821–833, DOI 10.1007/s11269-006-9105-4.

- Thober, S., Kumar, R., Wanders, N., Marx, A., Pan, M., Rakovec, O., Samaniego, L., She J., Wood, E. and Zink, M., 2017 – “Multi-model ensemble projections of European river floods and high flows at 1.5, 2 and 3 degree global warming”. *Environmental Research Letters*, November, URL: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9e3>.
- Trigo R.M., Pozo-Vazquez D., Osborn T.J., Castro-Diez Y., Gamiz-Fortis S. and Esteban-Parra M.J., 2004 – “North Atlantic oscillation influence on precipitation, river flow and water resources in the Iberian Peninsula”. *Int J Climatology* 24, pp. 925–944.
- Trigo R.M., 2011 – “The impacts of the NAO on Hydrological Resources of the Western Mediterranean”. In *Hydrological, Socioeconomic and Ecological impacts of the North Atlantic Oscillation in the Mediterranean region*, Ed. Vicente-Serrano S and Trigo RM, *Advances in Global Change Research* 46, Springer, pp. 41–56.
- Tu, M., Hsu, N. and Yeh, W., 2003 – “Optimization of reservoir management and operation with hedging rules”. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 129 (2), pp. 86–97.
- Ulbrich, U. and Rust, H., 2015 – “Data downscaled to 12km/daily for Europe for the period 2015–2024”. Deliverable 2.2 of BINGO H2020 Project.
- Ulbrich, U. and Rust, H., 2017 – “Ensembles for decadal prediction extremal episodes downscaled to 3-1km/1h; Spatial stochastic precipitation generator for catchments”. Deliverable 2.6 of BINGO H2020 Project.
- Van der Linden, P. and J. Mitchell, Eds., 2009 – “ENSEMBLES: Climate change and its impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES Project”. *Met Office Rep.*, (160 p), URL: http://ensembles-eu.metoffice.com/docs/Ensembles_final_report_Nov09.pdf.
- Veiga da Cunha, L., Oliveira, R. e Nunes, V.B., 2002 – “Impactos das Alterações Climáticas sobre os recursos hídricos de Portugal. A Directiva Quadro da Água: Realidade e Futuro”. III Congresso Ibérico, Sevilha, novembro.
- Vicente-Serrano S.M., Beguería S. and López-Moreno, J.I., 2010 – “A Multiscalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI”. *Journal of Climate*, *American Meteorological Society*, Volume 23, pp. 1696–1718, DOI: 10.1175/2009JCLI2909.1.
- Vicente-Serrano S.M. and Trigo R.M., 2011 – “Hydrological, socio-economic and ecological impacts of the North Atlantic Oscillation in the Mediterranean region”. Springer, (236 p).
- Washington W.M., Weatherly J.W., Meehl G.A., Semtner A.J., Bettge T.W., Craig A.P., Strand W.G., Arblaster J., Wayland V.B., James R. and Zhang Y. 2000 – “Parallel climate model (PCM) control and transient simulations”. *Clim Dyn* 16(10-11), pp. 755–774.
- Wilhite, D.A. and Glantz, M.H., 1995 – “Understanding the drought phenomenon: The role of definitions”. *Water International*, 10(3), pp. 111–120.
- Wurbs, R.A., 2010 – “Water Rights Analysis Package (WRAP). Modeling System Reference Manual”. Texas Water Resources Institute, College Station, Texas, July.
- World Bank, 2010 – “World Development Report 2010: Development and Climate Change”. The International Bank for Reconstruction and Development, World Bank, Washington.
- Yeh, W., 1985 – “Reservoir management and operations models: a state-of-the-art review”. *Water*

Resources Research, 21, pp. 1797–1818.

Yukimoto S., Noda A., Kitoh A., Sugi M., Kitamura Y., Hosaka M., Shibata K., Maeda S. and Uchiyama T. 2001 – “The new Meteorological Research Institute coupled GCM (MRI-CGCM2), Model climate and variability”. *Papers Meteorol Geophys* 51, pp. 47–88.

8.3 Capítulo 3

Abbott, M.B. and Basco, D.R. 1989 – “Computational Fluid Dynamics: An Introduction for Engineers”. Wiley, (425 p).

Abdelaziz, A.A., 2011 – “Minimizing of scour downstream hydraulic structures”. M.Sc. dissertation. Benha University.

Afshar, N.R., Asawa, G.L. and Raju, K.G.R., 1994 – “Air concentration distribution in self-aerated flows”. *Journal of Hydraulic Research*, 32 (4), pp. 623–631.

Ahmed, F. and Rajaratnam, N., 1997 – “The three-dimensional turbulent boundary layer flow around bridge piers”. *Journal of Hydraulic Research*, 35 (2), pp. 209 – 224.

Ahmed, F. and Rajaratnam, N., 1998 – “Flow around bridge piers”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124 (3), pp. 288 – 300.

Aksoy A.O., Bombar G., Arkis T. and Guney M.S., 2017 – “Study of the time-dependent clear water scour around circular bridge piers”. *J Hydrol Hydromech* 65(1), pp.26–34.

Alves, E., 2007 – “Sedimentação em Albufeiras”. Tese de doutoramento, IST, Lisboa.

Amaral, S., 2016 – “Procedimentos de pós-processamento de imagem utilizados no tratamento de dados experimentais. Ensaios laboratoriais de simulação da rotura de barragens de aterro e do escoamento em leitos fluviais com vegetação emersa rígida”. Trabalho para a disciplina de Processamento de Imagem e Geometria Computacional do Programa Doutoral em Engenharia Civil, IST, Lisboa.

Amaral, S., 2017 – “Experimental characterization of the failure by overtopping of embankment dams”. Tese de doutoramento, IST, Lisboa.

Arantes, E.J., 2007 – “Caracterização do escoamento sobre vertedouros em degraus via CFD”. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

Arneson, L.A., Zevenbergen, L.W., Lagasse, P.F. and Clopper, P.E., 2012 – “Evaluating scour at bridges (HEC-18)”. Technical Rep. No. FHWA (Federal Highway Administration) HIF-12-003, Washington, DC.

Assy, T.M., 2001 – “Solution for spillway flow by finite difference method”. *J Hydraul Res, IAHR*, 39(3), pp. 241–247.

Ballio, F. and Radice, A., 2003 – “A non-touch sensor for local scour measurements”. *J. Hydraul. Res.*, 41(1), pp. 105–108.

Berger, C.R. and Winant, E.H., 1991 – “One dimensional Finite Element Model for Spillway”. *Hydraulic Engineering, Proceedings 1991*. Nashville: National Conference, ASCE.

Berger, C., McArdeall, B.W., Fritschi, B., Schlunegger, F, 2010 – “A novel method for measuring the timing of bed erosion during debris flows and floods”. *Water Resour. Res.*, 46, W02502.

Betts P.L., 1979 – “A variation principle in terms of stream function for free surface flows and its

- application to finite element method". *Comp. Fluids*, 7(2), pp. 145–153.
- Bombardelli F.A., 2003 – “Characterization of coherent structures from parallel, LES computations of wandering effects in bubble plumes”. In: Bizier P, DeBarry P (eds) *Proceedings of the 2003 world water and environmental resources congress*. Environmental & Water Resources Institute (EWRI), ASCE, Philadelphia (in CD).
- Bombardelli F.A., Meireles I. and Matos J., 2010 – “Laboratory measurements and multi-block numerical simulations of the mean flow and turbulence in the non-aerated skimming flow region of steep stepped spillways”. *Environ. Fluid Mech.* 2010;11(3), pp. 263–288.
- Bombardelli, F., 2012 – “Computational Multi-Phase Fluid Dynamics to Address Flows Past Hydraulic Structures”. In IAHR, ed. 4th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, 9-11 February 2012, Porto, Portugal, ISBN: 978-989-8509-01-7. Porto, Portugal, pp. 978–989.
- Bouhadji, L., 2004 – “Three dimensional numerical simulation of turbulent flow over spillways”. ASL-AQFlow Inc., Sidney, British Columbia, Canada.
- Bayon, A., Valero, D., García-Bartual, R., Vallés-Morán, José, F. and López-Jiménez, P.A., 2016 – “Performance assessment of OpenFOAM and FLOW-3D in the numerical modeling of a low Reynolds number hydraulic jump”. *Environmental Modelling & Software*, 80, 322–335, URL: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.018>.
- Bradley, A. A., Kruger, A. and Muste, M., 2002 – “Flow measurement in stream using video imagery”. *Water Resources Research* 38(12), pp. 512–518.
- Breusers, H.N.C., Nicollet, G. and Shen, H.W., 1977 – “Local scour around cylindrical piers”. *Journal of Hydraulic Research*, 15 (3), pp. 211 – 252.
- Breusers, H.N.C. and Raudkivi, A.J., 1991 – “Scouring. IAHR Hydraulic Structures Design Manual”. A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- Briaud, J.L., Ting, F.C.K., Chen, H.C., Gudavalli, R., Perugu, S. and WEI, G., 1999 – “SRICOS: Prediction of scour rate in cohesive soils at bridge piers”. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 125(4), pp. 237–246, URL: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(1999\)125:4\(237\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(1999)125:4(237)).
- Burgisser M.F. and Rutschmann P., 1999 – “Numerical solution of viscous 2-D vertical free surface flows: Flow over spillway crests”. *Proc. 28th IAHR Congress*, Technical University, Graz, Austria.
- Cardoso, A.H., 1982 – “Canal de inclinação variável (in Portuguese)”. *Proc. 62/32/3*, National Laboratory for Civil Engineering, Lisbon, Portugal.
- Carvalho, R.F., 2002 – “Acções Hidrodinâmicas em Estruturas Hidráulicas: Modelação Computacional no Ressonância Hidráulica”. PhD Thesis. Universidade de Coimbra, Portugal.
- Carvalho, R.F. and Lemos, C.M., 2008 – “Numerical computation of the flow in hydraulic jump stilling basins”. *Journal of Hydraulic Research* 46(6), pp. 739–75.
- Cassidy J.J., 1965 – “Irrotational flow over spillways of finite height”. *J.Eng. Mech. Div. ASCE.*, 91(6), pp. 155–173.
- Chanel, P.G. and Doering, J.C., 2007 – “An Evaluation of Computational Fluid Dynamics for Spillway Modelling”. 16th Australasian Fluid Mechanics Conference, pp.1201–1206.
- Chanson, H., 1993 – “Stepped spillway flows and air entrainment”. *Canadian Journal of Civil*

- Engineering, 20(3), pp. 422–435, URL: <https://doi.org/10.1139/I93-057>.
- Chanson, H. and Brattberg, T., 2000 – “Experimental study of the air-water shear flow in a hydraulic jump”. *International Journal of Multiphase Flow*, 26, pp. 583–607.
- Chanson, H., 2002 – “Air-water flow measurements with intrusive phase-detection probes: can we improve their interpretation?”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128 (3) DOI: 110.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:3(252), pp. 252–255.
- Chanson H., 2004 – “Design of weirs and spillways”. In: Chanson H. (ed) *Hydraulics of open channel flow*, 2nd edn. Butterworth-Heinemann, Oxford, pp. 391–430.
- Chanson, H., 2004 – “Air-water flows in water engineering and hydraulic structures. Basic processes and metrology”. *Proceedings of the international conference on hydraulics of dams and River structures*, Iran, Tehran, pp. 3–21.
- Chanson, H., 2007 – “Bubbly flow structure in hydraulic jump”. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 26 (3), pp. 367–384, DOI: 10.1016/j.euromechflu.2006.08.001.
- Chanson, H., 2010 – “Hydraulics of skimming flows over stepped channels and spillways”. *Journal of Hydraulic Research*, 32:3, pp. 445–460, DOI: 10.1080/00221689409498745.
- Chanson, H., 2013 – “Hydraulics of aerated flows: qui pro quo?”. *Journal of Hydraulic Research*, 51(3), pp.223–243.
- Chatila, J. and Tabbara, M., 2004 – “Computational modeling of flow over an ogee spillway”. *Computers & Structures*, Volume 82, Issue 22, September 2004, pp. 1805–1812.
- Chen, B. and Cheng, L., 2002 – “Numerical investigation of three-dimensional flow around a free-spanned pipeline”. *The 12th International Conference on Off-shore and Polar Engineering*, ISOPE 2002, Vol. 2, pp. 61–67.
- Chen Q., Dai G.Q. and Liu H.W., 2002 – “Volume of fluid model for turbulence numerical simulation of stepped spillway overflow”. *J Hydraul Eng*, 128(7), pp. 683–688.
- Cheng, X., Luo, L., Zhao, W. and Li, R., 2006 – “Two-phase flow simulation of aeration on stepped spillway”. *Progress in Natural Science*, 14:7, 626–630, DOI: 10.1080/10020070412331344051.
- Chinnarasri C., Kositittiwong D. and Julien P., 2013 – “Model of flow over spillways by computational fluid dynamics”. In: *Proceedings of the institution of civil engineers. Water Manag* 167(WM3), pp. 164–175.
- Chiew, Y.M., 1984 – “Local scour at bridge piers”. Report No. 355. University of Auckland, School of Engineering, New Zealand.
- Coleman, S.E., 2005 – “Clearwater local scour at complex piers”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131 (4), pp. 330–334.
- Cook, C.B., Richmond, M.C. and Serkowski, J.A., 2006 – “The Dalles Dam, Columbia River: Spillway Improvement CFD Study”. Final report. Pacific Northwest National Laboratory.
- Cook, W., Barr, P.J. and Halling, M.W., 2015 – “Bridge failure rate”. *Journal of Performance of Constructed Facilities* 29(3), 04014080, URL: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cf.1943-5509.0000571](https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0000571).
- Costa, J.E., Spicer, K.R., Cheng, R.T., Haeni, P.F., Melcher, N.B. and Thurman, M.E., 2000 – “Measuring stream discharge by non-contact methods: A proof-of-concept experiment”. *Geophysical Research Letters*. 27(4), pp. 553–556.

- Couto, L.T., 2000 – “Erosões localizadas junto de esporões fluviais e encontros de pontes”. Tese de doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa, IST, Lisboa
- Couto, L.T. e Cardoso, A.H., 2001 – “Erosões localizadas junto de encontros e de pilares de pontes, Parte II - Da situação de referência à prática (in Portuguese)”. Recursos Hídricos, 22 (1), pp. 75 – 86.
- Dargahi, B., 1989 – “The turbulent flow field around a circular cylinder”. Experiments in Fluids, 8, pp. 1–12.
- Dargahi, B., 1990 – “Controlling mechanism of local scouring”. Journal of Hydraulic Engineering, 116 (10), pp. 1197–1214.
- Dargahi, B., 2006 – “Experimental study and 3D numerical Simulations for a free overflow spillway”. ASCE, Journal of Hydraulic Engineering 132, pp. 899–907.
- Dey, S. and Raikar, R.V., 2007 – “Characteristics of horseshoe vortex in developing scour holes at piers”. Journal of Hydraulic Engineering, 133 (4), pp. 399–413.
- Diab, R., Link, O. and Zanke, U., 2010 – “Geometry of developing and equilibrium scour holes at bridge piers in gravel”. Canadian Journal of Civil Engineering, 37(4), pp. 544–552.
- Diab, R., 2011 – “Experimental investigation on scouring around piers of different shape and alignment in gravel”. Dr. Ing. Thesis, Darmstadt University of Technology, Germany.
- Dietz, J.W., 1972 – “Construction of long piers at oblique currents: Illustrated by the BAB-Main Bridge Eddersheim”. Report No. 31, Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau.
- Ebtehaj, I., Sattar, A.M., Bonakdari, H. and Zaji, A. H., 2017 – “Prediction of scour depth around bridge piers using self-adaptive extreme learning machine”. Journal of Hydroinformatics, 19(2), pp. 207–224.
- Eghbalzadeh, A. and Javana, M., 2012 – “Comparison of mixture and VOF models for numerical simulation of air centrainment in skimming flow over stepped spillways”. International Conference on Modern Hydraulic Engineering, Procedia Engineering, 28 (2012), pp. 657–660.
- Ellis, J., 1985 – “Numerical analysis of Kielder dam spillway”. Journal of the Institution of Water Engineers 39, pp. 254–270.
- Ettema, R., 1976 – “Influence of bed gradation on local scour”. Report N^o. 124. University of Auckland, School of Engineering, New Zealand.
- Ettema, R., 1980 – “Scour at bridge piers”. Report No. 216. University of Auckland, School of Engineering, New Zealand.
- Ettema, R., Melville, B.W. and Barkdole, B., 1998 a) – “Scale effect in pier-scour experiments”. Journal of Hydraulic Engineering, 124 (6), pp. 639 – 642.
- Ettema, R., Mostafa, E.A., Melville, B.W. and Yassin, A.A., 1998 b) – “Local scour at skewed bridge piers”. Journal of Hydraulic Engineering, 124 (7), pp. 756 – 759.
- Ettema, R., Kirkil, G. and Muste, M., 2006 – “Similitude of large-scale turbulence in experiments on local scour at cylinders”. Journal of Hydraulic Engineering, 132 (1), pp. 33 – 40.
- Ettema, R., Constantinescu, G. and Melville, B.W., 2017 – “Flow-field complexity and design estimation of pier-scour depth: Sixty years since Laursen and Toch”. Journal of Hydraulic Engineering 143(9), 03117006, URL: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0001330](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001330).

- Fadaei-Kermani, E. and Barani, G.A., 2014 – “Numerical simulation of flow over spillway based on the CFD method”. Research Note, Sharif University of Technology, Scientia Iranica A (2014) 21(1), pp. 91–97.
- Fael, C., 2007 – “Erosões localizadas junto de encontros de pontes e respectivas medidas de proteção”. PhD Thesis, University of Beira Interior, Covilhã, Portugal.
- Fael, C., Lança, R. and Cardoso, A., 2014 – “Pier shape and alignment effects on local scour”. Proc. Small scale morphological evolution of coastal, estuarine and rivers systems Conference, Nantes.
- Fattor C. and Bacchiega J., 2009 – “Design conditions for morning-glory spillways: application to potrerrillos dam spillway”. Adv Water Res Hydraul Eng Springer, Berlin, pp. 2123–2128.
- Fernandes, J.N., 2013 – “Compound channel uniform and non-uniform flows with and without vegetation in the floodplain”. Tese de doutoramento, IST, Lisboa.
- Flint, M.M., Fringer, O., Billington, S.L., Freyberg, D. and Diffenbaugh, N.S., 2017 – “Historical analysis of hydraulic bridge collapses in the continental United States”. Journal of Infrastructure Systems 23(3), 04017005, URL: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)is.1943-555x.0000354](https://doi.org/10.1061/(asce)is.1943-555x.0000354).
- Franzetti, S., Larcan, E. and Mignosa, P., 1982 – “Influence of tests duration on the evaluation of ultimate scour around circular piers”. International Conference on the Hydraulic Modelling of Civil Engineering Structures, Coventry, England.
- Frizell, K. H., Ehler, D. and Mefford, B.W., 1994 – “Developing air concentration and velocity probes for measuring in highly-aerated, high-velocity flow”. Proc. Hyd. Engrg. Conf., ASCE, Buffalo, N.Y., pp. 268–277.
- Fujita, I., Shiro, A. and Deguchi, T., 1997 – “Surface velocity measurement of river flow using video images of an oblique angle”. In Proc. 27th Congress of the International Association for Hydraulic Research, theme B. San Francisco, California.
- Fujita, I., Muste, M. and A. Kruger, A., 1998 – “Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications”. Journal of Hydraulic Research. 38(3), pp. 397–414.
- Fukui, J. and Nishitani, M., 2002 – “Survey of bridge damages due to a heavy rain in northern part of Kanto region, Japan”. In: First International Conference on Scour of Foundations International Society of Soil Mech and Foundations.
- Gaudio, R., Tafarjnoruz, A. and de Bartolo, S., 2013 – “Sensitivity analysis of bridge pier scour depth predictive formulae”. Journal of Hydroinformatics, 15(3), pp. 939–951.
- Gessler, D., Hall, B., Pasojevic, M., Holly, F., Pourtaheri, H. and Raphael, N., 1999 – “Application of 3D mobile bed, hydrodynamic model”. Journal of Hydraulic Engineering, 125(7), pp. 737–749.
- Gessler, D., 2005 – “CFD Modelling of Spillway Performance”. Impacts of Global Climate Change 2005, Anchorage, Alaska, USA. American Society of Civil Engineers.
- Graf, W.H. and Istiarto, I., 2002 – “Flow pattern in the scour hole around a cylinder. Journal of Hydraulic Research, 40 (1), pp. 13–20.
- Granell C.N., Mendes L., Viseu, T., Granell J., Duque A.C., Ortas J.G., Herrero, O.D., Río, F.I. and Ruíz, E.G., 2015 – “Experimental and numerical study of a chute spillway”. 2nd International Dam World Conference, LNEC, Lisboa, abril.

- Griffith, R., Rutherford, J.H., Alavi, A., Moore, D.D. and Groeneveld, J., 2007 – “Stability review of the Wanapum spillway using CFD analysis”. Canadian Dam Association Bulletin – FALL 2007 – 18(4).
- Guo, Y., Wen, X., Wu, C. and Fang, D., 1998 – “Numerical modeling of spillway flow with free drop and initially unknown discharge”. J. Hydraul. Res. 36 (5), pp. 785–801.
- Higuera, P., Lara, J.L. and Losada, I.J., 2013 a) – “Realistic wave generation and active wave absorption for Navier–Stokes models”. Coastal Engineering, 71, pp.102–118.
- Higuera, P., Lara, J.L. and Losada, I.J., 2013 b) – “Simulating coastal engineering processes with OpenFOAM”. Coastal Engineering, 71, pp.119–134.
- Ho D.K.H. and Donohoo S.M., 2001 – “Investigation of spillway behaviour under increased maximum flood by computational fluid dynamics technique”. Proceeding 14th Australasian Fluid Mech. Conference, Adelaide University, Adelaide, Australia, pp. 10–14.
- Ho, D.K.H, Boyes, K., Donohoo, S.M. and Cooper, B., 2003 – “Numerical flow analysis for spillways.” 43rd ANCOLD Conference, Hobart, Tasmania.
- Ho, D.K.H., Cooper, B.W., Riddette, K.M. and Donohoo, S.M., 2006 – “Application of numerical modelling to spillways in Australia”. Dams and Reservoirs, Societies and Environment in the 21st Century, Berga et al. (eds), Taylor & Francis Group, London, ISBN 0 415 40423 1.
- Ikegawa, M. and Washizu K., 1973 – “Finite element method applied to analysis of flow over a spillway crest”. Int. J. Numerical Methods Eng., 6, pp. 179–189.
- Jones, J.S., 1989 – “Laboratory studies of the effects of footings and pile groups on bridge pier scour”. Proceedings of the Bridge Scour Symposium, U.S. Federal Highway Administration, Publication FHWARD-90-035, Washington, D.C., pp. 340–359.
- Jones, J.S. and Sheppard, D.M., 2000 – “Local scour at complex pier geometries. Proceedings of World Environmental and Water Resources Congress 2000, ASCE, USA, May.
- Johnson, M. and Savage, M.B., 2006 – “Physical and Numerical Comparison of Flow Over Ogee Spillway in the Presence of Tailwater”. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 132, No.12.
- Kanyabujinja, P.N., 2015 – “CFD Modelling of Ogee Spillway Hydraulics and Comparison with Physical Model Tests”. Master of Engineering Thesis, Stellenbosch University, Stellenbosch, Western Cape, South Africa.
- Keane, R.D. and Adrian, R.J., 1992 – “Theory of cross-correlation analysis of PIV images. Applied Scientific Research, 49(3), pp. 191–215.
- Kim D.G. and Park J.H., 2005 – “Analysis of flow structure over ogee-spillway in consideration of scale and roughness effects by using CFD model”. J. Civil Eng. KSCE., pp. 161–169.
- Kim D.G., 2007 – “Numerical analysis of free flow past a sluice gate”. KSCE J Civ Eng 11, pp. 127–132.
- Kim, S.D., Lee, H.J. and An, S.D., 2010 – “Improvement of hydraulic stability for spillway using CFD model”. International Journal of the Physical Sciences 5(6), pp. 774–780.
- Kim S., Yu K., Yoon B. and Lim Y, 2012 – “A numerical study on hydraulic characteristics in the ice Harbor-type fishway. KSCE J Civ Eng 16, pp. 265–272.
- Kirkil, G., Constantinescu, S.G. and Ettema, R., 2008 – “Coherent structures in the flow field around a circular cylinder with scour hole”. Journal of Hydraulic Engineering, 134 (5), pp. 572–587.

- Kirkil, G., Constantinescu, S.G. and Ettema, R., 2009 – “Detached eddy simulation investigation of turbulence at a circular pier with scour hole”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135 (11), pp. 888–901.
- Khosronejad, A., Kang, S. and Sotiropoulos, F., 2012 – “Experimental and computational investigation of local scour around bridge piers”. *Advances in Water Resources*, 37 (2012), pp. 73–85.
- Kjellesvig, H., 1996 – “Numerical Modelling of Flow over a Spillway”. *Hydroinformatics- 96*.
- Kothyari, U.C., Hager, W.H. and Oliveto, G., 2007 – “Generalized approach for clear-water scour at bridge foundation elements”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133 (11), pp. 1229–1240.
- Kumcu, S.Y., 2016 – “Investigation of Flow Over Spillway Modeling and Comparison between Experimental Data and CFD Analysis”. *Korean Society of Civil Engineers Journal of Civil Engineering*, 21 (3), pp. 994–1003.
- Lança, R., Fael, C., Maia, R., Pêgo, J. and Cardoso, A., 2013 – “Clear-water scour at comparatively large cylindrical piers”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139 (11), pp. 1117–1125.
- Lachat, E., Macher, H., Mittet, M.A., Landes, T. and Grussenmeyer, P., 2015 – “First experiences with kinect V2 sensor for close range 3D modelling”. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40(5W4), pp. 93–100.
- Lara, J.L., Higuera, P. and Losada, I.J., 2014 – “Numerical Modeling of Supercritical Open Channel Bend Flows with OpenFoam using the Volume of Fluid (VOF) Technique”. In IAHR, ed. 3rd IAHR Europe Congress, Book of Proceedings, 2014, Porto - Portugal. ISBN 978-989-96479-2-3. Porto - Portugal, pp. 1–10.
- Laursen, E.M. and Toch, A., 1956 – “Scour around bridge piers and abutments”. *Bulletin N^o. 4, Iowa Highway Research Board, Ames, IA, USA*.
- Leandro, J., Carvalho, R.F., Chachereau, Y. and Chanson, H., 2012 – “Estimating void fraction in a hydraulic jump by measurements of pixel intensity”. *Exp Fluids*, 52 DOI:10.1007/s00348-011-1257-1, pp. 1307–1318.
- Lemos, F.O., 1986 – “Critérios de Dimensionamento de Estruturas Hidráulicas, Lisboa.
- Li, W., Xie, Q. and Chen, C.J., 1989 – “Finite analytic solution of flow over spillways,” *J Mech Eng Div, ASCE*, 1989, 115(12), pp. 2635–2647.
- Lin, B. and Falconer, R. A., 1996 – “Numerical modelling of three-dimensional suspended sediment for estuarine and coastal waters”. *Journal of hydraulic research*, 34(4), pp. 435–456.
- Link, O., Pflieger, F. and Zanke, U., 2008 – “Characteristics of developing scour-holes at a sand-embedded cylinder”. *Int. J. Sediment Res.*, 23(3), pp. 258–266.
- Link, O., Castillo, C., Pizarro, A., Rojas, A., Ettmer, B., Escauriaza, C. and Manfreda, S., 2017 – “A model of bridge pier scour during flood waves”. *Journal of Hydraulic Research* 55(3), 310–323, URL: <https://doi.org/10.1080/00221686.2016.1252802>.
- Loucks, D.P., Van Beek, E., Stedinger, J.R., Dijkman, J.P. and Villars, M.T., 2005 – “Water resources systems planning and management: an introduction to methods, models and applications”. Paris: Unesco.
- Lu J.Y., Shi, Z.Z., Hong, J.H. Lee, J.J. and Raikar R.V., 2011 – “Temporal variation of scour depth at nonuniform cylindrical piers”. *J. Hydraul. Eng., ASCE*, 137(1), pp. 45–56.

- Ma X.D., Dai G.Q., Yang Q., Li G.J. and Zhao L., 2010 – “Analysis of influence factors of cavity length in the spillway tunnel downstream of middle gate chamber outlet with sudden lateral enlargement and vertical drop aerator”. *J Hydrodyn Ser B* 22, pp. 680–686.
- Matos, J., 1999 – “Emulsão de ar e dissipação de energia do escoamento em descarregadores em degraus”. Tese de Doutoramento, IST, Lisboa.
- Matos, J. and Frizell, K.H. 2000 – “Air concentration and velocity measurements on self-aerated flow down stepped chutes”. In *Proceedings of the Joint Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning and Management 2000*, American Society of Civil Engineers, July 30–August 2, 2000. Minneapolis, Minnesota, USA. Google Scholar.
- Matos, J., Frizell, K., Andre, S. and Frizell, K., 2002 – “On the performance of velocity measurement techniques in air-water flows”. *Hydraulic Meas. Exp. Methods* 2002, URL: [http://dx.doi.org/10.1061/40655\(2002\)58](http://dx.doi.org/10.1061/40655(2002)58).
- Meireles, I. 2004 – “Caracterização do escoamento deslizante sobre turbilhões e energia específica residual em descarregadores de cheias em degraus”. Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico de Lisboa, Portugal.
- Meireles I., 2011 – “Hydraulics of stepped chutes: experimental-numerical-theoretical study. Ph.D. thesis, University of Aveiro, Aveiro.
- Meireles I., Renna F., Matos J. and Bombardelli F.A., 2012 – “Skimming, Nonaerated Flow on Stepped Spillways over Roller Compacted Concrete Dams”. *Journal of Hydraulic Engineering* 138(10), pp. 870–877.
- Meireles, I., Fabian A., Bombardelli, F.A. and Matos, J., 2014 – “Air entrainment onset in skimming flows on steep stepped spillways: an analysis”. *Journal of Hydraulic Research*, 52:3, 375–385, DOI: 10.1080/00221686.2013.878401.
- Melo, J.F., 2001 – “Acções Hidrodinâmicas em Soleiras de Bacias de Dissipação de Energia por Jactos”. Tese de doutoramento, IST, Lisboa.
- Melo, J.F. and Mendes, L., 2017 – “Fierza dam - study and modeling for spillways nr.3 and nr.4. Final report”. Relatório LNEC 232/2017, junho.
- Melville, B.W., 1975 – “Local scour at bridge sites”. Report nº 117. University of Auckland, School of Engineering, New Zealand.
- Melville, B.W. and Raudkivi, A.J., 1977 – “Flow characteristics in local scour at bridge piers”. *Journal of Hydraulic Research*, 15 (4), pp. 373–380, HRL: <https://doi.org/10.1080/00221687709499641>.
- Melville, B.W. and Sutherland, A.J., 1988 – “Design method for local scour at bridge piers”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114 (10), pp. 1210– 226.
- Melville, B.W. and Coleman, S.E., 2000 – “Bridge scour”. Water Resources Publication.
- Melville, B., Coleman, S. and Priestley, S., 2006 – “Local scour at complex piers”. *Proceedings of World Environmental and Water Resources Congress 2006*, ASCE, USA.
- Mendes, L. e Viseu, T., 2013 – “Barragem de Chertioua. Ensaio do descarregador de cheias em modelo reduzido”. Relatório LNEC 323/2013, outubro.
- Mia, M.F. and Nago, H., 2003 – “Design method of time-dependent local scour at circular bridge pier”. *J. Hydraul. Eng.*, ASCE, 129(6), pp. 420–427.

- Milési G. and Causse S., 2014 – “3D numerical modeling of a side-channel spillway”. In: Gourbesville P, Cunge J, Caignaert G (eds) *Advances in hydroinformatics*. Springer, Singapore, pp. 487–498.
- Millilo, J.M., Richmond, T.C. and Yohe, G.W., 2014 – “Climate change impacts in the United States”. U.S. national climate assessment. Washington, DC: U.S. Global Change Research Program.
- Montagna F., Bellotti G. and Di Risio M., 2011 – “3D numerical modeling of landslide-generated tsunamis around a conical island. *Nat. Hazards* 58, pp. 591–608.
- Moreno, M., Maia, R., Couto, L. and Cardoso, A., 2012 – “Evaluation of local scour depth around complex bridge piers”. *Proc. Int. Conf. on Fluvial Hydraulics River Flow 2012*, R. Murillo, eds., Int. Association for Hydro-Environment Engineering and Research, pp. 935–942.
- Moreno, M., 2016 – “Experimental study of local scour around complex piers”. Tese de doutoramento, FEUP, Porto.
- Moreno M.E., Couto, L., Maia, R. e Cardoso, A.H., 2016 – “Erosões localizadas em pilares complexos de pontes: desempenho de modelos de previsão existentes”. *Revista Recursos Hídricos, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Volume 35, janeiro*.
- Morton, B.R. and Evans-Lopez, J.L., 1986 – “Horseshoe vortices and bridge pier erosion”. *Proceedings 5th Australasian Fluid Mechanics Conference*, Auckland, New Zealand, pp. 256 – 259.
- Murzyn, F. and Chanson, H., 2008 – “Experimental assessment of scale effects affecting two-phase flow properties in hydraulic jumps”. *Experiments in Fluids*, 45 (3), pp. 513–521, DOI: 10.1007/s00348-008-0494-4.
- Muste, M., Fujita, I. and Hauet, A., 2008 – “A large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments”. *Water Res. Res.*, 44(4), pp. 1–14, URL: <http://dx.doi.org/10.1029/2008WR006950>.
- Muzzammil, M. and Gangadhariah, T., 2003 – “The mean characteristics of horseshoe vortex at a cylindrical pier”. *Journal of Hydraulic Research*, 41 (3), pp. 285 – 297.
- Nogueira, H.I.S, Franca, M.J. and Ferreira, R.M.L., 2008 – “Caracterização laboratorial do escoamento turbulento a montante de um cilindro colocado verticalmente em fundo de areia (in Portuguese)”. *Revista de Recursos Hídricos* 29 (2), pp. 27 – 40.
- Oliveto, G. and Hager, W.H., 2002 – “Temporal evolution of clear-water pier and abutment scour”. *J. Hydraul. Eng., ASCE*, 128(9), pp. 811–820.
- Olsen, N.R.B. and Kjellesvig, H.M., 1998 – “Three-dimensional numerical flow modeling for estimation of spillway capacity”. *J. Hydraul. Res., IAHR* 36 5 (1998), pp. 775–784.
- Olsen, N.R.B., 2003 – “Three-dimensional CFD modelling of self-forming meandering channel”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(5), pp. 366–372, URL: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2003\)129:5\(366\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:5(366)).
- Olsen, N.R.B., 2016 – “Numerical modeling of antidune formation and propagation”. *Proceedings of the 13th International Symposium on River Sedimentation*, Stuttgart, Germany, 19-22 September, (150 p).
- Ozturk, M and Aydin, M.C. 2009 – “Verification of a 3D numerical model for spillway aerator”. *Mathematical and Computational Applications*, 14(1), pp. 21–30.

- Palma, J.C.P., 1999 – “Sistema para controlo de caudais de cheia em modelo físico”. Relatório LNEC nº 315/99 CPCE, dezembro.
- Pandey M., Ahmad Z. and Sharma P.K., 2017 – “Scour around impermeable spur dikes: a review”. *ISH J Hydraul Eng.*, URL: <https://doi.org/10.1080/09715010.2017.1342571.22>.
- Parker, G.W., Bratton, L. and Armstrong, D.S., 1997 – “Stream stability and scour assessments at bridges in Massachusetts”. Tech. rep., Geological Survey (US).
- Parsaie, A., Haghiabi, A.H. and Moradinejad, A., 2015 – “CFD modeling of flow pattern in spillway’s approach channel” *Water Resour. Manag.* (2015) 1, pp. 245–251, DOI:10.1007/s40899-015-0020-9.
- Pfleger, F., Rapp, C. and Manhart, M., 2014 – “Experimental investigation on the sediment movement in the vicinity of a cylindrical bridge pier”. *River Flow 2014*, pp. 1701-1708.
- Radice, A. and Tran, C.K., 2012 – “Study of sediment motion in scour hole of a circular pier”. *Journal of Hydraulic Research*, 50 (1), pp. 44 – 51.
- Raffel, M., Willert, C.E., Wereley, S.T. and Kompenhans, J., 2007 – “Physical and Technical Background”. In *Particle Image Velocimetry*, pp. 15–77, in collection, Springer.
- Rajaratnam, N., 1962 – “An experimental study of air entrainment characteristics of the hydraulic jump”. *Journal of The Institution of Engineers (India)*, 42 (7), pp. 247–273.
- Ramos, P.X., Bento, A.M., Maia, R. and Pêgo, J.P., 2016 – “Characterization of the scour cavity evolution around a complex bridge pier”. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 4(2), pp. 128–137.
- Rao, S.K., Sumner, D. and Balachandar, R., 2004 – “A visualization study of fluid-structure interaction between a circular cylinder and a channel bed”. *Journal of Visualization*, 7 (3), pp. 187–199.
- Richardson, E.V. and Davis, S.R., 1995 – “Evaluating scour at bridges”. Third edition. Publication No. FHWA IP 90-017, Hydraulic Engineering Circular No. 18. National Highway Institute, U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- Richardson, E.J. and Panchang, G.V., 1998 – “Three-Dimensional Simulation of Scour-Inducing Flow at Bridge Piers”. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, Vol. 124, 5(530), URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429).
- Richardson, E.V. and Davis, S.R., 2001 – “Evaluating scour at bridges”. Fourth edition. Publication No. FHWA NHI 01-001, Hydraulic Engineering Circular N° 18. National Highway Institute, U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- Rijn, V., 1984 – “Bedform and alluvial roughness”. *J. Hydr. Div. ASCE*, 110, pp. 1733–1754.
- Rodi, W., Constantinescu, G. and Stoesser, T., 2013 – “Large-eddy simulation in hydraulics”. Crc Press.
- Roulund, A., Sumer, B.M., Fredsøe, J. and Michelsen, J., 2005 – “Numerical and Experimental Investigation of Flow and Scour Around a Circular Pile”. *J. Fluid Mechanics*, 534, pp. 351–401.
- Ryu, Y., Chang, K.A. and Lim, H.J., 2005 – “Use of bubble image velocimetry for measurement of plunging wave impinging on structure and associated greenwater”. *Meas. Sci. Technol.*, 16, pp. 1945–1953.

- Sadeque, M.A.F., Rajaratnam, N. and Loewen, M.R., 2008 – “Flow around cylinders in open channels”. *Journal of Engineering Mechanics*, 134 (1), pp. 60 – 71.
- Salim, M. and Jones, J.S., 1996 – “Scour around exposed pile foundations”. *Proc. of the American Society of Civil Engineers “North American Water and Environment Congress 96”*, Anaheim, USA.
- Savage, B.M. and Johnson, M.C., 2001 – “Flow over ogee spillway: physical and numerical model case study”. *J. Hydraulic Engineering, ASCE*, 127 (8), pp. 640–649.
- Serafeim, A., Avgeris, L., Hrissanthou, V. and Bellos, K., 2017 – “Experimental and numerical simulation of the flow over a spillway”. *European Water* 57, pp. 253–260.
- Sheppard, D.M. and Renna, R., 2005 – “Florida bridge scour manual”. Florida Department of Transportation, Tallahassee.
- Shen, H.W., Schneider, V.R. and Karaki, S.S., 1969 – “Local scour around bridge piers”. *Journal of the Hydraulics Division*, 95 (6), pp. 1919–1940.
- Sheppard, D.M., Mufeed, O. and Glasser, T., 2004 – “Large scale clear-water local pier scour experiments”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130 (10), pp. 957 – 963.
- Sheppard, D.M. and Renna, R., 2010 – “Florida bridge scour manual”. Florida Department of Transportation, Tallahassee.
- Shirole, A. and Holt, R., 1991 – “Planning for a comprehensive bridge safety assurance program”. *Transportation Research Record* 1290, pp. 39–50.
- Simarro, G., Fael, C. and Cardoso, A., 2011 – “Estimating equilibrium scour depth at cylindrical piers in experimental studies”. *Journal of Hydraulic Engineering* 137(9), 1089–1093. URL: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0000410](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000410).
- Song C. and Zhou, F., 1999 – “Simulation of free surface flow over spillway”. *J. Hydraul. Eng., ASCE* 125 9 (1999), pp. 959–967.
- Sumer, B.M., 2011 – “Mathematical modelling of scour: A review”. *Journal of Hydraulic Research* 45:6, pp. 723-735, DOI:10.1080/00221686.2007.9521811.
- Sumer, B.M., 2014 – “A review of recent advances in numerical modelling of local scour problems”. In *Proc., 7th Int. Conf. on Scour and Erosion*, pp. 61–70.
- Tabbara M, Chatila J, Awwad R., 2005 – “Computational simulation of flow over stepped spillways”. *J. of Comput. and Struc.*, 83(27), pp. 2215–2224.
- Tanasic, N., Illic, V. and Hajdin, R, 2013 – “Vulnerability assessment of bridges exposed to scour”. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2360, 36–44. URL: <https://doi.org/10.3141/2360-05>.
- Tauro, F., Olivieri, G., Petroselli, A., Porfiri, M. and Grimaldi, S., 2014 – “Surface water velocity observations from a camera: a case study on the Tiber River”. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 11, pp. 11883–11904.
- Teklemariam, E., Korbaylo, B., Groeneveld, J., Sydor, K. and Fuchs, D., 2001 – “Optimization of hydraulic design using computational fluid dynamics, Waterpower XII, Salt Lake City, Utah.
- Teklemariam, E., Shumilak, B., Sydor, K., Murray, D., Fuchs, D. and Holder, G., 2008 – “An integral approach using both physical and computational modeling can be beneficial in addressing the full range of hydraulic design issues”. *CDA Annual Conference*, Winnipeg, Canada.

- Thielicke, W. and Stamhuis, E., 2014 – “PIVlab—Towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in MATLAB”. *Jour. of Open Res. Soft.*, 2(1).
- Toro, J.P., Bombardelli, F.A., Paik, J., Meireles, I. and Amador, A., 2016 – “Characterization of turbulence statistics on the nonaerated skimming flow over stepped spillways: a numerical study”. *Environ Fluid Mech*, DOI:10.1007/s10652-016-9472-1.
- Unger, J. and Hager, W.H., 2007 – “Down-flow and horseshoe vortex characteristics of sediment embedded bridge piers”. *Experiments in Fluids*, 42, pp. 1–19.
- Versteeg, H. and Malalasekera, W., 2007 – “An introduction to Computational Fluid Dynamics: The finite volume method”. England: Prentice Hall.
- Viparelli, M., 1953 – “The flow in the flume with 1:1 slope”. In: *International Association for Hydraulic Research, Joint Conference, Minneapolis, Minesota*. pp. 415–423.
- Viseu, T., 2006 – “Segurança dos Vales a Jusante de Barragens - Metodologias de Apoio à Gestão do Risco”. Tese de doutoramento, IST, Lisboa.
- Viseu, T., Mendes, L. e Gonçalves, A., 2015 – “Reforço de potência do Aproveitamento Hidroeléctrico de Salamonde. Ensaios hidráulicos em modelo reduzido da chaminé de equilíbrio”. Relatório LNEC 231/2015, julho.
- Volkart, P., 1980 – “Self-aerated Flow in Steep, Partially Filled Pipes”. *Journal of the Hydraulics Division*, 108 (9), pp. 1029–1046.
- Wilcox, D.C. 1993. *Turbulence Modeling for CFD*, DCW Industries, Inc. (460 p).
- Wosnik, A., Wyckoff, N. and Lacroix, S., 2008 – “Numerical and physical hydraulic modelling for the upgrading of Canton Dam”. *Hydropower and Dams*, Issue Five, pp. 76–78.
- Wu, W., Rodi, W. and Wenka, T., 2000 – “3D numerical modelling of flow and sediment transport in open channels”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(1), pp. 4–15. URL: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2000\)126:1\(4\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2000)126:1(4)).
- Yanmaz, A.M. and Altinbilek, H.D.G., 1991 – “Study of time-dependent local scour around bridge piers”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(10), pp. 1247–1268.
- Yanmaz, A.M., Köse, Ö., 2007 – “Surface characteristics of scouring at bridge elements”. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 31(2), pp. 127–134.
- York, T.H. and K.A. Oberg. 2002 – “Measuring river velocity and discharge with acoustic Doppler profilers”. *Flow Measurement and Instrumentation*, 13, pp. 191–195.
- Zeng, J., Constatinescu, G. and Weber, L., 2005 – “A fully 3D non-hydrostatic model for prediction of flow, sediment transport and bed morphology in open channels”. In *Proceedings of the 31st IAHR Congress*, September, pp. 1327–1338.
- Zhao, W. and Huhe, A., 2006 – “Large-eddy simulation of three-dimensional turbulent flow around a circular pier”. *Journal of Hydrodynamics*, 18 (6), pp. 765 – 772.
- Zhenwei M.U., Zhiyan Z., Tao Z., 2012 – “Numerical simulation of 3-D flow field of spillway based on VOF method”. *Procedia Eng* 28, pp. 808–812.

8.4 Capítulo 4

- Almeida, A.B. e Viseu, T., 1998 – “Dams and Safety Management at Downstream Valleys”. Livro publicado pela A.A. Balkema, Rotterdam, ISBN 905410 9165.
- Almeida, A.B., Ramos, C.M., Santos, M.A. and Viseu, T., 2003 – “Dam-break flood risk management in Portugal”. Book edited by the National Laboratory of Civil Engineering, Lisbon, Portugal.
- Al-Riffai, M. 2014 – “Experimental study of breach mechanics in overtopped noncohesive earthen embankments”, PhD Thesis, University of Ottawa, Ottawa, Canada.
- Amaral, S.T., 2017 – “Experimental characterization of the failure by overtopping of embankment dams”. Tese de doutoramento, IST, Lisboa.
- Anderson, R.M. and Tullis, B.P., 2013 – “Piano Key Weir hydraulics and labyrinth weir comparison”. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 139, pp.246–253.
- ANPC e INAG, 2009 – “Guia de orientação para elaboração de planos de emergência internos de barragens”. Autoridade Nacional de Proteção Civil. junho.
- Armenio, V., Toscano, P. and Fiorotto, V., 2000 – “On the Effects of a Negative Step in Pressure Fluctuations at the Bottom of a Hydraulic Jump”. *J. Hydraul. Res.* 38(5), pp. 359–368.
- Bento, A.M., Amaral, S., Viseu, T., Cardoso, R. and Ferreira, R.M.L., 2017 – “Direct estimate of the breach hydrograph of an overtopped earth dam”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 6017004. DOI:10.1061/(ASCE) HY.1943-7900.0001294.
- Bowers, C.E. and Tsai, F.Y., 1969 – “Fluctuating Pressures in Spillway Stilling Basins”. *J. Hydr. Div. Proc. ASCE* 95(HY6), 2071–2079.
- Broich, K., 1998 – “Mathematical modeling of dam-break erosion caused by overtopping”. *Proceedings of the 2nd CADAM meeting*, Munich, Germany.
- Brown, R.J. and Rogers, D.C., 1977 – “A simulation of the hydraulic events during and following the Teton Dam failure”. *Proceedings of the Dam-Break Flood Routing Workshop*. Water Resources Council, pp. 131–163.
- CADAM, 1998 – “Concerted action on dam break modelling”. *Proceedings of 1st CADAM meeting*, Wallingford, U.K, March.
- CADAM, 1999 a) – “Concerted action on dam break modelling”. *Proceedings of the 4th CADAM meeting*, Zaragoza, Spain, November.
- CADAM, 1999 b) – “Concerted action on dam break modelling”. *Proceedings of the 3rd CADAM meeting*, Milan, Italy, May.
- Canelas, R.B., Murillo, J. and Ferreira, R.M.L., 2013 – “Two-dimensional depth-averaged modelling of dam-break flows over mobile beds”. *Journal of Hydraulic Research*, 51(4), pp. 392–407. DOI:10.1080/00221686.2013.798891
- Cantwell, B.L. and Murley, K.A., 1988 – “Design flood guidelines, Australia”. *Proceedings of 16th ICOLD Congress*, San Francisco, Vol. IV, Q. 63, R. 15.
- Cardoso, G., 2006 – “Ressalto hidráulico em bacias de dissipação com acessório a jusante de descarregadores de cheias em degraus. Estudo experimental”. *Dissertação de mestrado*, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

- Chadwick, W.L., Casagrande, A., Coombs, H.A., Dowd, M.W., Fucik, E.M., Higginson, R.K., Leps, T.M., Peck, R.B., Seed, H.B. and Jansen, R.B., 1976 – “Failure of Teton Dam”. Independent panel to review cause of Teton Dam failure, U.S. Department of the Interior and State of Idaho, Idaho Falls, Idaho, December.
- Chanson, H., 2009 – “Turbulent air-water flows in hydraulic structures: Dynamic similarity and scale effects”. *Environmental Fluid Mechanics*, 9, pp.125–142.
- Chanson, H., 2013 – “Hydraulics of aerated flows: qui pro quo?”. *Journal of Hydraulic Research*, 51(3), pp.223–243, URL: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00221686.2013.795917>.
- Chee, S.P., 1978 – “Design of erodible Dams”. In *Proceedings of the International Conference on Water Resources Engineering, Vol 1, Fluvial and Coastal Hydraulics*, Bangkok, Thailand.
- Coleman, S.E., Andrews, D.P. and Webby, M.G. 2002 – “Overtopping breaching of noncohesive homogeneous embankments”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(9), pp. 829–838, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:9(829).
- Conde, D., Ricardo, B.C. and Ferreira, R.M.L., 2017 – “A high-performance model for shallow-water simulations in distributed and heterogeneous architectures”. In *EGU General Assembly 2017, Vol. 19*, pp. 2125–2144.
- Conde, D., Telhado, M. J., Viana Baptista, M. A. and Ferreira, R.M.L., 2015 – “Severity and exposure associated with tsunami actions in urban waterfronts: the case of Lisbon, Portugal”. *Natural Hazards*, 79(3), pp. 2125–2144, DOI:10.1007/s11069-015-1951-z
- CNRH, 2012 a) – “Resolução nº 143, 10 de julho de 2012”. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Recursos Hídricos, Brasília.
- CNRH, 2012 b) – “Resolução nº 144, 10 de julho de 2012”. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Recursos Hídricos, Brasília.
- Cristofano, E.A., 1965 – “Method of computing erosion rate for earthfill dams”. USBR, Department of the Interior, Denver, USA.
- Da Singhal, G. and Sharma, N. 2011 – “Rehabilitation of Sawara Kuddu Hydroelectric Project – Model studies of Piano Key Weir in India”. *Proc. Intl Workshop on Labyrinths and Piano Key Weirs PKW 2011*, CRC Press, pp. 241–250.
- Danish Hydraulic Institute, 2009 – “Mike-11 - A Modelling system for rivers and channels. Reference Manual, Horsholm, Denmark.
- Deng, Z., Guensch, G.R., Richmond, M.C., Weiland, M. A. and Carlson, T.J. 2007 – “Prototype measurements of pressure fluctuations in the Dalles Dam stilling basin”. *Journal of Hydraulic Research*, 45:5, pp. 674–678, ISSN: 0022-1686 (Print) 1814-2079 (Online), DOI: 10.1080/00221686.2007.9521803.
- Dodge, R.A., 1988 – “Overtopping flow on low embankment dams. Summary report of model tests”. Report N° REC-ERC-88-3, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
- Dupont, E., Dewals, B. J., Archambeau, P., Erpicum, S. and Pirotton, M., 2007 – “Experimental and numerical study of the breaching of an embankment dam”. In *Proceedings of the 32nd IAHR World Congress, Vol. 32*, pp. 339, Venice, Italy, 1-6 July, 2007.

- Erpicum, S., Archambeau, P., Dewals, B. and Pirotton, M., 2017 – “Hydraulics of Piano Key Weirs: A review”. *Labyrinth and Piano Key Weirs III PKW 2017*, Erpicum et al. (Eds), pp. 27–36.
- Ervine, D., Falvey, H. and Withers, W., 1997 – “Pressure fluctuations on plunge pool”. London: u.n.
- Faëh, R., 2007 – “Numerical modeling of breach erosion of river embankments”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(9), pp.1000–1009.
- Ferbus, V. and Spitaels, T., 2013 – “Submersion de digues en matériau non cohésif”. B. Eng. Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgium (in French).
- Ferreira, R.M.L. and Leal, J.G.A.L., 1998 – “1-D Mathematical Modelling of the Instantaneous-Dam-Break Flood Wave Over Mobile Bed: Application of TVD and Flux-Splitting Schemes”. CADAM meeting, Munich.
- Ferreira, R.M.L., Amaral, S., Leal, J.G.A.B. and Spinewine, B., 2006 – “Discontinuities in geomorphic dam-break flows”. *River Flow 2006 – International Conference on Fluvial Hydraulics*, Sept. 6-8, Lisbon, Vol. 1, pp. 1521–1530.
- Franca, M.J., Gézero, I., Ferreira, R.M.L., Amaral, S. and Montenegro, H.D.B., 2007 – “The failure of the Fonte Santa mine tailing dam (Northeast Portugal)”. *Proc. 5th River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, RCEM 2007*, Dohmen-Janssen and Hulscher (eds), pp: 1153–1160. ISBN0415453631.
- Franco A.B., 1996 – “Modelação computacional e experimental de escoamentos provocados por roturas de barragens”. Tese de doutoramento, IST, Lisboa.
- Franco, A.B., 1999 – “Propagação de cheias com ondas de frente abrupta. Modelação computacional bidimensional (Modelo BIPLAN)”. *Revista Recursos Hídricos Vol 20, N^o2*, Associação Portuguesa de Recursos Hídricos, Lisboa, novembro.
- Fread, D.L., 1988 – “BREACH: An erosion model for earthen dam failures”. National Weather Service, National Oceanic and Atmospheric Administration, Silver Spring, Maryland.
- García, M.H. and Zech, Y., 2007 – “Dam-break flow experiments and real-case data: A database from the European IMPACT research program”. *International Association of Hydraulic Engineering and Research*.
- Gomes, R., 2017 – “Escoamento em descarregadores de cheias em degraus com soleira em teclado de piano: estudo experimental”. Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Gomes, R., Matos, J. e Viseu, T., 2018 – “Capacidade de vazão e dissipação de energia do escoamento em descarregadores de cheias em degraus com soleira em teclado de piano”. 14^o Congresso da Água, Évora, março.
- Graham, W.J., 1999 – “A procedure for estimating loss of live caused by dam failure”. Dam Safety Office DSO-99-06, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, USA.
- Hanson, G. J., Temple, D.M., Morris, M., Hassan, M. and Cook., K. 2005 a) – “Simplified breach analysis model for homogeneous embankments: Part II, Parameter inputs and variable scale model comparisons”. *Proceedings of 2005 U.S. Society on Dams Annual Meeting and Conference*, Salt Lake City, Utah., pp. 163–174.

- Hanson, G. J., Cook, K.R. and Hunt, S.L., 2005 b) – “Physical modeling of overtopping erosion and breach formation of cohesive embankments”. *Transactions of The ASAE*, 48(5), pp. 1783–1794. DOI:10.13031/2013.20012.
- Harris, G.W. and Wagner, D.A., 1967– “Outflow from breached earth dams”. University of Utah, Salt Lake City, Utah.
- IMPACT, 2005 – “Final technical report of the Impact Project. Investigation of extreme floods process and uncertainty”. 5th EC Framework Programme, H.R. Wallingford.
- Jack, R., 1996 – “The mechanics of embankment failure due to overtopping flow”. MSc Thesis. University of Auckland. New Zealand.
- Kabiri-Samani, A. and Javaheri, A., 2012 – “Discharge coefficient for free and submerged flow over Piano Key Weirs”. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 50, no 1, pp. 114–120.
- Khanh, H.T., Sy Quat, M. and Xuan Thuy, D., 2011 – “P.K. weirs under design and construction in Vietnam”. *Proc. Intl Workshop on Labyrinths and Piano Key Weirs PKW 2011*, CRC Press, pp. 225–232.
- Laugier, F., Vermeulen, J. and Blancher, B., 2017 – “Overview of design and construction of 11 Piano Key Weirs spillways developed in France by EDF from 2003 to 2016”. *Labyrinth and Piano Key Weirs III PKW 2017*, *Epicum et al. (Eds)*, pp. 37–41.
- Leal, J.G.A.B., Ferreira, R.M.L. and Cardoso, A.H., 2002 – “Dam-break waves on movable bed”. In “RIVER FLOW 2002”, Bousmar, D. and Zech, Y. ed., Balkema, Vol. 2, pp. 981–990.
- Leal, J.G.A.B., Ferreira, R.M.L. and Cardoso, A.H., 2006 – “Dam-break wave-front celerity”. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 132, n^o 1, January, pp. 69–76.
- Leal, J., Ferreira, R. and Cardoso, A.H., 2009 – “Maximum Level and Time to Peak of Dam-Break Waves on Mobile Horizontal Bed”, *Journal of Hydraulic Engineering*, November, pp. 995–999.
- Lei n^o 12.334, de 20 de setembro de 2010, Lei de Segurança de Barragens, *Diário Oficial da União*, Brasil.
- Leite Ribeiro, M., Pfister, M., Schleiss, A.J. and Boillat, J.L., 2012 – “Hydraulic design of A-type Piano Key Weirs”. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 50, n^o 4, pp. 400–408.
- Leite Ribeiro, M., Pfister, M. and Schleiss, A.J., 2013 – “Overview of Piano Key weir prototypes and scientific model investigation”. *Proceedings of the 2nd International Workshop on Labyrinth and Piano Key Weirs PKW 2013*, pp. 273.281, *Epicum et al. (Eds)*, CRC Press, Boca Raton, 2013.
- Lempérière, F. and Ouamane, A., 2003 – “The piano keys weir: a new cost-effective solution for spillways”. *Hidropower & Dams* 10(5), pp. 144–149.
- Lempérière, F., Vigny, J.P. and Ouamane, A., 2011 – “General comments on Piano Key Weirs: The past and present”. *Proc. Intl Workshop on Labyrinths and Piano Key Weirs PKW 2011*, CRC Press, pp. 17–25.
- Lou, W.C., 1981 – “Mathematical modeling of earth dam breaches”. Ph.D. Thesis, Colorado State University, Fort Collins, CO.
- Loukola, E. and Huokuna, M., 1998 – “A Numerical erosion model for embankment dam and its use for risk assessment”. *Proceedings of the 2nd CADAM Workshop, Concerted Action on Dam-Break Modelling (CADAM) Programme*, Munich, Germany, 8–9 October, 1998.

- Macchione, F., 2008 – “Model for predicting floods due to earthen dam breaching. I: Formulation and evaluation”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(12), pp. 1688–1696.
- Magalhães, A.P., Melo, J.F. e Viseu, T., 2007 – “Estudo hidráulico em modelo reduzido do descarregador de cheias do Aproveitamento Hidroeléctrico do Baixo Sabor – Escalão de Jusante”. Relatório LNEC 278/2007.
- Manso, P.A., Bollaert, E.F.R. and Schleiss, A.J., 2009 – “Influence of plunge pool geometry on high-velocity jet impact pressures and pressure propagation inside fissured rock media. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, October, DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000090.
- Marques M.G., Teixeira E.D., Cerezer S.M., Mees A.A.A., Palauro C., Endres L.A.M., Almeida F.M., Feraudy Filho R.P., Dai Prá M. e Canellas A.V.B.L., 2007 – “Estimativa dos Valores Extremos de Pressão em Bacias de Dissipação por Ressalto Hidráulico”. Documento interno.
- Matos, J., 1999 – “Emulsão de ar e dissipação de energia do escoamento em descarregadores em degraus”. Dissertação de doutoramento, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Meireles, I., 2004 – “Caracterização do escoamento deslizante sobre turbilhões e energia específica residual em descarregadores em degraus”. Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Melo, J., 2001 – “Acções Hidrodinâmicas em Soleiras de Bacias de Dissipação de Energia por Jactos”. Tese de doutoramento, IST, Lisboa.
- Mohamed, M.A.A., Samuels, P.G., Morris, M.W. and Ghataora, G.S., 2002 – “Improving the accuracy of prediction of breach formation through embankment dams and flood embankments”. *River Flow 2002: 1st International Conference on Fluvial Hydraulics*, Louvain-la-Neuve, Belgium, 3–6 September, pp. 663–673.
- Morris, M.W. and Hassan, M.A.A.M., 2004 – “Breach Formation: Laboratory and numerical modelling (Workshop Presentation)”. *Proceedings of the 4th IMPACT Project Workshop*, Zaragoza, Spain, 3–5 November, (CD-ROM).
- Morris, M.W., Wahl, T.L., Tejral, R.D., Hanson, G.J. and Temple, D.M., 2014 – “Evaluation and development of physically-based embankment breach models”. PAP – 1065, BUREC, Denver.
- Müller, C., 2015 – “Hydraulics of plane dike breaches”. ETH Zurich, Switzerland.
- Müller, C., Frank, P.J. and Hager, W. H., 2016 – “Dyke overtopping: effects of shape and headwater elevation”. *J. of Hydraulic Research*, 54(4), pp. 410–422, DOI:10.1080/00221686.2016.1170072.
- Orendorff, B., 2009 – “An experimental study of embankment dam breaching”, PhD Thesis, University of Ottawa, Canada.
- Orendorff, B., Al-Riffai, M., Nistor, I. and Rennie, C.D., 2013 – “Breach outflow characteristics of non-cohesive embankment dams subject to blast”. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40(3), pp. 243–253, DOI:10.1139/cjce-2012-0303
- Ouamane, A. and Lempérière, F., 2006 – “Design of a new economic shape of weir”. *Proc. Intl Symposium on Dams in the Societies of the 21st Century*, Barcelona, pp. 463–470.
- Paquier, A., Nogues, P. and Herledan, R., 1998 – “Model of piping in order to compute dambreak wave”. *Proceedings of the 2nd CADAM Workshop, Concerted Action on Dam-Break Modelling (CADAM) Programme*, Munich, Germany, 8-9 October, 1998.

- Pettersson, H. and Pettersson, J., 2010 – “Safety Evaluation of the Plunge Pool and the Downstream River of the Baihetan Hydropower Station Using Model Experiments”. Linköping: Department of Management and Engineering at Linköping’s University.
- Peviani, M.A., 1999 – “Simulation of earth-dams breaking processes by means of a morphological numerical model”. Proceedings of the 4th CADAM Workshop, Concerted Action on Dam-Break Modelling (CADAM) Programme, Zaragoza, Spain, 17–18, November, 1999.
- Pfister, M., Ercicum, S., Machiels, O. Schleiss, A.J. and Pirotton, M. 2012 – “Discussion Discharge coefficient for free and submerged flow over Piano Key Weirs”. Journal of Hydraulic Research 50(6), pp. 642–643.
- Pickert, G., Jirka, G.H., Bieberstein, A. and Brauns, J., 2004 – “Soil/water interaction during the breaching process of overtopped embankments”. In Proceedings of 2nd International Conference on River Flow, Naples, Italy, pp. 903–910.
- Pickert, G., Weitbrecht, V. and Bieberstein, A., 2011 – “Breaching of overtopped river embankments controlled by apparent cohesion”. Journal of Hydraulic Research, 49(2), pp. 143–156.
- Pinheiro, A.N. 1995 – “Acções hidrodinâmicas em soleiras de bacias de dissipação de energia por ressalto”. Tese de doutoramento, IST, Lisboa.
- Pinto, M., 2017 – “Dissipação de energia em descarregadores de cheias em degraus com soleira em teclado de piano: estudo experimental”. Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Ponce, V.M. and Tsivoglou, A.J., 1981 – “Modeling gradual dam breaches”. Journal of Hydraulics division, ASCE, Vol. 107, n^o HY7, pp. 829–838.
- Pralong, J., Vermeulen, J., Blancher, B., Laugier, F., Ercicum, S., Machiels, O., Pirotton, M., Boillat, J.L., Leite Ribeiro M. and Schleiss, A., 2011 – “A naming convention for the Piano Key Weirs geometrical parameters”. Labyrinth and Piano Key Weirs PKW 2011, pp. 271–278.
- Puertas, J. and Dolz, J., 2005 – “Plunge Pool Pressures Due to a Falling Rectangular Jet”. Journal of Hydraulic Engineering, Volume 131, Issue 5, May.
- Pugh, C.A., 1985 – “Hydraulic model studies of fuse plug embankments”. REC-ERC-85-7, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, December.
- Reis, I., 2015 – “Estudo experimental do escoamento em descarregadores de cheias em degraus com soleira em teclado de piano”. Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Rozov, A.L., 2003 – “Modeling of washout of dams”. Journal of Hydraulic Research, 41(6), pp. 565–577.
- RSB, 1990 – “Regulamento de Segurança de Barragens”. Decreto-Lei n. 11/1990 de 6 de janeiro de 1990.
- RSB, 2007 – “Regulamento de Segurança de Barragens”. Decreto-Lei n. 344/2007 de 15 de outubro de 2007.
- RSB, 2018 – “Regulamento de Segurança de Barragens”. Decreto-Lei n. 21/2018 de 28 de março de 2018.
- Sá, L. e Viseu, T., 2011 – “Guia para Elaboração de exercícios relativos aos Planos de Emergência Internos de barragens”. Cadernos Técnicos PROCIV, Autoridade Nacional de Proteção Civil, julho.

- Schmocker, L., 2011 – “Hydraulics of dike breaching”. PhD Dissertation, VAW - Mitteilung 218, R.M. Boes, ed. ETH Zurich, Zürich.
- Schmocker, L. and Hager, W., 2009 – “Modelling dike breaching due to overtopping”. *Journal of Hydraulic Research*, 47(October), pp. 585–597, DOI:10.3826/jhr.2009.3586.
- Schmocker, L., Hager, W.H. and Jovanovic, M., 2010 – “Modelling dike breaching due to overtopping”. *Journal of Hydraulic Research*, 48(4), pp. 547–549.
- Schmocker, L. and Hager, W.H., 2012 – “Plane dike-breach due to overtopping: effects of sediment, dike height and discharge”. *Journal of Hydraulic Research*, 50(6), pp. 576–586, DOI:10.1080/00221686.2012.713034
- Schmocker, L., Frank, P.J. and Hager, W.H., 2014 – “Overtopping dike-breach: effect of grain size distribution”. *Journal of Hydraulic Research*, 52, January, pp. 559–564, DOI:10.1080/00221686.2013.878403
- Seed, R.B. *et al.*, 2006 – “Investigation of the Performance of the New Orleans Flood Protection Systems in Hurricane Katrina on August 29, 2005: Volume I: Main Text and Executive Summary”. Independent Levee Investigation Team, July.
- Singh, V.P., 1996 – “Dam Breach Modeling”. *Technology*, Vol. 17, Springer Science & Business Media.
- Singh, V.P. and Scarlatos, P.D., 1988 – “Analysis of gradual earth-dam failure”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(1), pp. 21–42.
- Singh, V.P., Scarlatos, P.D., Collins, J.G. and Jourdan, M.R., 1988 – “Breach erosion of earthfill dams (BEED) model”. *Natural Hazards*, 1(2), pp. 161–180.
- Spinewine, B., Delobbe, A., Elslander, L. and Zech, Y., 2004 – “Experimental investigation of the breach growth process in sand dikes”. In *Second IAHR international conference on fluvial hydraulics*, Napoli, Italy, pp. 983–993.
- Steezel, H. J. and Visser, P.J., 1992 – “Profile development of dunes due to overflow”. In *Proceedings of the Coastal Engineering*, Venice, Italy, 4-9 October, pp. 2669–2679.
- Tabrizi, A.A., Elalfy, E., Elkholy, M., Chaudhry, M H. and Imran, J., 2017 – “Effects of compaction on embankment breach due to overtopping”. *Journal of Hydraulic Research*, 55(2), pp. 236–247, DOI:10.1080/00221686.2016.1238014.
- Temple, D.M., Hanson, G.J., Neilsen, M.L. and Cook, K.R. 2005 – “Simplified Breach Analysis model for Homogeneous Embankments: Part 1, Background and Model Components”. *USSD Technologies to Enhance Dam Safety and the Environment*, 25th Annual USSD Conference, Salt Lake City, Utah, 6-10 June.
- Tingsanchali, T. and Chinnarasri, C., 2001 – “Numerical modelling of dam failure due to overtopping”. *Hydrological Sciences Journal*, 46(1), pp. 113–130.
- Tinney, E. R. and Hsu, H. Y., 1962 – “Mechanics of washout of an erodible fuse plug”. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 127(1), pp. 31–59.
- Toso, J.W. and Bowers, C.E., 1988 – “Extreme Pressures in Hydraulic-Jump Stilling Basins”. *J. Hydraul. Engng.* 114(8), pp. 829–843.

- Trierweiller, E.F., Amante, R., Teixeira, E.D. e Marques, M.G., 2005 – “Comparação das medições de pressão em bacia de dissipação por ressalto hidráulico no protótipo e nos modelos reduzidos da UHE Porto Colômbia”. XXVI Seminário Nacional de Grandes barragens, Goiânia, Brasil, abril
- USBR, 1995 a) – “Emergency planning and exercise guidelines”. Volume I: guidance documents, Technical Service Center, Department of the Interior, Denver, USA.
- USBR, 1995 b) – “Emergency planning and exercise guidelines”. Volume II: technical handbook, Technical Service Center, Department of the Interior, Denver, USA.
- USBR, 1998 – “Emergency Action Planning”. Proceedings of the International Technical Seminar “Dam and Safety Operation and Maintenance”, Bureau of Reclamation, United States Department of the Interior, Denver, USA, September.
- Van Emelen, S., Zech, Y. and Soares-Frazão, S., 2015 – “Impact of sediment transport formulations on breaching modelling”. *Journal of Hydraulic Research*, 53(1), pp. 60–72.
- Vaskinn, K. A., Lovoll, A., Höeg, K., Morris, M., Hanson, G. and Hassan, M., 2004 – “Physical modeling of breach formation: Large scale field tests”. Proceedings of the Dam Safety Conference, ASDSO, Phoenix, AZ, USA.
- Viseu, T. e Almeida, A.B., 2000 – “Plano de Emergência Interno de barragens”. 5º Congresso da Água, Lisboa, setembro.
- Viseu, T., 2002 – “FLOCODS Project. Work Package WP 3.2 - Modelling dyke-break flows”. 1st Progress Technical and Financial Report. LNEC, Lisbon, October.
- Viseu, T., 2004 – “FLOCODS Project. Work Package WP 3.2 - Modelling dyke-break flows”. Total Activity Report. LNEC, Lisbon, April.
- Viseu, T. e Silva, P.A., 2004 – “Planos de Emergência Internos de barragens: da teoria à realidade. A Barragem de Alqueva e o Vale do Guadiana”. 7º Congresso da Água, Lisboa, março.
- Viseu, T., 2006 – “Segurança dos vales a jusante de barragens - metodologias de apoio à gestão do risco”. Tese de Doutoramento, IST, Lisboa.
- Viseu, T., 2007 – “Identificação das infra-estruturas hidráulicas portuguesas com efeitos transfronteiriços induzidos por acidentes graves”. Grupo de Trabalho sobre “Segurança de Infra-estruturas Hidráulicas e Cheias”, CADC, Madrid, novembro.
- Viseu, T. and Almeida, A.B., 2007 – “Flood risk assessment in dam’s downstream valleys: an approach for safety using numerical and physical models”. Proceedings do 75th Annual Meeting of the ICOLD Symposium “Dam Safety Management. Role of State, Private Companies and Public in designing, constructing and operating of large dams”, S. Petersburg, June.
- Viseu, T. and Almeida, A.B., 2009 – “Dam-break risk management and hazard mitigation”. Capítulo 7 do livro “Dam – break. Modelling, Laboratory Tests, Prevention, Defence and Case Studies” publicado pela WIT press (“editors”: D. de Wrachien and S. Mambretti); ISBN: 978-1-84564-142-9.
- Viseu, T. e Almeida, A.B., 2011 – “Gestão do risco nos vales a jusante de barragens”. *Territorium, Revista de Geografia Física e Aplicada no Ordenamento do Território e Gestão de Riscos Naturais*, nº 18, pp. 33–42, ed. Minerva, Coimbra. ISBN: 0872-8941.

- Viseu, T., Almeida, A.B. and Franco, A.B., 2014 – “Integration of computational and experimental models for dam-break flood risk analysis”. *International Journal of Safety & Security Engineering*, Volume 4, Number 1, WIT Press, ISBN: 2041-9031 (print); 2041-904X (online).
- Viseu, T. e Marcelino, J., 2014 – “Guia de orientação e formulários dos Planos de Ação de Emergência”. *Manual de Políticas e Práticas de Segurança de Barragens. Manual para Empreendedores, Tomo I*, Agência Nacional de Águas do Brasil, World Bank, Coba & LNEC, Brasília, novembro.
- Viseu, T., 2014 – “Aproveitamento Hidroeléctrico de Foz Tua. Observação da bacia de impacto”. *Nota Técnica DHA/NRE 03/2014*, abril.
- Viseu, T. e Amaral, S., 2015 – “Estudo hidráulico em modelo reduzido do Aproveitamento Hidroeléctrico de Foz Tua. Relatório Final”. *Relatório LNEC 80/2015*, março.
- Viseu, T., Carvalho, R.F., Marques, L. and José Dias da Silva, J., 2018 – “Pressure and velocity measurements in prototype. The case of Foz Tua Dam plunge pool”. *Proceeding da Third International Dam World Conference*, Foz de Iguazu, Brasil, setembro
- Visser, P.J., 1995 – “Application of sediment transport formulae to sand-dike breach erosion”. *Communication on hydraulic and geotechnical engineering. Faculty of Civil Engineering, Delft University of Technology (TU Delft), Delft, The Netherlands*.
- Visser, P.J., 1998 – “Breach erosion in sand-dikes”. In *Proceedings of the International Conference on Coastal Engineering*, Vol. 3, pp. 3516–3528.
- Visser, K., Hanson, G., Temple, D., Tejral, R. and Neilsen, M., 2013 – “Earthen Embankment Overtopping Analysis using the WinDAM B Software”. *Association of State Dam Safety Officials Annual Conference 2012, Dam Safety 2012*, Vol. 2.
- Wahl, T.L., 1998 – “Prediction of embankment dam breach parameters. A literature review and needs assessment”. *Dam safety research report. Bureau of Reclamation, United States Department of the Interior, Denver, USA*, July.
- Wallner, S., 2014 – “Influence of reservoir shape and size on the flood wave caused by progressive overtopping dam failure”. *PhD Thesis. Vienna, Austria*.
- Wang, Z. and Bowles, D.S., 2006a) – “Three-dimensional non-cohesive earthen dam breach model”. Part 1: Theory and methodology, *Advances in Water Resources*, 29(10), pp. 528–1545.
- Wang, Z. and Bowles, D.S., 2006b) – “Three-dimensional non-cohesive earthen dam breach model”. Part 2: Validation and applications, *Advances in Water Resources*, 29(10), pp. 1490–1503.
- Wang, Z. and Bowles, D.S., 2006c) – “Dam breach simulations with multiple breach locations under wind and wave actions”. *Advances in Water Resources*, 29(8), pp. 1222–1237.
- Winz, E., 2012 – “Einfluss der Kornverteilung auf den zweidimensionalen Deichbruch”. *Zürich: ETH Zurich, Switzerland*.
- Wu, W., 2013 – “Simplified physically based model of earthen embankment breaching”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(8), pp. 837–851, DOI:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000741.
- Yang, Y., Cao, S.Y., Yang, K.J. and Li, W.P., 2015 – “Experimental study of breach process of landslide dams by overtopping and its initiation mechanisms”. *Journal of Hydrodynamics*, 27(6), pp. 872–883, DOI:10.1016/S1001-6058(15)60550-9.

- Zhao, G., Visser, P.J., Ren, Y. and Uijtewaal, W.S.J., 2015 – “Flow hydrodynamics in embankment breach”. *Journal of Hydrodynamics*, 27(6), pp. 835–844, DOI:10.1016/S1001-6058(15)60546-7.
- Zhu, Y.H., 2006 – “Breach growth in clay-dikes”. PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.

8.5 Capítulo 5

- Grassi, L., 2004 – “Direito à Água”. Engenharia Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), Porto Alegre, março, URL: <http://www.abes-rs.org.br/rechid/direito-a-agua.htm>.
- DHA, 2009 – “As teses de investigação do LNEC na área da Hidráulica. Um património que preparou o futuro”. In comemorações dos sessenta anos do DHA, Departamento de Hidráulica e Ambiente, LNEC, Lisboa, janeiro.
- Caldwell, L.W., Scannell, J.P. and Herbert, N., 2013 – “DamWatch: New Monitoring Technology for Dam Safety”. *Hydro Review*, Volume 32, Issue 2, March.
- Moreno, M., 2016 – “Experimental study of local scour around complex piers”. PhD Thesis, FEUP, Porto.
- Rosenthal, U., 1990 – “Beyond disasters: Common grounds for crisis management”. In A. Kouzmin (Ed.), [Special Issue]. *Asian Review of Public Administration*, 2(1-2), pp. 114–122.

8.6 Capítulo 6

- Caldeira, L., 2005 – “Análise de Riscos em Geotecnia. Aplicação a Barragens de Aterro”. Programas de Investigação e de Pós-Graduação na Área Científica de Mecânica de Solos, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, (248 p).
- Hartford, D. and Baecher, G. (2004). *Risk and Uncertainty in Dam Safety*. Thomas Telford Ltd, London, UK, (375 p).
- Moreno, M., 2016 – “Experimental study of local scour around complex piers”. PhD Thesis, FEUP, Porto.
- Sá, L. e Viseu, T., 2011 – “Guia para Elaboração de Exercícios relativos aos Planos de Emergência Internos de Barragens”. *Cadernos Técnicos PROCIV*, Autoridade Nacional de Proteção Civil, julho.

8.7 Principais *sites* consultados

Capítulo 1

- <http://www.lnec.pt/pt/>, consultado a 3 de março de 2018

Capítulo 2

- <http://regclim.coas.oregonstate.edu/visualization/gccv/cmip5-global-climate-change-viewer/index.html>, consultado em 21 de abril de 2018
- <http://portaldoclima.pt/pt/#>, consultado a 28 de maio de 2018
- <https://climate4impact.eu/impactportal/general/index.jsp?q=resolution>, consultado a 1 junho 2018

- <http://www.cordex.org/>, consultado a 2 junho 2018
- www.ensembles-eu.metoffice.com, consultado a 12 de fevereiro de 2018
- <http://www.cecilia-eu.org/>, consultado a 12 de fevereiro de 2018.
- <http://www.eu-watch.org/nl/25222705-Home.html>, consultado a 12 de fevereiro de 2018.
- www.environment.fi/syke/scenes, consultado a 12 de fevereiro de 2018.
- <http://www.refresh.ucl.ac.uk/>, consultado a 12 de fevereiro de 2018.
- <http://www.prepared-fp7.eu/>, consultado a 12 de fevereiro de 2018.
- <http://www.marsol.eu/>, consultado a 12 de fevereiro de 2018.
- <http://www.projectbingo.eu/>, consultado a 12 de fevereiro de 2018.
- <https://www.apambiente.pt/?ref=16&subref=7&sub2ref=9&sub3ref=834>, consultado a 27 de agosto de 2018.

Capítulo 3

- <https://www.ansys.com/>
- <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>
- <https://www.flow3d.com/>
- <https://www.openfoam.com/>
- <http://IHcantabria.com/IHFOAM>, consultado a 14 de junho de 2018

Capítulo 4

- <http://www.poctep.eu/pt-pt/2014-2020/apresenta%C3%A7%C3%A3o-2014-2020>, consultado a 13 de abril de 2018
- https://brasil.elpais.com/brasil/2017/02/13/internacional/1486970163_671581.html, consultado em 16 de abril de 2018.
- <http://www.infocontrol.pt>, consultado em 6 de junho de 2018.

Capítulos 5 e 6

- <https://www.fct.pt/apoios/bolsas/concursos/>
- <http://www.lnec.pt/pt/recrutamento-2/procedimentos-concursais/>
- <http://12.000.scripts.mit.edu/mission2017/dams-and-reservoirs/>, consultado em março de 2018
- http://www.icold-cigb.net/GB/dams/dams_safety.asp, consultado em março de 2018
- <https://graduatedegrees.online.njit.edu/resources/msce/msce-infographics/bridge-scour-protection-preventing-bridge-failure/>; consultado em março de 2018

