

Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente 2015/2016

Sedimentação em albufeiras: efeitos e medidas mitigadoras

O caso de estudo de Venda Nova

MARIANA NOGUEIRA MIRANDA

Dissertação submetida para obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA DO AMBIENTE

Presidente do Júri: Professora Doutora Cidália Maria de Sousa Botelho
(Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Química da FEUP)

Orientador académico: Professor Doutor Rodrigo Jorge Fonseca de Oliveira Maia
(Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da FEUP)

Orientador na empresa: Engenheira Anabela Peres
(EDP – Gestão da Produção de Energia, S.A.)

JULHO DE 2016

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA DO AMBIENTE 2015/2016

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente - 2015/2016, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2016.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

I just jumped at the opportunity to go. Without even thinking about it, really. Because it opened the way to an old – and very naïve – childhood fantasy of mine: to go off into the wilderness, and test myself against all the dangerous things lurking there. And to find that basic animal that I secretly hoped was hidden somewhere inside myself. I imagined, at that point, I'd become a new man, with a strength and courage I'd never know before.

Never cry wolf (1983)

AGRADECIMENTOS

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta dissertação expresse o meu mais sincero agradecimento.

Ao Professor Doutor Rodrigo Maia, orientador desta dissertação, agradeço todo o acompanhamento, disponibilidade, sugestões e a cuidadosa revisão do texto, assim como pela oportunidade que me concedeu em estudar este tema que tanto me cativa.

À Engenheira Anabela Peres, orientadora desta dissertação na EDP Produção, por todo o apoio, pela sua contribuição com material que permitiu conhecer a realidade da albufeira de Venda Nova, e sem a qual não teria sido possível realizar o trabalho de amostragem e análise de sedimentos e água com a EDP Labelec.

À EDP – Gestão da Produção de Energia, em especial ao Engenheiro Nuno Portal e toda a sua equipa pela oportunidade de conhecer o trabalho desenvolvido pela Direção de Sustentabilidade, por todas as palavras de incentivo que me foram dando ao longo da realização deste trabalho e pelos bons momentos passados no Alto Rabagão. Ainda à Direção de Engenharia de Barragens por todo o material que me forneceram sobre Venda Nova, nomeadamente ao Engenheiro Dias da Silva, ao Engenheiro Pedro Pinto, e em especial ao Engenheiro Miguel Oliveira, cuja preciosa ajuda me permitiu ter acesso ao levantamento batimétrico do eixo principal da albufeira. Finalmente, à Direção de Produção Hidráulica, que na pessoa do Engenheiro Ilídio Ferreira, me deu acesso a informações relevantes sobre a barragem e albufeira de Venda Nova.

À EDP Labelec, nomeadamente à Doutora Cristina Marin e ao Doutor Constantino Rosa pelo apoio dado na preparação do trabalho prático a realizar em Venda Nova no âmbito desta dissertação e por me terem permitido assistir a parte do trabalho laboratorial, e ainda ao Alexandre Almeida e ao João Aldeia, que fizeram a recolha das amostras de sedimentos e água, tendo o cuidado de me explicarem o funcionamento dos dispositivos usados, e cuja boa disposição marcou esse dia de forma muito positiva.

À Universidade do Porto, em particular à Seção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente da Faculdade de Engenharia por me ter acolhido nas primeiras semanas da dissertação e em especial à Engenheira Vanessa Ramos pela disponibilidade para conversar comigo sobre o meu tema, e ainda a todos os professores que amavelmente me esclareceram dúvidas e sempre se mostraram disponíveis para me ajudar, especialmente o Professor Doutor Nuno Formigo por esclarecimentos relacionados com a componente ecológica do meu trabalho e ao Professor Doutor Fernando Pereira com questões sobre os parâmetros químicos dos sedimentos.

À minha família e amigos, por todas as palavras de incentivo que me encorajaram e fizeram-me sempre querer dar o meu melhor, mas também por toda a paciência que tiveram comigo naqueles dias em que inconscientemente parecia que só queria falar de sedimentação em albufeiras. Por terem partilhado de forma mais próxima comigo a experiência que foi fazer uma dissertação, por terem a capacidade de me fazerem sorrir nos momentos menos bons e pelos almoços às sextas-feiras, um agradecimento muito especial às futuras engenheiras Ana Cláudia Taveira Proença e Ana Margarida Gorito Gonçalves.

RESUMO

O estudo da sedimentação em albufeiras tem vindo a ganhar relevo em vários países, tentando-se compreender melhor os processos por detrás da sedimentação em albufeiras e os seus efeitos, e procurando-se monitorizar a evolução das albufeiras nesse âmbito e desenvolver soluções que permitam minimizar os correspondentes efeitos. Assim, com esta dissertação é proposta uma metodologia de avaliação dos efeitos da sedimentação nas albufeiras portuguesas, procurando que seja estabelecida uma forma de monitorização da evolução da quantidade de sedimentos acumulados na albufeira, da qualidade dos sedimentos e comparar com evoluções na qualidade da água e transformações no ecossistema. Para além disso, através de uma revisão da literatura são analisadas as atuais medidas que são aplicadas a nível internacional para mitigar e/ou reduzir os efeitos da sedimentação em albufeiras, discutindo-se brevemente a sua eventual aplicação em Portugal.

No sentido de explorar dificuldades na aplicação da metodologia proposta e estabelecer algumas bases para trabalho futuro, foi estudado o caso prático português da albufeira de Venda Nova, localizada em Montalegre, Vila Real. Na albufeira em causa já se tinha realizado alguns estudos com relevo à compreensão da sedimentação em albufeiras, tendo sido feito um levantamento da informação relevante para este trabalho. Foi delineada uma metodologia de trabalho que passou pela análise de dados de levantamentos batimétricos já existentes à data desta dissertação e pela recolha de amostras de sedimentos acumulados no fundo da albufeira e amostras de água integradas e em profundidade, em quatro estações de monitorização estrategicamente distribuídas pela albufeira de Venda Nova. As amostras de água e sedimentos foram alvo de análises físico-químicas, tendo-se dado uma maior relevância à análise da concentração em metais devido à proximidade do inativo Couto Minério da Borralha à albufeira em estudo. Verificou-se que a qualidade dos sedimentos e da água continua a ser influenciada pela Borralha, tendo-se detetado concentrações elevadas dos metais arsénio, cobre, ferro e manganês nos sedimentos, com a zona central da albufeira a apresentar as concentrações de metais mais elevadas nos sedimentos acumulados. As análises da qualidade de água indicaram a presença dos metais ferro, manganês e zinco em todas as amostras, ocorrendo também mercúrio na zona da albufeira correspondente à ribeira de Amiar e cobre em todas as zonas analisadas com exceção da zona mais a montante da albufeira. Em termos de distribuição espacial pela albufeira das contaminações metálicas na água, verifica-se que a estação de monitorização na ribeira de Amiar aparenta ser aquela em que existe maior contaminação por metais na forma dissolvida e em suspensão, comprovando a proveniência desta carga poluente da Mina da Borralha. A diminuição da concentração de oxigénio dissolvido da água aparenta ser um importante fator de desmobilização dos metais dos sedimentos para a água durante o final do verão. A potencial existência de fitoplâncton capaz de diminuir a toxicidade do meio, assim como a aparente existência de fenómenos de transporte dos metais dissolvidos e em suspensão da ribeira de Amiar para a zona central da albufeira serão outros fatores que poderão estar na origem da atual distribuição espacial das contaminações metálicas nos sedimentos.

Palavras-chave: Albufeira; Contaminação; Mitigação; Qualidade da água; Sedimentação; Venda Nova.

ABSTRACT

The study of sedimentation in dam reservoirs has been gaining emphasis in several countries by trying to better understand the processes behind sedimentation in reservoirs and their effects and by striving to monitor its evolution in dam reservoirs and develop solutions to minimize the corresponding effects. Therefore, with this dissertation is proposed a methodology to evaluate the effects of sedimentation in Portuguese dam reservoirs, attempting to establish a way of monitoring the evolution of the amount and the quality of accumulated sediments, that is later compared with the evolutions of water quality and ecosystem transformations. Furthermore, through a literature revision the current measures that are applied internationally to mitigate and/or reduce the effects of sedimentation in dam reservoirs will be analysed, with a brief discussion of its application in Portugal.

In order to explore difficulties in the application of the proposed methodology and to establish some basis for future researches, the Portuguese practical case of the Venda Nova dam reservoir, located in Montalegre, Vila Real, was studied. Some studies with emphasis in understanding the sedimentation of dam reservoirs have previously been conducted regarding this particular reservoir. For this study relevant data was collected and a methodology was established, which consisted in data analysis regarding existent bathymetric surveys and the collection of samples of sediments accumulated in the bottom of the reservoir and of integrated water samples as well as in depth, in four monitoring stations strategically distributed throughout the Venda Nova reservoir. The sediments and water samples were subjected to physicochemical analysis, with particular relevance to the concentration of metals due to the proximity of the inactive Borralha Mine to the reservoir. It was verified that the quality of the sediments and the water keeps being influenced by Borralha Mine by detecting high concentrations of arsenic, copper, iron and manganese in the sediments, with the central area of the reservoir presenting the highest metal concentrations in the accumulated sediments. The analysis regarding water quality indicated the presence of iron, manganese and zinc in all samples, showing also mercury in the reservoir zone of the Amiar branch and copper in all the analyzed areas with exception of the further upstream zone. Regarding spatial distribution of the metal contaminations in the water, it was verified that the Amiar branch appears to be the one with the highest contamination in both dissolved and suspended form, proving the origin of this pollution to be the Borralha Mine. The decrease of dissolved oxygen concentration in the water seems to be an important factor of demobilization of the metals from the sediments to the water, during the end of the summer. The potential existence of phytoplankton capable of diminishing the toxicity of the environment as well as the seemingly existence of transport phenomena of the dissolved and suspended metals in the Amiar branch to the central zone of the dam reservoir are other factors that can be responsible for the current spatial distribution of the metallic contaminations of the sediments.

Keywords: Contamination; Dam Reservoir; Mitigation; Sedimentation; Water Quality; Venda Nova.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	3
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
2. SEDIMENTAÇÃO EM ALBUFEIRAS	5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. TRANSPORTE E ACUMULAÇÃO DE SEDIMENTOS EM ALBUFEIRA.....	5
2.3. EFEITOS DA SEDIMENTAÇÃO EM ALBUFEIRAS	8
2.3.1. Efeitos ambientais	9
2.3.1.1. Na albufeira	10
2.3.1.2. A montante da albufeira	12
2.3.1.3. A jusante da barragem	13
2.3.2. Impactes económicos e sociais.....	15
2.3.3. Impactes na segurança do projeto	15
2.4. ESTUDO DA SEDIMENTAÇÃO EM ALBUFEIRAS NO MUNDO	16
2.5. ESTUDO DA SEDIMENTAÇÃO EM ALBUFEIRAS EM PORTUGAL	19
3. PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA AVALIAR OS EFEITOS DA SEDIMENTAÇÃO EM ALBUFEIRAS EM PORTUGAL	23
3.1. INTRODUÇÃO	23
3.2. QUANTIFICAÇÃO DA ACUMULAÇÃO DE SEDIMENTOS	24
3.3. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS SEDIMENTOS	26
3.3.1. Objetivos do estudo.....	26
3.3.2. Programação das amostragens	27
3.3.3. Seleção dos pontos de amostragem.....	28
3.3.4. Métodos de amostragem.....	28
3.3.5. Fração de sedimentos a analisar	32
3.3.6. Parâmetros a analisar	32
3.3.7. Apresentação dos resultados	34
3.4. EFEITOS NA QUALIDADE DA ÁGUA.....	36
3.5. EFEITOS NOS SERES VIVOS	36
4. MEDIDAS DE PROTEÇÃO E OPERACIONAIS QUE VISAM A MITIGAÇÃO E/OU REDUÇÃO DOS EFEITOS DA SEDIMENTAÇÃO EM ALBUFEIRAS	39
4.1. INTRODUÇÃO	39
4.2. MEDIDAS PARA MITIGAÇÃO E REDUÇÃO DOS SEDIMENTOS ACUMULADOS.....	40
4.3. CASO DA BARRAGEM DE GEBIDUM NA SUÍÇA	45
4.4. APLICAÇÃO EM PORTUGAL	48

5. CASO DE ESTUDO: ALBUFEIRA DE VENDA NOVA	51
5.1. INTRODUÇÃO	51
5.2. ENQUADRAMENTO.....	51
5.2.1. Localização	51
5.2.2. Aproveitamento Hidroelétrico de Venda Nova	54
5.2.3. Caracterização da área em estudo e envolvente	57
5.2.3.1. Clima	57
5.2.3.2. Hidrologia e gestão de recursos hídricos superficiais	58
5.2.3.3. Geologia, hidrogeologia e ocupação do solo	61
5.2.3.4. Erosão hídrica, transporte e acumulação de material sólido	63
5.2.3.5. Fauna e flora.....	67
5.2.3.6. Património arqueológico	69
5.2.4. Fontes de poluição	71
5.3. METODOLOGIA DE TRABALHO.....	74
5.3.1. Quantificação da acumulação de sedimentos	74
5.3.2. Amostragens de sedimentos e água	76
5.3.3. Parâmetros analisados, pré-tratamento das amostras e métodos analíticos	82
5.4. RESULTADOS.....	83
5.4.1. Evolução da quantidade de sedimentos acumulados em albufeira	83
5.4.2. Análise da qualidade dos sedimentos	89
5.4.3. Análise da qualidade da água	96
5.5. CONCLUSÕES	102
5.6. TRABALHO FUTURO	103
6. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO.....	105
6.1. CONCLUSÕES	105
6.2. PROSSEGUIMENTO DE ESTUDOS	106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	107
ANEXOS.....	113
ANEXO I: VALORES DE REFERÊNCIA INTERNACIONAIS PARA A QUALIDADE DOS SEDIMENTOS.....	115
ANEXO II: GRÁFICO DO NÍVEL DA ALBUFEIRA (COTA HICA) E TEMPERATURA MÉDIA DO AR EM VENDA NOVA DE 1951 ATÉ 2016 (DEPARTAMENTO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS DA DIREÇÃO DE PRODUÇÃO HIDRÁULICA DA EDP – GESTÃO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA, S.A.).....	117
ANEXO III: ZONA DE CAÇA MUNICIPAL DE MONTALEGRE (PROC. Nº 3089 – ICNF 2015/2016)	118
ANEXO IV: LOCALIZAÇÃO DOS PERFIS TRANSVERSAIS DO EIXO PRINCIPAL DA ALBUFEIRA DE VENDA NOVA (DEB DA EDP – GESTÃO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA, S.A.)	119
ANEXO V: FOTOGRAFIAS DOS LOCAIS DE AMOSTRAGEM E DAS RESPECTIVAS AMOSTRAS EM VENDA NOVA	120
ANEXO VI: MÉTODOS ANALÍTICOS PARA OS SEDIMENTOS E ÁGUA.....	122

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 – Distribuição de idade das barragens com concessão da EDP em 2016.....	3
Fig. 2 – Distribuição de idade dos açudes da EDP e mini-hídricas Pebble Hydro em 2016	3
Fig. 3 – Distribuição dos sedimentos acumulados em albufeira.....	6
Fig. 4 – Eficiência de retenção de sedimentos tal como proposto por Brune (1953)	7
Fig. 5 – Ecossistema Léntico	11
Fig. 6 – Estratificação térmica sazonal de um lago	11
Fig. 7 – Pá para recolha de sedimentos	29
Fig. 8 – Núcleo recolhido com um Ogeechee corer na albufeira de Rasmussen (EUA).....	30
Fig. 9 – Esquema de um aproveitamento hidroelétrico com bacias de desassoreamento	42
Fig. 10 – Vista em planta e fotografias do sistema de bypass de Asahi no Japão.....	43
Fig. 11 – Esquema do sistema a jusante da albufeira de Gebidum	46
Fig. 12 – Imagem de satélite da albufeira de Gebidum	46
Fig. 13 – Bacia Hidrográfica do rio Cávado	52
Fig. 14 – Carta Cartográfica (1:50000) da albufeira de Venda Nova.....	53
Fig. 15 – Sistema Cávado-Rabagão-Homem	54
Fig. 16 – Barragem de Venda Nova	56
Fig. 17 – Zona de restituição de Venda Nova II e III (março de 2016)	56
Fig. 18 – Variação da precipitação anual segundo dados da estação Venda Nova 03J/07G.....	58
Fig. 19 – Precipitação média mensal segundo dados de 1951 a 1992 da estação Venda Nova 03J/07G	58
Fig. 20 – Médias mensais do volume armazenado e nível da albufeira de Venda Nova no período de 1990-2015	59
Fig. 21 – Médias do volume afluente mensal de Venda Nova no período de 2001-2008	59
Fig. 22 – Carta de uso e ocupação de solo (COS 2007) da zona a jusante e da albufeira de Venda Nova	62
Fig. 23 – Carta de uso e ocupação de solo (COS 2007) da zona a montante da albufeira de Venda Nova	62
Fig. 24 – Carta de uso e ocupação de solo (COS 2007) da zona da ribeira de Amiar (sul da albufeira).....	63
Fig. 25 – Carta Esquemática de distribuição dimensional dos sedimentos da albufeira de Venda Nova	64
Fig. 26 – Localização dos perfis transversais da Ribeira de Amiar em Venda Nova	65

Fig. 27 – Carta de uso e ocupação de solo (COS-Kyoto 2010) da zona a jusante e da albufeira de Venda Nova.....	67
Fig. 28 – Localização dos vestígios arqueológicos	70
Fig. 29 – Reconstrução da Via Romana XVII	70
Fig. 30 – Localização de atividades ou instalações potencialmente geradoras de poluição tóxica da albufeira de Venda Nova	71
Fig. 31 – Zonas de resíduos do Couto Mineiro da Borralha.....	72
Fig. 32 – Localização das estações de amostragem de sedimentos e água.....	77
Fig. 33 – Barco de apoio usado para as amostragens em Venda Nova (maio de 2016)	78
Fig. 34 – Draga Petite Ponar da EDP Labelec (maio de 2016)	79
Fig. 35 – Colheita da amostra 1.1 de sedimentos de fundo (maio de 2016)	79
Fig. 36 – Draga e amostrador Hydro-Bios (maio de 2016)	79
Fig. 37 – Disco de Secchi (maio de 2016).....	79
Fig. 38 – Garrafa de Van Dorn (maio de 2016).....	80
Fig. 39 – Perfil longitudinal para o eixo principal da albufeira de Venda Nova em 1985.....	84
Fig. 40 – Perfil longitudinal para o eixo da ribeira de Amiar na albufeira de Venda Nova	84
Fig. 41 – Perfil transversal na zona da estação de amostragem 1.1	86
Fig. 42 – Perfil transversal na zona da estação de amostragem 2	87
Fig. 43 – Perfil transversal da zona da estação de amostragem 4	87
Fig. 44 – Perfil transversal da zona da estação de amostragem 3 (ribeira de Amiar)	88
Fig. 45 – Amostra de sedimentos da estação 1.1	89
Fig. 46 – Amostra de sedimentos da estação 2	89
Fig. 47 – Amostra de sedimentos da estação 3 antes e após remoção de alguma vegetação.....	89
Fig. 48 – Amostra de sedimentos da estação 4	89
Fig. 49 – Distribuição de cobre total nos sedimentos da albufeira de Venda Nova em 1979.....	93
Fig. 50 – Perfil de temperatura da estação 1.1	97
Fig. 51 – Perfil de oxigénio dissolvido da estação 1.1	97
Fig. 52 – Perfil de temperatura da estação 2	97
Fig. 53 – Perfil de oxigénio dissolvido da estação 2	97
Fig. 54 – Perfil de temperatura da estação 3	98
Fig. 55 – Perfil de oxigénio dissolvido da estação 3	98
Fig. 56 – Perfil de temperatura da estação 4	98
Fig. 57 – Perfil de oxigénio dissolvido da estação 4	98

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Recentes estudos de quantificação de sedimentos em albufeiras (excluindo Portugal).....	16
Tabela 2 – Estudos relevantes de qualidade de sedimentos em albufeiras e/ou a jusante (excluindo Portugal)	18
Tabela 3 – Frequência aconselhada para levantamentos batimétricos	25
Tabela 4 – Programação de atividades de avaliação da sedimentação em albufeiras.....	27
Tabela 5 – Listagem de dispositivos de coring usados pela University of Minnesota	31
Tabela 6 – Lista de alguns possíveis parâmetros a analisar nos sedimentos de fundo.....	33
Tabela 7 – Historial das aberturas da descarga de fundo de Venda Nova	55
Tabela 8 – Médias mensais da estação climatológica de Montalegre com base em dados de 1961 a 1990	57
Tabela 9 – Fauna piscícola para o Rabagão	68
Tabela 10 – Localização das estações de amostragem de sedimentos e água	78
Tabela 11 – Profundidade e cota da colheita e resultados dos ensaios de granulometria	90
Tabela 12 – Teor em metais na fração inferior a 63 µm dos sedimentos em maio de 2016.....	91
Tabela 13 – Concentração em metais dos sedimentos de fundo da estação 1.1 em 2014 e 2016.....	94
Tabela 14 – Teor em orgânicos e nutrientes na fração inferior a 2 mm dos sedimentos em maio de 2016	95
Tabela 15 – Parâmetros gerais e concentração em orgânicos e nutrientes nas amostras de água integradas e em profundidade.....	99
Tabela 16 – Concentração de metais nas amostras de água integradas e em profundidade	100

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

NMC - Nível Máximo de Cheia [m]

Nme - Nível Mínimo de Exploração [m]

NPA - Nível de Pleno Armazenamento [m]

K - Constante da equação de Miller

W_t , W_0 , W_{argila} , W_{silte} , W_{areia} - Massa volúmica dos sedimentos ao fim de t anos na albufeira, inicial, da argila, silte e areia, respetivamente [kg/m^3]

$\%_{argila}$, $\%_{silte}$, $\%_{areia}$ - Percentagem de argila, silte e areia, respetivamente, nos sedimentos que dão entrada na albufeira [%]

t - Tempo [anos]

OD - Concentração de Oxigénio Dissolvido [$mg\ O_2/L$]

SST - Sólidos Suspensos Totais [mg/L]

TOC - Carbono Orgânico Total

Al, As, Cd, Pb, Cu, Cr, Fe, Mn, Hg, Ni, Sn, Ti, V, Zn - Alumínio, Arsénio, Cádmiio, Chumbo, Cobre, Crómio, Ferro, Manganês, Mercúrio, Níquel, Estanho, Titânio, Vanádio, Zinco, respetivamente.

CQO - Carência Química de Oxigénio

PCB - Bifenilpoliclorados

BNA - Modificadores de Nucleótidos de RNA

TPH - Hidrocarbonetos Petrolíferos Totais

HCB - Hexaclorobenzeno

PAH - Hidrocarbonetos Policíclicos aromáticos

PCDD - Policlorodibenzodioxinas

PCDF - Policlorodibenzofuranos

SOD - Carência de oxigénio dos sedimentos (do inglês *Sediment Oxygen Demand*)

APA - Agência Portuguesa do Ambiente

ARH - Administração da Região Hidrográfica

DGT - Direção Geral do Território

GPS - Sigla inglesa para Sistema de Posicionamento Global

HICA - Sistema de coordenadas retangulares verticais do sistema da ex-Direção Geral de Hidráulica para a Hidroelétrica do Cávado

INAG - Instituto Nacional da Água

IPCC - Instituto Português de Cartografia e Cadastro, atualmente denominado de Instituto Geográfico Português (IGP) após fusão com Centro Nacional de Informação Geográfica (CNIG)

IPMA - Instituto Português do Mar e Atmosfera

LiDAR - Sigla inglesa para Light Detection And Ranging

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia

MDT - Modelo Digital de Terreno

PEGEI - Plano Específico de Gestão de Extração de Inertes em Domínio Hídrico para as Bacias do Lima e do Cávado

PGRH2 - Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Cávado, Ave e Leça

SBT - Sigla inglesa para tuneis de *bypass* de sedimentos

SIG - Sistemas de Informação Geográfica

SNIRH - Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos

VMA - Valor Máximo Admissível

WEPP - Modelo do *Water Erosion Prediction Project*

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

A construção de uma barragem leva à criação de uma albufeira, que serve para armazenar a água afluyente durante um determinado período de tempo e, como tal, constitui um importante instrumento na gestão dos recursos hídricos. Tipicamente as barragens são usadas com a finalidade de obter uma fonte de água para abastecimento das populações, agricultura, indústria e serviços, mas também para a produção de energia elétrica. Assim, geralmente a água afluyente é armazenada durante os períodos húmidos e depois usada durante os períodos secos, tendo as barragens ainda a função de proteção contra as cheias, uma vez que podem armazenar a água durante este período e descarrega-la durante um período alargado de tempo. Adicionalmente, uma albufeira permite a realização de uma série de atividades recreativas e ainda a pesca, que acrescentam desta forma valor económico à região em que a barragem é construída.

No entanto, uma barragem leva a transformações na sua envolvente, alterando o tipo de ecossistema e levando a alterações da morfologia, hidrologia e sedimentologia no leito do rio e nas suas margens. A questão em particular da sedimentologia resulta da alteração dos processos erosivos, de acumulação e distribuição de sedimentos, e que se traduz na interrupção do transporte de uma porção dos sedimentos pelo rio, ficando estes acumulados na albufeira. Esta acumulação dos sedimentos pode causar por si diversos efeitos e, dependendo de uma série de fatores, levar à criação de problemas como a perda de capacidade de armazenamento da albufeira, mas também a uma degradação da qualidade de água e impactos no ecossistema, que se podem fazer sentir na albufeira e nas seções a montante e jusante da mesma. Para além dos efeitos diretos do aumento dos sedimentos acumulados na albufeira, os sedimentos podem reter contaminantes como metais pesados e pesticidas, com preocupantes efeitos sobre os seres vivos.

Por estes motivos, o estudo da sedimentação tem vindo a ganhar relevo em vários países, tentando-se compreender cada vez mais os processos por detrás da sedimentação em albufeiras e os seus efeitos, e procurando-se monitorizar a evolução das albufeiras nesse âmbito e desenvolver soluções que permitam minimizar os correspondentes efeitos. A capacidade de armazenamento da albufeira e a sua eficiência de retenção de sedimentos determinam a taxa de perda de capacidade da albufeira, sendo que globalmente verificam-se perdas de armazenamento muito distintas entre várias regiões, algumas das quais com albufeiras que aparentemente não têm problemas resultantes da acumulação de sedimentos e outras que, sem medidas de proteção e operacionais, teriam sido colmatadas por sedimentos num período

de anos muito curto para o tempo de vida espectável de uma barragem. Assim, verifica-se que os países que por norma têm um maior trabalho realizado nesta área são aqueles que têm vindo a enfrentar grandes desafios na gestão de sedimentos das suas albufeiras.

Apesar da importância deste tema, não existe um diploma legal específico que aborde a sedimentação em albufeiras em Portugal, sendo, no entanto, referida no contexto da política da água, nomeadamente na Lei n.º 58/2005, de 25 de dezembro – que transpõe a Diretiva n.º 2000/60/CE e é retificada pelo Rect. n.º 11-A/2006 de 23 de fevereiro, e alterada pelo DL n.º 245/2009 de 22 de setembro, DL n.º 60/2012 de 14 de março e DL n.º 130/2012 de 22 de junho – a proteção dos sedimentos através de uma adequada utilização dos recursos hídricos, conforme ditado pelo artigo 14.º: *devem ser planeadas e reguladas as utilizações dos recursos hídricos das zonas que com elas confinam de modo a proteger a quantidade e qualidade das águas, os ecossistemas aquáticos e os recursos sedimentológicos*. No artigo 33.º, da mesma Lei n.º 58/2005, relativo às medidas de conservação e reabilitação da rede hidrográfica e zonas ribeirinhas é ainda referido que essas medidas compreendem a *correção dos efeitos da erosão, transporte e deposição de sedimentos, designadamente ao nível da correção torrencial*, e ainda que, *a correção dos efeitos de erosão, transporte e deposição de sedimentos que implique o desassoreamento das zonas de escoamento e de expansão das águas de superfície, quer correntes quer fechadas, bem como da faixa costeira, e de qual resulte a retirada de materiais, tais como areias, areão, burgau, godo e cascalho, só é permitida quando decorrente de planos específicos*. Destaque também para o artigo 54.º sobre a monitorização do estado das águas superficiais e subterrâneas e zonas protegidas onde é mencionado que *devem ser definidas para cada região hidrográfica redes de recolha de dados para monitorização de variáveis biológicas, hidrológicas e climatológicas, físico-químicas, de sedimentos e da qualidade química e ecológica da água*. Finalmente, a Lei da Água estabelece ainda a necessidade de fixar normas de qualidade ambiental que determinam *qual a concentração de um determinado poluente ou grupo de poluentes na água, nos sedimentos ou na biota que não deve ser ultrapassada para efeitos de proteção da saúde humana e do ambiente*.

Adicionalmente, refere-se a Portaria n.º 1450/2007, de 12 de novembro, que fixa regras em falta no DL n.º 226-A/2007, de 31 de maio, que por sua vez estabelece o regime de utilização dos recursos hídricos. Esta portaria tem relevo nesta matéria uma vez que estabelece especificações aquando da dragagem e eliminação de sedimentos.

A presente dissertação foi elaborada no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, e resultou de um estágio curricular na EDP – Gestão de Produção de Energia, S.A., mais precisamente na Direção de Sustentabilidade, no período de fevereiro a junho de 2016.

Segundo a Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens, existem mais de duas centenas de barragens em Portugal. Como se pode observar pela Fig. 1, que corresponde à distribuição da idade das barragens portuguesas de albufeira ou a fio-de-água (não se incluí os açudes e as barragens de *Pebble Hydro* que constam na Fig. 2) da EDP em 2016, 26 barragens têm mais de 50 anos, o que corresponde a 50% do total de barragens da EDP. Assim, mesmo supondo baixas taxas de sedimentação e visto que muitas destas barragens nunca tiveram qualquer tipo de intervenção de remoção de sedimentos, o volume de sedimentos atualmente armazenado nas albufeiras poderá ser suficiente para o aparecimento de problemas ambientais e ao funcionamento dos aproveitamentos hidroelétricos, merecendo como tal que seja atempadamente estudado com detalhe, assim como todos os possíveis efeitos e de que forma podem ser minimizados.

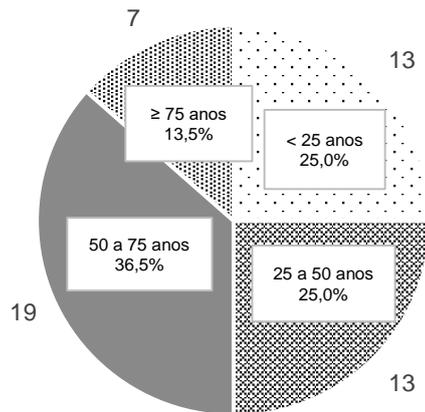


Fig. 1 – Distribuição de idade das barragens com concessão da EDP em 2016

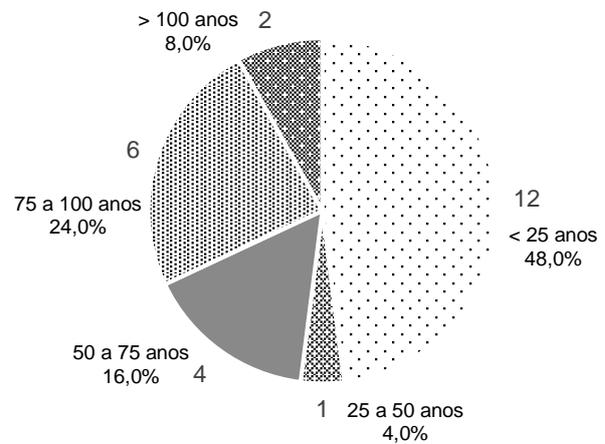


Fig. 2 – Distribuição de idade dos açudes da EDP e mini-hídricas Pebble Hydro em 2016

1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

Os objetivos da dissertação consistiram em definir indicadores e termos de referência para a avaliação dos efeitos da sedimentação em albufeira e ainda em definir medidas de proteção e operacionais que visem a mitigação e/ou redução dos impactes da sedimentação na qualidade de água e nos ecossistemas. Para atingir estes objetivos pretende-se, através de uma revisão da literatura, compreender o processo de acumulação e distribuição de sedimentos em albufeiras assim como os seus efeitos ambientais na zona da albufeira, a jusante e a montante, para além dos efeitos económicos e sociais, e na segurança do projeto de exploração da central hidroelétrica. Com base nos trabalhos já realizados, sobretudo fora de Portugal, é proposta uma metodologia para avaliação dos efeitos da sedimentação nas albufeiras portuguesas, procurando desta forma estabelecer uma forma de monitorização da evolução desta problemática. Igualmente através de uma revisão da literatura analisam-se as atuais medidas que são aplicadas a nível internacional para mitigar e/ou reduzir os efeitos da sedimentação, discutindo-se brevemente a sua aplicação em Portugal. Finalmente, aborda-se um caso prático português, correspondente à albufeira de Venda Nova, no qual se pretende aplicar parcialmente a metodologia de monitorização por forma a detetar dificuldades na sua implementação e servir de base para trabalhos futuros.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação encontra-se organizada em seis capítulos com 6 anexos.

No primeiro capítulo é feita uma introdução ao tema em estudo através de um breve enquadramento da problemática que se pretende abordar e do âmbito da dissertação, assim como a enumeração dos objetivos da presente dissertação e de que modo que pretende alcançar os mesmos, terminando com a descrição da estrutura do documento.

No segundo capítulo procede-se a uma revisão bibliográfica sobre sedimentação em albufeiras, começando-se por abordar a teoria do transporte, acumulação e distribuição de sedimentos em albufeira,

seguinte-se os correspondentes efeitos em termos ambientais, socioeconómicos e segurança, e finalmente apresenta-se o estado de arte, sendo feita uma divisão entre o que tem sido feito de mais relevante fora de Portugal e aquilo que já se começou a explorar a nível nacional.

No terceiro capítulo propõe-se uma metodologia para avaliar o efeito da sedimentação nas albufeiras portuguesas, que se organiza numa avaliação em termos quantitativos, qualitativos e dos efeitos na qualidade da água e no ecossistema. A avaliação da qualidade dos sedimentos é a mais aprofundada devido a ser um tema pouco explorado em Portugal e pela sua importância.

O quarto capítulo consiste numa revisão bibliográfica das medidas de proteção e operacionais que visam a mitigação e/ou redução dos efeitos da sedimentação em albufeira, fazendo-se um levantamento das medidas que são atualmente aplicadas a nível internacional ou que estão a ser desenvolvidas. É explorado mais detalhadamente o caso da barragem de Gebidum da Suíça, como um exemplo de um plano de gestão de sedimentos, perante ser mais uma vez um tópico pouco estudado em Portugal. Para o caso nacional é feito somente um breve ponto de situação do país nesta área.

No quinto capítulo pretende-se aplicar parcialmente a metodologia descrita no terceiro capítulo para um caso português, em concreto da albufeira de Venda Nova em Montalegre, Vila Real. Inicia-se com um enquadramento em que é feito um reconhecimento das características da albufeira e da área envolvente, assim como um levantamento dos estudos relevantes já realizados para esta albufeira em termos de sedimentação e fontes de contaminação. Segue-se a metodologia de trabalho que foi seguida para avaliação da qualidade dos sedimentos na albufeira com a descrição do trabalho de amostragem e análise de vários parâmetros em laboratório e *in situ*, mas não sem antes se explorar a quantificação do volume de sedimentos acumulado no fundo da albufeira através de levantamentos batimétricos já existentes à data do presente trabalho. Posteriormente são apresentados os resultados obtidos, sendo feita a sua interpretação. Termina-se com as conclusões para este estudo em Venda Nova e quais podem ser os trabalhos futuros a realizar nesta albufeira dentro desta temática.

Finalmente o sexto capítulo apresenta as conclusões e o trabalho futuro para a globalidade da dissertação.

2

SEDIMENTAÇÃO EM ALBUFEIRAS

2.1. INTRODUÇÃO

A gestão dos recursos hídricos requer frequentemente a construção de barragens de forma a controlar as irregularidades de caudal afluente ao longo do ano, mas estas estruturas originam também efeitos no curso de água e no transporte sedimentar, levando a mudanças morfológicas de longo termo. A sedimentação que ocorre numa albufeira reduz a capacidade de armazenamento, podendo esta perda ser considerável tendo em atenção o tempo de vida que se pretende que a barragem tenha. Assim, a sedimentação em albufeiras potencialmente constitui um problema que deve ser resolvido no decorrer do século XXI, sobretudo pela sua relevância para a gestão dos recursos hídricos.

O trabalho necessário para compreender a sedimentação em albufeiras e ainda perceber os seus efeitos na qualidade da água e nos ecossistemas já começou a ser desenvolvido em alguns países como nos Estado Unidos da América, na China e em França, mas ainda existe um longo caminho a percorrer neste domínio.

No decorrer deste capítulo, aborda-se a teoria do transporte e acumulação de sedimentos em albufeira, os efeitos da sedimentação em termos ambientais, económicos e sociais, e apresenta-se o estado de arte no mundo, e também, em particular, em Portugal.

2.2. TRANSPORTE E ACUMULAÇÃO DE SEDIMENTOS EM ALBUFEIRA

A quantidade de sedimentos afluentes à albufeira está dependente da quantidade que é produzida a montante da barragem. Desta forma, a produção de sedimentos é função da intensidade e volume de precipitação, tipo de solo e formações geológicas, cobertura e uso do solo, topografia, taxa de erosão a montante, densidade de drenagem, caudal afluente, características geométricas e hidráulicas dos canais do escoamento, e características dos sedimentos como a granulometria e mineralogia (Yang, 1996).

As taxas de erosão de solo podem ser estimadas, recorrendo-se para tal, por exemplo, ao uso da Equação Universal de Perda de Solo, sendo este método baseado em análises estatísticas em 47 localizações de 24 estados nas zonas Central e Este dos Estado Unidos da América. A referida equação dá o valor para um ano típico de acordo com o padrão de precipitação, tipo de solo, topografia, vegetação e uso do solo, sendo que a perda de solo real poderá ser muito superior ou inferior do que o valor estimado (Yang, 1996).

Existem vários outros modelos empíricos de erosão como o de Langbein & Schumm (1958), que se baseia na produção sedimentar pela ação da erosão hídrica, e o de Teixeira & Andrade (1997) que segue o trabalho feito por Fournier (1960) e consiste num conjunto de correlações empíricas entre a precipitação média anual na bacia de drenagem a montante, a área da bacia e a produção sedimentar afluente à albufeira. Existe ainda o modelo RUSLE (Revised Soil Loss Equation) (1997) que utiliza a Equação Universal de Perda de Solo, mas calibra os parâmetros e calcula-os com maior precisão, e também o modelo WEPP (1995), que simula uma variedade de processos físicos relevantes na erosão do solo. Pode-se ainda recorrer aos sistemas LiDAR, que são uma tecnologia que permite detetar remotamente dados a 3D da superfície terrestre e que auxilia no estudo da evolução morfológica.

Depois de terem sido destacados da rocha que lhes deu origem, por ações diversas como a precipitação, alguns sedimentos são transportados através do rio até à albufeira, podendo parte deste material ser armazenado temporariamente a montante da albufeira antes de ser eventualmente arrastado até ao seu local final de deposição. O transporte dos sedimentos que chegam ao rio pode ser modelado por equações de transporte sedimentar ou medido em estações de monitorização no próprio rio.

Na albufeira dão entrada água, sedimentos em suspensão e sedimentos transportados por arrastamento sobre o leito, sendo frequente que a carga de sedimentos suspensos seja muito superior à de carga de sedimentos do leito. À entrada da albufeira, geralmente esta última componente sedimenta, contribuindo para a formação de um delta (Fig. 3), acomodando-se uma porção dos sedimentos em suspensão como cascalho e areia grossa logo na envoltória desse delta, local onde a velocidade da corrente é reduzida. Os sedimentos em suspensão finos são transportados para o interior da albufeira onde se podem depositar em zonas de maior estagnação, e os extremamente finos (partículas de silte mais finas e argilas) mantêm-se em suspensão e saem do reservatório com as descargas de água (Hager, 1998). Em teoria o processo ocorre de forma similar à descrita para qualquer albufeira, no entanto, o volume de sedimentos acumulado, o período em que ocorre a deposição e os respetivos efeitos podem variar substancialmente.

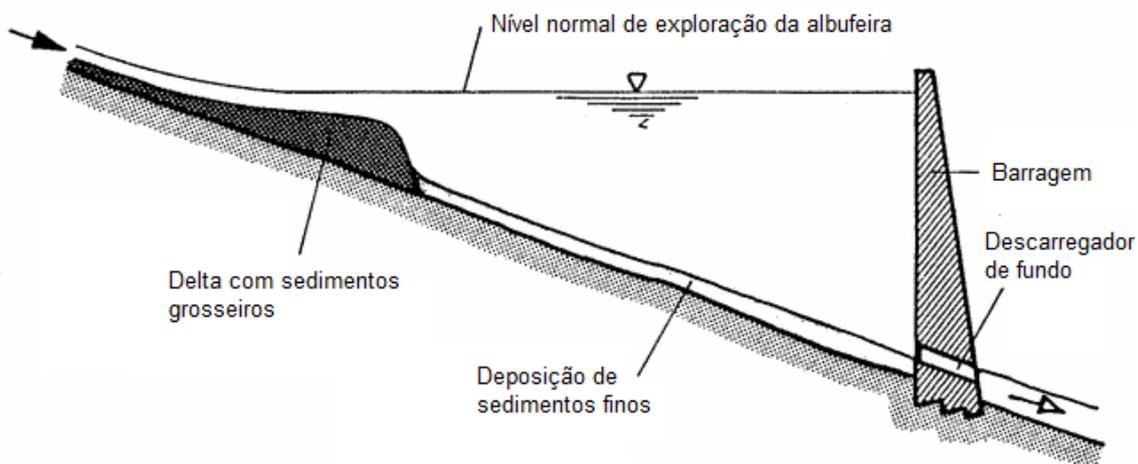


Fig. 3 – Distribuição dos sedimentos acumulados em albufeira (adaptado de Scheuerlein, 1991)

Entrando na albufeira uma mistura de água e sedimentos, surgem frequentemente correntes destes materiais, devido à diferença de massa volúmica entre esta mistura e a água retida na albufeira, sendo designadas de correntes de turbidez. As correntes de turbidez resultam em escoamentos estratificados e cuja diferença de densidade é função das diferenças de temperatura, teor em sais e quantidade de

sedimentos, e independente da pressão e elasticidade dos fluidos envolvidos. Este fluxo de sedimentos e água tem uma densidade maior que a água da albufeira e, como tal, desloca-se em direção ao fundo desta, sendo diluído ao longo da sua trajetória devido à deposição local de sedimentos (Hager, 1998).

Existem diferentes métodos para estimar a distribuição dos sedimentos em albufeira. Um destes métodos é o designado Método Empírico de Redução da Área (*Empirical Area-Reduction Method*) desenvolvido por Borland e Miller (1960) e mais tarde revisto por Lara (1962), que reconhece que a distribuição de sedimentos numa albufeira depende do modo de operação da mesma, das características das partículas dos sedimentos depositados, da forma da albufeira, e do volume dos sedimentos depositados. Outro método é o denominado *Minimum Stream Power Method*, que foi primeiramente derivado por Yang (1971) e originou uma equação que pode ser usada computacionalmente para determinar o perfil longitudinal do fundo de uma albufeira em condições estáveis ou quase estáveis.

Por sua vez, o volume de sedimentos que é depositado numa albufeira depende da capacidade de retenção. A eficiência de retenção de uma albufeira pode ser determinada como a razão entre a quantidade de sedimentos retidos pela quantidade total dos que entram na albufeira, sendo que depende principalmente da velocidade de queda das partículas dos sedimentos, do tamanho e forma da albufeira, e do caudal de entrada. Quanto maior for esta razão maior é o potencial de retenção para todas as granulometrias de sedimentos, pelo que para uma pequena razão, a albufeira acumula maioritariamente sedimentos grosseiros da carga de leito, tal como uma bacia de armazenamento de cascalho. É possível estimar a eficiência de retenção através de métodos empíricos que são baseados em medições de depósitos sedimentares em várias albufeiras, existindo curvas de eficiência de retenção de sedimentos como a de Churchill (1948), para pequenas albufeiras, e a de Brune (1953), para albufeiras de maior dimensão (Fig. 4). Heinemann (1984) e Verstraeten & Poesen (2000) fizeram uma revisão dos métodos anteriormente desenvolvidos, enquanto Toniolo *et al.* (2007) contribuíram para o importante desenvolvimento de um modelo numérico capaz de prever a capacidade de retenção. Garg & Jothiprakash (2010) inferiram que, no uso de um modelo empírico, os resultados melhoram ao incorporar-se a idade da albufeira, e ainda que técnicas que utilizam redes neurais artificiais e programação genética conduzem a melhores resultados do que métodos empíricos convencionais (Yang, 1996) (Hager, 1998) (Juracek, 2015).

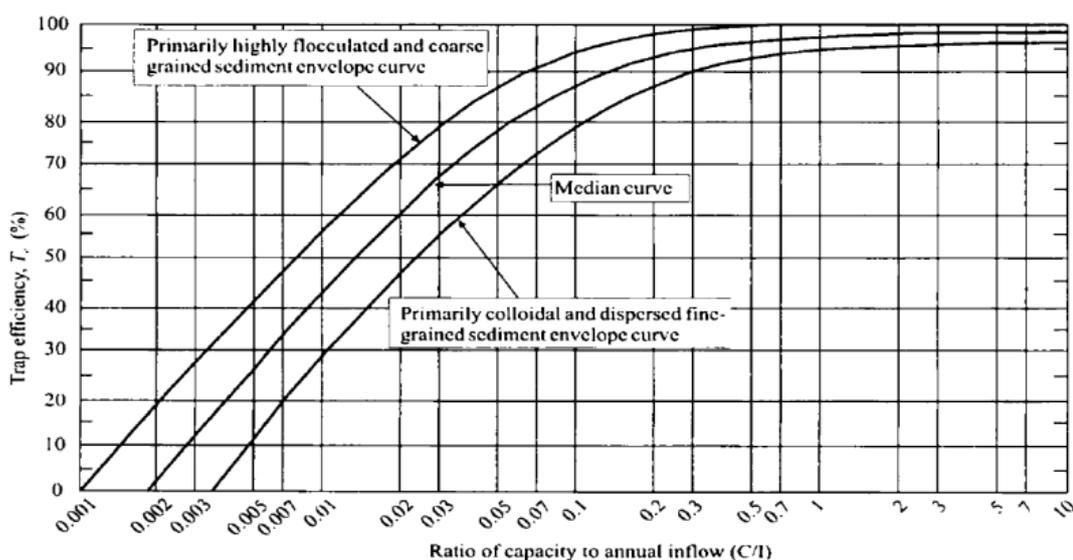


Fig. 4 – Eficiência de retenção de sedimentos tal como proposto por Brune (1953)

Quando a previsão da acumulação de sedimentos é superior a ¼ da capacidade da albufeira, a eficiência de retenção deve ser estimada para se tentar analisar o tempo de vida do reservatório e com essa informação poder adotar medidas que visem recuperar a capacidade perdida. Geralmente a eficiência de retenção diminui continuamente ao longo do tempo, pelo que Yang (1996) sugere que se deve fazer um levantamento batimétrico para determinar o volume efetivo de sedimentos acumulados a cada 10 anos.

Quando se procede à determinação do volume de sedimentos retidos na albufeira através de balanços de massa é necessário conhecer a massa volúmica destes (em termos de massa seca por unidade de volume), isto porque é usada para converter o fluxo mássico total de entrada de sedimentos na albufeira num fluxo volúmico. Os fatores que influenciam a massa volúmica são o modo de operação da albufeira, a textura e o tamanho das partículas de sedimentos depositados, e a taxa de compactação ou consolidação. A massa volúmica inicial pode ser estimada pela equação que se apresenta de seguida que é função do modo de operação da albufeira, sendo que a massa volúmica de cada granulometria é obtida através de tabelas (Yang, 1996).

$$W_0 = W_{argila} \cdot \%argila + W_{silte} \cdot \%silte + W_{areia} \cdot \%areia \quad (1)$$

A equação de Miller (1953) dá a massa volúmica dos sedimentos ao fim de t anos na albufeira:

$$W_t = W_0 + 0,4343K \left(\frac{t}{t-1} \ln(t) - 1 \right) \quad (2)$$

Sendo K uma constante que é baseada no modo de operação da albufeira e na granulometria dos sedimentos, pelo que é determinada similarmente à massa volúmica inicial.

2.3. EFEITOS DA SEDIMENTAÇÃO EM ALBUFEIRAS

Depois de se apresentar a teoria do transporte e acumulação de sedimentos em 2.2, importa compreender os efeitos da sedimentação na albufeira, mas também na seção de montante e jusante do rio.

Antes de mais, será de referir que a construção de uma albufeira afeta socialmente, ambientalmente e economicamente a região, mesmo antes de qualquer benefício ser sentido. Dependendo do propósito da barragem, os benefícios podem variar em termos espaciais e temporais, sendo que é da maior importância certificar-se que aqueles que se pretende obter pela construção da barragem não são limitados temporalmente devido à sedimentação, processo que mesmo podendo ser muito moroso afeta todas as albufeiras que recebem sedimentos transportados pelo rio.

É um erro não considerar a sedimentação na albufeira como fator a atender no projeto de uma barragem, como também a considerar para a sua manutenção, devendo-se atuar de modo a minimizar e reduzir os efeitos da sedimentação a um nível aceitável. Não atuar neste sentido poderá trazer resultados preocupantes no futuro, em termos de gestão de recursos hídricos da região, mas também porque os locais economicamente e tecnicamente viáveis para a construção de uma barragem são limitados. Acrescenta-se ainda que, as consequências da sedimentação em albufeira nos primeiros 50 anos de vida de uma barragem estão bem documentadas, mas os correspondentes potenciais efeitos ainda não são bem compreendidos para as barragens mais antigas, sendo necessário um estudo mais aprofundado que ajudará na correta gestão da albufeira e será o suporte para a tomada de decisão. Os estudos necessários passam também por perceber os efeitos das alterações climáticas no envelhecimento das albufeiras, a determinação da resposta do ecossistema a este processo e às medidas de mitigação que podem ser tomadas, e ainda analisar a evolução dos efeitos já conhecidos.

2.3.1. EFEITOS AMBIENTAIS

Com a transformação de uma seção do rio devido à formação de uma albufeira surgem transformações também a montante e a jusante da mesma, particularmente no que diz respeito ao transporte de sedimentos e aos seus efeitos, pelo que se apresentam de seguida os efeitos ambientais que podem ser provocados pela sedimentação na própria albufeira, mas também a montante e a jusante desta. As considerações seguintes foram baseadas, em grande parte, no capítulo *Technical and Economic Impact of Reservoir Sedimentation* do relatório *Methods of Computing Sedimentation in Lakes and Reservoirs* (UNESCO, 1985).

Os sedimentos são maioritariamente compostos pelos produtos da erosão do solo na bacia hidrográfica, mas também contêm substâncias que resultam da atividade humana e que têm origem no escoamento superficial, em lixiviados do solo irrigado, e em águas residuais urbanas e industriais não tratadas ou com um tratamento insuficiente. Estas substâncias podem ser, então, não só fertilizantes orgânicos como adubos e composto, mas também fertilizantes químicos com azoto, fósforo ou potássio, e substâncias tóxicas como pesticidas, inseticidas ou fungicidas, e ainda metais pesados como crómio, cádmio e mercúrio.

Dentro da albufeira estabelece-se um estado de equilíbrio entre as várias fases, designadamente entre os sedimentos, a água, o ar e a biota. Deste modo, as substâncias supracitadas que entram na albufeira distribuem-se de acordo com os equilíbrios multifásicos pelos vários sub-compartimentos ambientais, nomeadamente parte é retida pelos sedimentos, parte é evaporada, degradada e/ou bioacumulada e o restante é transportado advetivamente para o exterior da albufeira.

As substâncias dissolvidas na água da albufeira realizam continuamente trocas químicas com a fração suspensa e os sedimentos de fundo, podendo haver também migração dos contaminantes dos sedimentos acumulados para a água, por re-suspensão ou difusão. Os fatores que afetam a quantidade de substâncias que os sedimentos retêm são vários como, por exemplo, a sua porosidade e o teor em matéria orgânica, uma vez que as substâncias são dissolvidas na água dos poros e adsorvidas ou absorvidas na fase sólida. Por outro lado, a composição mineralógica afeta a granulometria e a compactação dos sedimentos de fundo (Wojtkowska *et al.*, 2016).

Verifica-se que a composição dos sedimentos de fundo varia de acordo com a espessura dos depósitos sedimentares, sendo que a camada superficial é pouco compacta, podendo conter elevado teor em matéria orgânica para além de ter elevado teor de água, sofrendo de agitação pelas correntes e estando sob ação da biota da região bentónica. De acordo com o estado da coluna de água, a camada superior dos sedimentos depositados pode apresentar condições de aerobiose, anaerobiose ou anóxicas, o que tem influência sobretudo no destino das substâncias inorgânicas. Com o aumento da profundidade da camada de sedimentos o teor em água diminui e aumenta a consolidação, em que as camadas mais profundas podem ser vistas como inacessíveis apesar de haver a possibilidade de difusão dos contaminantes para camadas superiores.

Refere-se que em muitos casos a composição dos sedimentos é um melhor indicador de poluição do que a qualidade da água, pois a quantidade das substâncias varia significativamente entre as camadas dos sedimentos acumulados no fundo da albufeira, refletindo as alterações cronológicas na qualidade da massa de água. De facto, elevados teores em metais permitem a diferenciação entre sedimentos depositados antes e depois da fonte de poluição estar ativa (Wojtkowska *et al.*, 2016).

Genericamente, os sedimentos são um dos fatores que influenciam a biocenose aquática. Por exemplo, a penetração da luz solar na água depende da turvação e, como tal, da concentração de sedimentos suspensos. Em paralelo, o ciclo da matéria orgânica no sistema depende da natureza dos materiais e

sedimentos depositados na albufeira. Como referido, podem ocorrer reações entre certas substâncias e acumulação seletiva de algumas delas nos sedimentos, observando-se em simultâneo que a sua concentração aumenta ao longo dos níveis tróficos. Como resultado, algumas destas substâncias, que são praticamente indetetáveis na água, podem ser encontradas nos sedimentos em quantidades suficientes para causar sérios riscos aos organismos do topo da cadeia alimentar.

Adicionalmente, para além dos seus efeitos diretos, estas substâncias podem ter um efeito indireto na biota, pois têm a capacidade de interferir com substâncias produzidas pelos seres vivos e que são fundamentais no que respeita ao seu comportamento e ao desempenho de funções vitais de alimentação, reprodução e mobilidade.

Assim, a albufeira ao acumular sedimentos pode levar à ocorrência de alguns fenómenos de contaminação com possíveis efeitos na biocenose aquática. Para determinar estes efeitos devem ser feitos estudos como inventários da biota aquática, deteção de indicadores de poluição bióticos e de substâncias tóxicas que se acumulam em organismos bentónicos ou pelágicos, e a previsão baseada em modelos numéricos da evolução do ecossistema. Estes estudos, conjuntamente com modelos hidráulicos de sedimentação, podem melhorar o projeto de uma albufeira, eliminando ou atenuando os seus efeitos negativos.

2.3.1.1. Na albufeira

As albufeiras geralmente recebem uma maior carga sedimentar que os lagos naturais devido à sua morfologia e, como tal, sofrem mais com os efeitos da sedimentação visto acumularem uma maior quantidade de sedimentos (Juracek, 2015).

Alguns dos problemas criados pela acumulação de sedimentos numa albufeira resultam da formação do delta na zona mais a montante da albufeira, cuja configuração e progressão depende do regime de escoamento e da variação dos níveis de água da albufeira. Este delta causa uma elevação do leito original do rio e, para além de reduzir a capacidade de armazenamento da albufeira, pode causar a redução do espaço livre debaixo de pontes o que representa um risco à navegação. Adicionalmente, causa um aumento nos níveis de água observados durante cheias, levando a que ocorram inundações nas margens, particularmente se o leito de cheia não for devidamente mantido. Outra consequência da formação do delta é o aumento do nível freático na zona, podendo-se formar pântanos.

Os sedimentos mais finos são dispersos na albufeira, dependendo da velocidade da corrente e do vento, assim como da temperatura da água, sendo que são transportados progressivamente na direção da barragem, junto à qual se podem acumular espessuras superiores de depósitos sedimentares. Os sedimentos finos afetam tanto o volume útil como o volume morto da barragem.

Em relação aos efeitos particulares na biocenose, os sedimentos suspensos na coluna de água levam ao aumento da turbidez e reduzem a penetração da luz solar e, como tal, restringem a atividade do fitoplâncton e macrófitas aquáticas, levando a um empobrecimento do ecossistema. Para além disto, estes sedimentos podem afetar os peixes ao obstruírem as guelras e diminuírem a visibilidade e, desta forma, a eficiência de alimentação e taxa de crescimento, apesar de que se a turbidez for moderada e houver boas condições de luminosidade a predação pode melhorar, uma vez que a presa contrasta mais do que na água límpida. Para além da concentração de sedimentos suspensos, a resposta da biota a estes também depende das espécies em causa, da fase do ciclo de vida em que se encontram, da duração da exposição, da granulometria das partículas e da composição química destas.

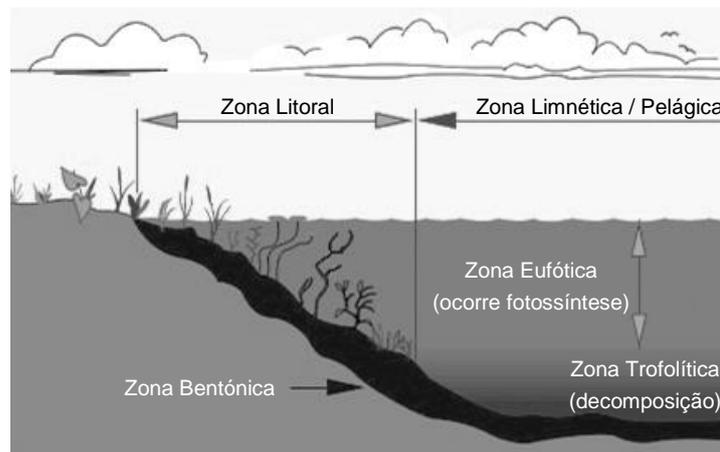


Fig. 5 – Ecossistema Lântico (adaptado de Bhakta, 2012)

Na zona litoral da albufeira (Fig. 5), onde a radiação solar penetra a água, os sedimentos de fundo formam um substrato permitindo o crescimento de vegetação aquática, que acelera a consolidação do material, mas que se estiver emersa durante largos períodos de tempo pode secar e ocorre a sua erosão. Refere-se que os efeitos da erosão das margens causados pela ondulação e flutuações no nível da albufeira devem ser considerados nesta região. Nas zonas pouco profundas da zona litoral a vegetação consiste em arbustos, juncos, entre outros. Já as algas crescem em zonas mais profundas. Quanto mais nutrientes houver na água, mais intensivo será o crescimento, sendo que os juncos e as algas oferecem abrigo aos bentônicos e, como tal, contribuem para o desenvolvimento do biótopo favorável para a criação de peixes.

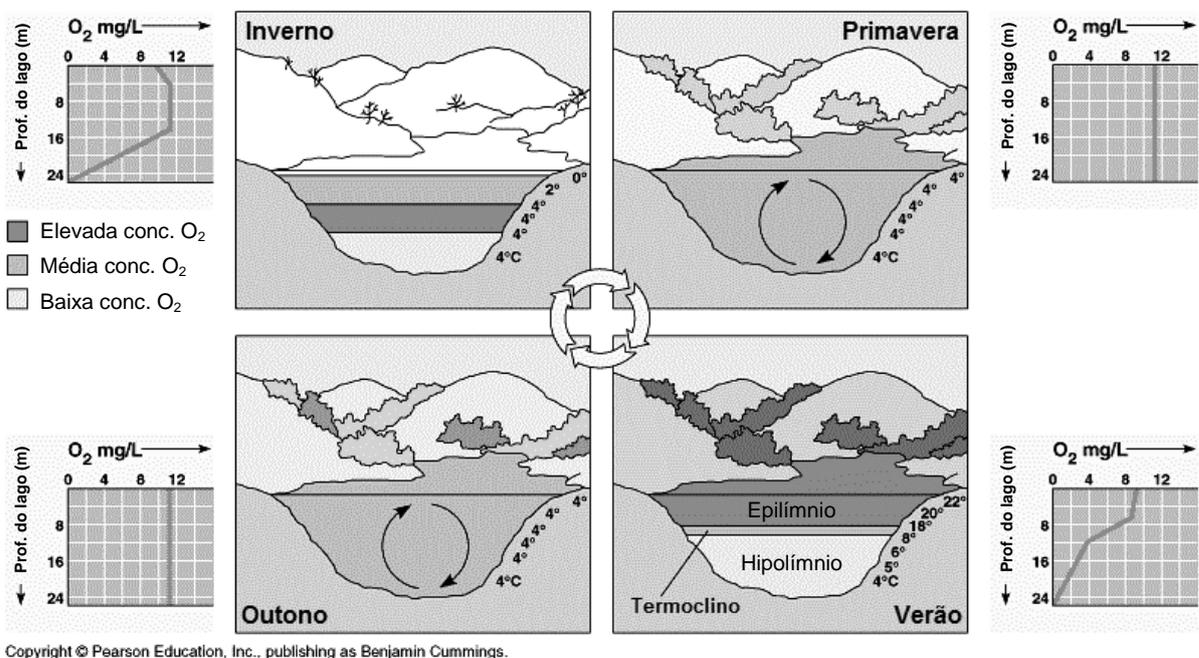


Fig. 6 – Estratificação térmica sazonal de um lago (adaptado de Pearson Education, Inc.)

Em profundidade onde pouca ou nenhuma luz penetra e onde ocorre estratificação sazonal (Fig. 6), a vegetação desaparece e acumulam-se depósitos sedimentares. A matéria orgânica, em particular algas e plantas em rápida decomposição, causa um déficit de oxigênio levando à existência de condições anaeróbicas. A mineralização bacteriológica é particularmente intensiva na interface entre a água e os sedimentos, e na região mais profunda no fundo da albufeira onde a luz não chega ocorre fermentação pútrida, sendo esta zona praticamente desprovida de vida.

Para além disto, a sedimentação pode enterrar zonas de reprodução e, como tal, dificultar a reprodução das espécies de peixes que surgem nos fundos de cascalho.

A passagem de um ecossistema lótico para lêntico (Fig. 5), ou seja, de água corrente para água parada, causa uma mudança nas comunidades de seres vivos e, conseqüentemente, nas populações de peixes. Assim, uma perda de valor trófico, no que toca a produtividade e qualidade, que pode ser por vezes corrigida com adequada gestão e criação de algumas espécies, não deve ser considerada como um resultado particular da sedimentação, mas sim genericamente da construção da barragem. Por este motivo, no estudo dos efeitos da sedimentação na albufeira sobre os seres vivos não se deve comparar com a situação prévia à construção da barragem. No entanto, com o envelhecimento da albufeira devido ao acumular gradual de sedimentos, o ecossistema volta a sofrer alterações podendo-se passar progressivamente de um habitat lacustre para um pântano e no extremo para terrestre e ribeirinho, como descrito por Morris & Fan (1998) sobre os três estágios da vida de uma albufeira sem um plano de gestão de sedimentos.

De mencionar o trabalho realizado por Popp & Hoagland (1995) que investigou os efeitos da acumulação de sedimentos em albufeira na comunidade de macroinvertebrados bentónicos na albufeira de *Pawnee* de 1965, no Nebraska, ao comparar a diversidade e biomassa das espécies através de levantamentos que foram feitos em 1968-1970 e 1991-1992. Concluíram que existiu perda substancial na diversidade e biomassa total, sendo que a homogeneização do substrato de fundo provocado pela sedimentação foi uma das causas apresentadas. Apesar disto e de haver outros trabalhos como o de Donohue & Irvine (2004) que corroboram que a sedimentação causa uma perda de abundância e diversidade de organismos bentónicos, um estudo de Shao *et al.* (2008) concluiu que a sedimentação não tinha um efeito pronunciado sobre a comunidade bentónica na albufeira de *Three Gorges* na China, o que acontece, em parte, pelo facto da comunidade ser dominada por *oligochaetes*, que é uma subclasse de invertebrados que tolera elevadas cargas sedimentares.

2.3.1.2. A montante da albufeira

Os depósitos de sedimentos na albufeira causam um aumento do nível do fundo do rio de forma progressiva na direção de montante. Assim, os já referidos efeitos na albufeira serão também sentidos a montante, de forma similar. Por outro lado, se forem usados métodos de controlo da sedimentação, tais como bacias de armazenamento de sedimentos, conservação do solo, entre outros, a capacidade de transporte de sedimentos a jusante da zona intervencionada será maior levando ao desgaste acrescido do leito do rio.

Os efeitos da sedimentação na biocenose nas seções a montante da albufeira são geralmente limitados. A elevação do leito do rio na seção inicial da albufeira usualmente leva à formação de bancos de cascalho e conduz a que o rio se divida em pequenos canais separados por pequenas ilhas temporárias, criando uma área favorável para a desova dos peixes. No entanto, uma vez que as grandes áreas de desova na albufeira ficam cobertas por sedimentos e devido à variação do nível da água, algumas espécies migram

para os rios afluentes. Isto causa sobrepopulação temporária na zona da foz destes, o que afeta as taxas de reprodução devido à maior competição pelo alimento.

2.3.1.3. A jusante da barragem

Os efeitos de uma barragem de grandes dimensões são também sentidos na zona a jusante da barragem, pois esta retém uma porção dos sedimentos e modifica a distribuição da granulometria destes ao reter a maioria dos sedimentos grosseiros na albufeira (UNESCO, 1985). Seriam necessárias centenas de quilómetros de comprimento de rio a jusante de uma grande barragem antes de se poderem estabelecer condições próximas às de pré-barragem em termos de sedimentos transportados, sendo que vários rios não têm tal comprimento a jusante. A albufeira também modifica o regime de escoamento a jusante da barragem, com a regularização dos caudais e encaixe de volume de água em situações de cheia, com influência na capacidade de transporte de sedimentos pelo rio.

Em termos de influência na morfologia do rio, as descargas de água, como as realizadas por abertura do descarregador de cheias, podem levar uma quantidade reduzida de sedimentos para jusante e, como tal, acabam por contribuir para a erosão do fundo do leito do rio na proximidade da zona da barragem. Neste cenário, o leito é degradado a jusante da barragem, podendo o aprofundamento do canal de escoamento afetar o nível freático do vale, baixando-o. Tal, pode levar à contaminação das águas subterrâneas ou aumentar a salinidade do solo na proximidade do estuário, e ainda contribuir para o debilitar de estruturas e das margens do rio.

Inversamente, em algumas situações, as descargas da barragem podem estar saturadas de sedimentos, e como a jusante da barragem a capacidade de transporte do rio é reduzida, poderá haver deposição dos sedimentos na seção da descarga, resultando numa elevação do fundo do leito do rio, ou na deposição desses sedimentos mais a jusante. Os potenciais efeitos na morfologia do rio devem ser estudados, se possível por modelação matemática, durante a fase de projeto.

Geralmente surgem acumulações de sedimentos grosseiros nas confluências com os afluentes torrenciais, que são depois erodidas durante cheias no rio principal. No entanto, com a redução da frequência das pequenas e médias cheias devido à construção da barragem, poderá haver uma alteração desta dinâmica a jusante da barragem. As acumulações podem impedir o normal escoamento do afluente, podendo a obstrução do canal ocasionar a submersão de terrenos a montante por ocasião de grandes cheias. Por outro lado, quando estes obstáculos rompem dá-se a libertação do material causando danos a jusante. Estas dificuldades podem ser ultrapassadas com controlo da erosão nas bacias dos afluentes, pela construção de bacias de armazenamento de sedimentos e por um sistema de represas.

A sedimentação na albufeira traz também efeitos negativos para a extração de sedimentos em zonas a jusante da barragem, uma vez que a interceção parcial ou quase total dos sedimentos grosseiros na albufeira irá reduzir a renovação deste material a jusante, que pode ser explorado para ser usado enquanto material de construção. É importante, portanto, desenvolver políticas de gestão na extração de sedimentos grosseiros de modo a prevenir que as acumulações deste material sejam exploradas à exaustão e deve ser encorajada a sua extração a montante da albufeira, tendo-se o cuidado que uma escavação excessiva pode levar à diminuição do nível freático e em casos extremos causar sérios danos à estabilidade do canal durante grandes cheias.

No que toca à influência no estuário, a redução do transporte de sedimentos pelo rio é um dos fatores que pode contribuir para disrupção do balanço sedimentar na foz, particularmente no caso dos deltas (UNESCO, 1985). Neste cenário, a erosão costeira pelas correntes e ação das ondas deixa de ser

compensada pela deposição de sedimentos transportados pelo rio, e a linha da costa sofre um recuo gradual. Para além disto, grandes cheias podem contribuir negativamente para o efeito da ação erosiva costeira, particularmente se a albufeira for próxima do estuário, devido ao seu potencial de erosão e porque podem ainda levar ao desenvolvimento de correntes de recirculação ao longo da costa que têm o potencial de aumentar o transporte litoral de sedimentos. Se estes efeitos forem muito acentuados pode-se atuar na medida de que podem ser construídas estruturas de proteção da costa como esporões, diques, quebra-mares, entre outros. Estas estruturas de defesa costeira apresentam, no entanto, algumas desvantagens para além de quem têm de ser muito bem estudadas por especialistas na área e terem um elevado custo de construção.

Normalmente, a água proveniente do circuito hidráulico da barragem contem apenas sólidos dissolvidos e virtualmente não tem sedimentos em suspensão. Isto pode contribuir para um empobrecimento da biomassa a jusante. Por sua vez, a redução da biomassa leva a uma diminuição da produtividade da reprodução dos peixes, embora em alguns casos tal possa ser compensado pela introdução de peixes jovens.

Em situações excecionais em que os descarregadores de fundo são abertos para evacuar cheias e correntes de sedimentos, para manutenção ou para esvaziar a albufeira, uma parte substancial dos sedimentos acumulados na albufeira é erodido e verificam-se elevadas concentrações de sedimentos na água descarregada, em muito superiores às que se verificariam em condições naturais. Este acontecimento é inevitável, sobretudo se for feito o esvaziamento da albufeira, mas quando é feito de forma deliberada pode-se atenuar os seus efeitos negativos, pois o efeito na biocenose depende das características físico-químicas da água e das condições em que a descarga é efetuada.

Uma elevada concentração de sedimentos nas águas descarregadas pode causar danos graves. Os sedimentos libertados depositam-se seletivamente, ficando as partículas grosseiras acumuladas perto da barragem e seguindo as mais finas para jusante, onde formam bancos de areia e silte. A deposição destes sedimentos modifica o declive do leito do rio e cria obstruções à passagem da água, o que poderá ser problemático em situações de cheia, causando a submersão de terrenos circundantes, e sérios danos à agricultura. Assim, importa estudar as condições de evacuação das descargas passando por estudar a geologia da bacia de forma a determinar as características dos sedimentos, comparar com localizações semelhantes, e compreender a morfologia do rio e os aspetos operacionais da albufeira.

Quando os sedimentos descarregados não têm substâncias tóxicas, a contaminação é apenas de natureza física, mas pode ser letal para espécies de peixes mais sensíveis devido a obstrução das guelras e porque pode destruir as ovas ao tapar os depósitos de cascalho com silte. Não obstante, os efeitos deste tipo de poluição são apenas temporários, sem causar consequências permanentes. Por outro lado, sedimentos com elevadas concentrações de substâncias perigosas são mais letais para os peixes, sendo que os bentónicos podem desaparecer e levar a um desequilíbrio do ecossistema durante um longo período de tempo.

Por tudo isto, as consequências das descargas de sedimentos são especialmente negativas quando levadas a cabo sem se considerar a capacidade de transporte de sedimentos na seção de jusante do rio, podendo aparecer bancos de sedimentos tóxicos que esterilizam grandes extensões do rio. Os efeitos da libertação de sedimentos da albufeira devem ser, portanto, cuidadosamente estudados antes da descarga. A frequência das operações deve ser planeada, tendo em consideração o ciclo biológico da fauna de modo a atenuar do melhor modo as consequências. Tais estudos passam por um levantamento da seção de jusante, incluindo o estuário se necessário.

Assim, deve haver um compromisso entre a preservação das estruturas e do legado natural. Em termos de projeto, têm de se desenvolver métodos operacionais que causem o menor distúrbio à vida no rio e na albufeira, sendo que, quando necessário, devem-se considerar medidas compensatórias e pode ser necessário um custo adicional em medidas corretivas, tal como se irá ver no capítulo 4.

2.3.2. IMPACTES ECONÓMICOS E SOCIAIS

Os efeitos a nível social e económico dependem do tamanho e características da albufeira, sendo estes bastante complexos porque a barragem geralmente serve diversos objetivos e que podem evoluir ao longo dos anos.

A sedimentação afeta a capacidade de armazenamento, que é o objetivo primário da construção da barragem. A perda desta capacidade é particularmente sentida na produção de energia elétrica, abastecimento de água para uso doméstico, industrial e agrícola, e no controlo de cheias. Afeta ainda a área de superfície da albufeira, ao reduzir a profundidade de água e ao favorecer o desenvolvimento da vegetação aquática. Estas questões levantam por vezes problemas ao uso da albufeira para atividades recreativas, de carácter de saúde pública e ainda no combate a incêndios.

Outra questão relevante resulta na possibilidade da sedimentação impedir o funcionamento do aproveitamento hidroelétrico, caso exista para a barragem em causa, se os depósitos sedimentares atingirem a cota da tomada de água. Os sedimentos podem danificar elementos da central hidroelétrica, como o caso das turbinas, e do circuito hidráulico caso passem pela tomada de água. Estas questões têm não só um efeito a nível socioeconómico na região em que a albufeira se localiza, como também podem ter efeitos negativos a nível nacional.

2.3.3. IMPACTES NA SEGURANÇA DO PROJETO

A acumulação de sedimentos em albufeira pode levar a vários problemas em equipamentos da barragem. Um dos principais problemas é a obstrução dos descarregadores de fundo por sedimentos que aí se acumulam, o que é agravado ainda pela entrada de restos de árvores e outros materiais. O descarregador de fundo pode ficar completamente obstruído e, deste modo, perder em pleno as suas funções. Para evitar este cenário, devem haver descargas ocasionais e as condutas dos descarregadores de fundo devem ter um alinhamento reto e uma dimensão suficiente, para além de serem providas de dispositivos de controlo que permitem a passagem desobstruída da corrente.

Outros equipamentos que podem ser afetados são as comportas e as válvulas. Isto porque, devido às elevadas velocidades da corrente que passam nos descarregadores, superiores a 40 m/s, a cavitação e vibração induzidas pela corrente podem acompanhar a ação abrasiva das partículas de sedimentos, afetando as estruturas, superfícies de betão, e proteções contra a erosão. A libertação de gás pela mistura de sedimentos e água, em particular o sulfureto de hidrogénio, pode corroer componentes metálicos.

No que toca à estrutura de betão da barragem, devem ter-se em atenção as pressões exercidas pelos depósitos de sedimentos aquando do projeto, para além de que é importante assegurar-se que as características da estrutura não são alteradas pela deterioração do betão. As reações químicas nas albufeiras, particularmente as que ocorrem do ciclo do enxofre, assim como a corrosão provocada pela água, devem ser tidas em consideração na fase de projeto com a introdução de revestimentos protetores.

Finalmente, a acumulação de sedimentos pode dificultar a supervisão da barragem, nomeadamente impedir o uso de meios subaquáticos como submergíveis, para além de dificultar uma análise visual em algumas situações.

2.4. ESTUDO DA SEDIMENTAÇÃO EM ALBUFEIRAS NO MUNDO

O estudo do processo de sedimentação em albufeiras tem-se desenvolvido em vários países, mas sobretudo do ponto de vista quantitativo, isto é, pretendendo-se compreender melhor a dinâmica sedimentar, melhorar as formas de quantificar os sedimentos acumulados e procurando minimizar a erosão e acumulação de sedimentos. Dos estudos mais recentes e relevantes, disponíveis à data da realização deste trabalho, feitos dentro desta temática, destaca-se os da Tabela 1.

Tabela 1 – Recentes estudos de quantificação de sedimentos em albufeiras (excluindo Portugal)

País	Albufeira	Título do estudo	Referência
Cabo Verde	<i>Poilão</i>	Avaliação da taxa de sedimentação na Barragem do <i>Poilão</i> (Ilha de Santiago, Cabo Verde)	(Araújo <i>et al.</i> , 2014)
China	<i>Three Gorges</i>	<i>Flow regulation manipulates contemporary seasonal sedimentary dynamics in the reservoir fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China</i>	(Tang <i>et al.</i> , 2016)
China	-	<i>Changes and influencing factors of the sediment load in the Xiliugou basin of the upper Yellow River, China</i>	(Haifang <i>et al.</i> , 2016)
China	<i>Sanmenxia</i>	<i>Case Study of Variation of Sedimentation in the Yellow and Wei Rivers</i>	(Zheng <i>et al.</i> , 2015)
Equador	<i>Paute-Cardenillo*</i>	<i>Complementary Methods for Determining the Sedimentation and Flushing in a Reservoir</i>	(Castillo <i>et al.</i> , 2015)
EUA	<i>Owyhee</i>	<i>Land Use and Land Cover Impact on Probable Maximum Flood and Sedimentation for Artificial Reservoirs: Case Study in the Western United States</i>	(Yigzaw & Hossain, 2016)
EUA	<i>Barley Mill Road</i>	<i>Bedload transport over run-of-river dams, Delaware, U.S.A.</i>	(Pearson & Pizzuto, 2015)
EUA	<i>Conowingo</i>	<i>Sediment Transport and Capacity Change in Three Reservoirs, Lower Susquehanna River Basin, Pennsylvania and Maryland, 1900-2012</i>	(Langland, 2015)
EUA	-	<i>New proposed method for prediction of reservoir sedimentation distribution</i>	(Hosseinjanzadeh, <i>et al.</i> , 2015)

Índia	-	<i>Different Approach for Using Trap Efficiency for Estimation of Reservoir Sedimentation. An Overview</i>	(Mulu & Dwarakish, 2015)
Iraque	<i>Mosul</i>	<i>Evaluation and modification of some empirical and semi-empirical approaches for prediction of area-storage capacity curves in reservoirs of dams</i>	(Issa et al., 2015)
Irão	<i>Taleqhan</i>	<i>Dam sediment tracking using spectrometry and Landsat 8 satellite image, Taleghan Basin, Iran</i>	(Afshar et al., 2016)
Japão	<i>Asahi</i>	<i>Study on Flushing Mechanism of Dam Reservoir Sedimentation and Recovery of Riffle-Pool in Downstream Reach by a Flushing Bypass</i>	(Fukuda et al., 2012)
Suíça	<i>Gebidem</i>	<i>Reservoir sedimentation management at Gebidem Dam</i>	(Meile et al., 2014)
Suíça	-	<i>Sediment bypass tunnels to mitigate reservoir sedimentation and restore sediment continuity</i>	(Boes et al., 2014)

* Antes da construção da barragem.

Estes trabalhos de avaliação quantitativa da sedimentação em albufeira procuram desenvolver novas metodologias práticas, recorrendo por exemplo aos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) ou *remote sensing*, ou ainda a modelos empíricos e computacionais, para perceber a origem dos sedimentos que afetam as albufeiras, mas também a influência de alguns fatores na carga de sedimentos tal como a precipitação e o papel das operações da barragem, a taxa de sedimentação em albufeira, o volume acumulado, e a distribuição dos sedimentos. Para além disto, têm-se estudado medidas que visam reduzir e mitigar a acumulação dos sedimentos em albufeira, como os tuneis *bypass*. Refere-se ainda que existem alguns estudos sobre o efeito da remoção de uma barragem no curso de água e sobre os efeitos no estuário do rio, como o de Foley et al. (2015).

Relativamente ao que tem sido feito na área da avaliação da qualidade dos sedimentos e os seus efeitos em termos da qualidade de água e nos ecossistemas, apresenta-se na Tabela 2 uma listagem de alguns dos trabalhos mais relevantes organizados por país e referindo as albufeiras onde foram realizados, assim como, genericamente, quais foram os parâmetros analisados. Refere-se que, em alguns dos trabalhos que se apresentam não foram estudados os sedimentos acumulados, mas apenas a qualidade da água e/ou a biota, tendo-se considerado relevantes para este trabalho pois relacionam-se de alguma forma com a sedimentação em albufeiras. Por exemplo, no trabalho realizado por Baoligao et al. (2016) realizaram-se amostragens de água durante a libertação de caudais do rio Amarelo, tendo-se analisado a concentração de sedimentos suspensos, oxigénio dissolvido e temperatura, assim como a mortalidade dos peixes, tentando-se compreender os impactes da lavagem de sedimentos no teor em oxigénio dissolvido e nos peixes, para além de se propor medidas para minimizar os referidos impactes.

Tabela 2 – Estudos relevantes de qualidade de sedimentos em albufeiras e/ou a jusante (excluindo Portugal)

País	Albufeira	Zona de estudo			Parâmetros analisados						Referência
		Montante	Albufeira	Jusante	Físicos-químicos	Org. e nutr.	Metais pesados	Biológicos	Qual. água		
Austrália	<i>Upper Yarra</i> (1957)			■	■	■					(Lintern <i>et al.</i> , 2016)
Brasil	Cascata de barragens do rio <i>Parapanema</i>	■	■					■			(Fontana & Bicudo, 2009)
Brasil	<i>Vossoroca</i> (1949)		■			■					(Sáñez <i>et al.</i> , 2013)
China	Cascata de barragens do rio <i>Lancang</i> **	■	■		■	■	■				(Q. Liu <i>et al.</i> , 2015)
China	<i>Xiaolangdi</i> (2000)			■	■			■	■		(Baoligao <i>et al.</i> , 2016)
Espanha	<i>Barasona</i> (1932)		■		■	■	■				(López <i>et al.</i> , 2016)
EUA	<i>Cheney</i> (1965)		■		■	■	■				(Mau, 2001)
EUA	<i>Dillon</i> (1963)	■	■	■	■	■	■		■		(Greve <i>et al.</i> , 2001)
EUA	<i>Elwha</i> (1913-2014) e <i>Glines Canyon</i> (1927-2014)			■					■		(Foley <i>et al.</i> , 2015)
EUA	<i>Loch Raven</i> (1914) e <i>Prettyboy</i> (1933)		■		■	■	■				(Ort <i>et al.</i> , 2000)
EUA	<i>Kaw</i> (1976)		■		■	■	■		■		(Alemayehu <i>et al.</i> , 2014)
EUA	<i>Rasmussen</i> (1950's)*		■		■						(Straub <i>et al.</i> , 2006)
EUA	<i>Pawnee</i> (1965)*		■		■			■	■		(Popp & Hoagland, 1995)
EUA	<i>Perryville</i> (1880), <i>Silk Mill</i> (1890's-2003) e <i>Ballou</i> (1900's-2007)*		■	■	■	■	■				(Zimmerman & Breault, 2003)
França	Sistema fluvial de <i>Loire: Villesrest</i> (1984)		■	■	■	■	■				(Dhivert <i>et al.</i> 2016)
França	<i>Vaussaire</i> (1952)	■	■	■	■	■	■				(Frémion <i>et al.</i> , 2016)
Irão	<i>Dez</i> (1963)	■	■	■	■		■	■	■		(Khakzad & Ivanovich Elfimov, 2015)

* Barragens de pequena dimensão ou açudes.

** *Manwan* (1995), *Dachaoshan* (2003) e *Xiaowan* (2010).

Importa mencionar também que em vários destes trabalhos foram feitos levantamentos batimétricos ou outro tipo de estudo da quantidade e distribuição de sedimentos na albufeira. Os parâmetros analisados nos vários estudos foram muito diversos, assim como a forma de obtenção das amostras e as zonas de amostragem, sendo que se considerou na Tabela 2 os parâmetros físico-químicos dos sedimentos como sendo o estudo da granulometria, aparência, textura, odor, cor e teor em água, entre outros, os parâmetros orgânicos e nutrientes passam, por exemplo, pela avaliação do carbono orgânico total, teor em azoto mas também em orgânicos persistentes como os pesticidas, e os parâmetros de metais pesados, por exemplo, pelo estudo da concentração de ferro. Os parâmetros biológicos incluem estudos sobre os efeitos dos sedimentos sobre invertebrados, diatomáceas, peixes e alterações no crescimento de flora. Finalmente, os parâmetros de qualidade da água incluem análises físico-químicas da água no âmbito de estudos sobre sedimentação.

Em alguns casos, os estudos foram feitos previamente à remoção de uma barragem como o de Zimmerman & Breault (2003) ou até durante a remoção de uma, pelo que se menciona o ano de origem da albufeira e quando aplicável o ano em que a barragem foi removida.

Para além do referido, existem vários trabalhos sobre os efeitos da sedimentação em rios ou lagos, como os de Wohl (2015), Liu *et al.* (2016), Noble *et al.* (2016) e Wojtkowska *et al.* (2016), que podem ter interesse do ponto de vista da metodologia de recolha de amostras e servir de base para a transposição para a realidade de uma albufeira e as seções a jusante e a montante desta.

2.5. ESTUDO DA SEDIMENTAÇÃO EM ALBUFEIRAS EM PORTUGAL

Em Portugal, o estudo da sedimentação em albufeiras tem-se restringido sobretudo à evolução da acumulação dos sedimentos em albufeira e à relação entre o assoreamento das albufeiras e a erosão da costa portuguesa.

No estudo de Costa (2004), da Universidade do Minho, comparam-se os sedimentos acumulados nas albufeiras de Venda Nova, de Salamonde e da Caniçada com os do rio Cávado e das praias que envolvem o estuário. Os sedimentos de fundo de Venda Nova foram colhidos na margem esquerda e na ribeira do Amiar aquando do seu esvaziamento parcial em 2001 e 2002, ao passo que na albufeira de Salamonde foram recolhidos na vertente direita. Para além disto, recolheram-se amostras por arrasto nos fundos com um amostrador de copos em Venda Nova e na Caniçada, e foram recolhidas amostras na escombreira da mina da Borralha e nas praias do estuário do rio Cávado. Foi efetuado, em laboratório, uma análise da granulometria e identificação dos minerais pesados e de argilas. Apesar disto, apenas se conseguiu uma contribuição descritiva dos sedimentos acumulados nas albufeiras e não foi possível inferir uma correlação da acumulação a montante das barragens com a migração das praias.

Já em 1984, devido a um assoreamento na zona a montante da barragem Venda Nova e na ribeira de Amiar que causou problemas nos órgãos de descarga, procedeu-se a um esvaziamento total da albufeira, o que por sua vez proporcionou uma excelente ocasião para um estudo da sedimentação na albufeira, por Cardoso (1986). Foram realizadas pelo LNEC amostragens dos sedimentos que se acumularam no fundo da albufeira e que possibilitaram a identificação das características mineralógicas e distribuição granulométrica destes através de recolhas superficiais e em cortes que foram abertos no terreno, para além da observação da estratigrafia. Estes estudos são aprofundados em 5.2.3.4.

Por sua vez, o LNEC possui um canal destinado ao estudo de sedimentação em albufeiras, mais precisamente à realização de ensaios com correntes de turbidez. Em 2007, apresentou um relatório denominado por “Sedimentação em Albufeiras por Correntes de Turbidez: Caracterização de

Sedimentos em Suspensão” (Freire, 2007) que teve uma componente experimental em que se pretendia contribuir para a compreensão dos processos de formação e transporte de correntes de turbidez em albufeiras ao produzir dados para a validação de um modelo computacional e realizar análises a amostras recolhidas para se determinar a concentração e distribuição granulométrica de sedimentos em suspensão. No mesmo âmbito foi desenvolvida uma tese de doutoramento na mesma instituição em cooperação com o Instituto Superior Técnico por Alves (2008).

Similarmente, trabalhos como o de Lameiro & Taveira-Pinto (2009) debruçam-se sobre a teoria do transporte sedimentar, as metodologias de determinação dos sedimentos depositados e as técnicas de minimização e remoção destes, tendo também em vista a possibilidade de utilizar esses sedimentos para a alimentação de praias. No entanto, neste trabalho apenas se fala da necessidade de avaliação da qualidade dos sedimentos aquando de um processo de descontaminação antes da aplicação em praia e sobretudo quando a contaminação é por metais pesados.

Em termos de monitorização batimétrica das albufeiras existem alguns trabalhos tal como o de Álvares *et al.* (2000). Neste apresenta-se os resultados para alguns levantamentos, nomeadamente perfis obtidos por sonda hidrográfica e um modelo numérico do fundo da albufeira de Vigia na bacia do rio Degebe (afluente do Guadiana) com recurso aos SIG. Já o estudo de Mariano *et al.* (2002) permitiu obter um modelo numérico da batimetria de 2001 da albufeira de Campilhas (bacia hidrográfica do rio Sado) e, por comparação com a batimetria de 1935 (cartografia de base), obter-se a diferença de cotas entre as duas superfícies. Foi possível concluir que houve uma perda de capacidade total de 6% entre 1954 e 2001 (na inexistência da cartografia à data da entrada em funcionamento da barragem recorreu-se à curva de capacidade do projeto de 1954 para cálculo da perda de capacidade da albufeira), e ainda que 41,4% do volume morto foi preenchido com sedimentos num período de 47 anos.

A partir de estudos que foram realizados nas décadas de 1960 e 1970 pelo LNEC e pela Direção Geral dos Serviços Hidráulicos avaliou-se as taxas de assoreamento específico e estimou-se a perda anual de capacidade de armazenamento devido à sedimentação para as albufeiras de Burgães, Santa Luzia, Idanha, Montargil, Campilhas, Vale Formoso e Arade, tendo-se previsto que as perdas anuais de capacidade de armazenamento estariam compreendidas entre 0,02 e 0,6 para as albufeiras referidas (Veiga da Cunha, 1974).

Refere-se que Álvares & Pimenta (1998) desenvolveram também um trabalho de estudo da erosão hídrica e transporte sólido em diferentes zonas da bacia hidrográfica do Guadiana, nomeadamente em zonas com estações da rede sedimentológica. A rede sedimentológica portuguesa compreende estações em cursos de água e em albufeiras para a caracterização dos regimes de transporte sólido, sendo que em cursos de água consistem em estações hidrométricas onde se realizam amostragens de caudal sólido em suspensão, caudal sólido por arrastamento e granulometria de fundo, ao passo que nas albufeiras passa por levantamentos batimétricos para avaliação da sedimentação. Esta rede tem sofrido um processo de reestruturação pretendendo-se ter 66 estações nos cursos de água e 45 em albufeiras, mas ainda existem poucos dados, não tendo os mesmos sido recolhidos de modo regular (Álvares *et al.*, 2001).

Ainda dentro do trabalho desenvolvido em termos de levantamentos batimétricos de albufeiras e que também está relacionado com a relação com a erosão da costa portuguesa, está a ser desenvolvido um estudo piloto na albufeira do Torrão, no rio Tâmega, pelo LNEG em parceria com a EDP Produção. Importa mencionar ainda que, resultante de um trabalho, com apoio da EDP Produção, do Centro de Ecologia, Evolução e Alterações Ambientais (ce3c) e da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, está a ser estudado o recurso a soluções de Engenharia Natural, nomeadamente com utilização das crostas biológicas do solo, para controlar a erosão nas faixas interníveis das albufeiras de Salamonde e Caniçada em zonas piloto.

Em relação a trabalhos ligados à qualidade dos sedimentos existem algumas avaliações pontuais em albufeiras devido a existência de fontes substanciais de poluição nas proximidades. No caso da albufeira de Venda Nova foram realizadas em junho de 1979 amostragens dos sedimentos de fundo em 15 estações ao longo de toda a albufeira (Vale *et al.*, 1980), sendo que se fala mais aprofundadamente deste estudo em 5.2.4.

Recentemente realizaram-se amostragens e análises da qualidade de água com uma garrafa de *Van Dorn* a diferentes profundidades em três localizações da albufeira de Venda Nova e ainda dos sedimentos num local junto ao descarregador de fundo com uma draga do tipo *Petite Ponar Grab*. Os parâmetros analisados nos sedimentos foram uma série de metais em mg/kg (As, Cd, Pb, Cu, Cr, Sn, Fe, Mn, Ni, Zn), tendo-se constado um elevado teor de todos os metais analisados, mas em especial do ferro, cobre e manganês, que será devido a proximidade à antiga mina da Borralha. Este estudo foi feito em três campanhas de monitorização em julho, agosto e setembro de 2014 pela EDP Labelec, decorrente do estudo de implementação de um regime de caudais ecológicos para o troço do rio Rabagão a jusante da barragem (Rosa & Pádua, 2014).

Outra albufeira onde se realizaram estudos ligados à qualidade dos sedimentos foi a de Crestuma-Lever, também estes por parte da EDP Labelec. Neste trabalho foram recolhidas amostras de sedimentos desde abril de 1992 a novembro de 2007 ao longo de vários meses, embora nem sempre os mesmos, e em quatro estações na proximidade da Central Termoeleétrica de Tapada de Outeiro (desativada em 2004). Os parâmetros analisados foram a percentagem de inqueimados e ainda de uma série de metais (Al, As, Cd, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb, Ti, V, Zn), destacando-se a obtenção de algumas elevadas percentagens nomeadamente em teor de inqueimados, ferro, titânio e alumínio.

Para além disto, destaca-se que existem ainda estudos relativos à qualidade de sedimentos em rios, como por exemplo o de Pessoa (2011) que teve como objetivo prever o risco de poluição das águas superficiais da Bacia Hidrográfica do Minho por metais existentes nos sedimentos, através de estudos de especiação dos metais pesados e avaliação da sua remobilização para solução.

Em termos de medidas de mitigação e redução da sedimentação em albufeiras importa mencionar que no “Relatório de conformidade ambiental do projeto de execução” (RECAPE) (Chinita *et al.*, 2010) do aproveitamento hidroelétrico de Foz Tua refere-se que deve-se *apresentar medidas, baseadas em estudos ou modelos quantitativos, que reduzam as alterações no transporte sedimentar, sobretudo em termos de retenção de sedimentos na albufeira, nomeadamente tendo em conta uma opção construtiva que inclua descarga de fundo eficaz para passagem de sedimentos e que possa efetivamente ser utilizada com frequência*. Assim, como medida para permitir a passagem de sedimentos em suspensão para jusante da barragem e evitar assoreamentos na zona da descarga de fundo (à cota 95 m), inclui-se nas regras de exploração do projeto a abertura total da descarga de fundo sempre que os caudais efluentes sejam superiores a 600 m³/s, valor que se prevê ser igualado ou excedido 2 dias por ano, em média.

Esta medida resultou dos estudos de sedimentologia que foram desenvolvidos relativos à bacia hidrográfica do rio Tua, que tiveram como objetivo estimar a quantidade de sedimentos que afluem à albufeira para se poder prever as interferências do assoreamento provocado pelos mesmos com a implantação de estruturas necessárias à exploração do aproveitamento ou com outras estruturas localizadas ao longo da albufeira. Para tal, recorreu-se a medições de três estações hidrológicas e sedimentológicas na bacia e foi feita a estimativa da erosão de acordo com o método de Fournier e da Equação Universal de Perda de Solo. Os resultados foram díspares com uma previsão de 8 a 61 ton/(km².ano) utilizando as medições das estações sedimentológicas e 65 a 161 ton/(km².ano) utilizando os métodos teórico-empíricos, pelo que se optou pelo resultado obtido pelos métodos teórico-empíricos, uma vez que existem poucos dados provenientes das estações sedimentológicas. Para estimar a

quantidade de sedimentos depositados recorreu-se às curvas de eficiência de retenção de Brune, fazendo-se uma previsão de uma retenção média anual de 0,388 hm³ (505011 ton), 19,42 hm³ (18% do volume da albufeira a NPA) ao fim de 50 anos, e 38,9 hm³ (37% do volume da albufeira a NPA) ao fim de 100 anos. Finalmente a distribuição de sedimentos ao fim de 50 e 100 anos foi estimada de acordo com o método de Borland e Miller, posteriormente revisto por Lara. Concluiu-se que o volume acumulado face ao volume total da albufeira não é desprezável, mas com reduções pouco significativas no volume útil (inferior a 1%), e com a possibilidade de os sedimentos causarem problemas operacionais nas tomadas de água que se situem a cotas abaixo dos 98 m.

3

PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA AVALIAR OS EFEITOS DA SEDIMENTAÇÃO EM ALBUFEIRAS EM PORTUGAL

3.1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo procura-se estabelecer uma metodologia a adotar com base nos melhores métodos conhecidos para avaliar os efeitos da sedimentação nas albufeiras portuguesas, uma vez que não existe em vigor um plano nacional de monitorização da sedimentação nas albufeiras. Esta metodologia passa, numa primeira fase, por uma avaliação da quantidade de sedimentos acumulados, seguindo-se o estudo da sua qualidade em termos físico-químicos e finalmente a avaliação dos efeitos que têm na qualidade da água e nos ecossistemas. Refere-se que a metodologia foi pensada para os grandes aproveitamentos hidroelétricos em Portugal, mas que pode ser também aplicada nos outros casos com algumas adaptações.

Antes de se aplicar esta metodologia deve ser sempre feito um trabalho prévio para enquadrar as particularidades associadas a cada albufeira que se estiver a estudar, que permita, nomeadamente, caracterizar a área em termos de clima, hidrologia e gestão de recursos hídricos superficiais, geologia, hidrogeologia, ocupação e uso do solo, erosão hídrica, transporte de sedimentos e assoreamentos, fauna e flora, património arqueológico submerso, fontes de poluição e, necessariamente, sobre as características da albufeira como, por exemplo, a sua capacidade e área de inundação, e do aproveitamento hidráulico associado. No caso nacional, deve ser consultado o Plano de Gestão da Região Hidrográfica no qual a albufeira se insere e que já inclui seguramente informação relevante para esse trabalho prévio.

Igualmente deve ser feito o levantamento de todos os estudos já realizados disponíveis sobre a albufeira que tenham relevo para o estudo da sedimentação ou sejam sobre evoluções na qualidade de água e/ou alterações no ecossistema.

No capítulo 5 da presente dissertação aplica-se parcialmente a metodologia proposta para o caso da albufeira de Venda Nova, situada em Montalegre, Vila Real.

3.2. QUANTIFICAÇÃO DA ACUMULAÇÃO DE SEDIMENTOS

Como referido em 3.1, a primeira fase da metodologia proposta passa pela avaliação quantitativa da acumulação de sedimentos, isto é, conhecer o volume de sedimentos acumulados assim como a sua distribuição na albufeira. Esta fase é essencial à monitorização de uma albufeira pois permite atualizar uma série de dados com importância para a gestão e operação da mesma, para além de disponibilizar informação para a realização da fase seguinte desta metodologia, ao dar a conhecer os pontos mais relevantes para a amostragem de sedimentos e, criando bases para o planeamento das melhores medidas a aplicar de mitigação e redução dos assoreamentos.

Um assoreamento de um reservatório pode ser medido diretamente recorrendo a levantamentos batimétricos, que permitem caracterizar o relevo submerso da albufeira e, conseqüentemente, o volume de armazenamento da mesma. Os métodos mais frequentes para se realizar um levantamento batimétrico são o levantamento de contorno e o levantamento de linhas batimétricas (Poletto, 2014).

O levantamento de contorno é realizado por meio de técnicas de topografia convencional, imagens aéreas ou de satélite de alta resolução que delimitam o contorno da superfície livre da albufeira para diferentes níveis operacionais. Recorrendo-se a modelos computacionais de modelação do terreno é possível obter, por interpolação, valores correspondentes a níveis intermédios aos correspondentes às imagens utilizadas e, assim, construir-se um modelo do relevo do terreno submerso pela albufeira.

Por sua vez, o levantamento de linhas batimétricas consiste em obter a profundidade do leito ao longo de toda a área da albufeira, o que pode ser realizado por diferentes técnicas em que variam os métodos de medida da profundidade e da distância (posição horizontal), destacando-se a importância da profundidade e velocidade da corrente na escolha das técnicas. Um exemplo é o levantamento com sondas acústicas (ecobatimetria) e um sistema de GNSS (*Global Navigation System Satellite*). Geralmente aplica-se este tipo de método de levantamento batimétrico em várias seções transversais ao longo da albufeira obtendo-se, assim, uma série de perfis transversais, sendo o número de perfis necessários dependente da precisão requerida pelo modelo computacional utilizado para a modelação do terreno e também, naturalmente, do tamanho da albufeira. Sendo este método mais simples e rápido de aplicar do que o de contorno, é aquele que é mais comum e aconselhável para este tipo de estudo.

Os levantamentos batimétricos permitem, assim, obter os dados necessários para que através de ferramentas de modelação de terreno seja possível obter um modelo do relevo do fundo da albufeira, sendo aconselhável o uso de SIG. Posteriormente, por comparação com levantamentos anteriores, é possível estudar as evoluções temporais da topografia, isto é, detetar as zonas que sofreram erosão e aquelas em que se acumularam sedimentos, fazer um balanço dos ganhos ou perdas no volume de sedimentos acumulados e, finalmente, calcular a perda de capacidade total de armazenamento da albufeira, que é um dado importante para a operação de centrais hidroelétricas e para a gestão de recursos hídricos.

Relativamente à frequência que é aconselhável para a realização dos levantamentos batimétricos, esta é dependente de vários fatores como o tamanho e volume da albufeira, a carga sólida afluente e os custos associados. Segundo a classificação de Carvalho *et al.* (2000), resumida na Tabela 3, em função do volume da albufeira, essa frequência deverá variar entre 2 e 10 anos. Saliente-se que, no caso das barragens exploradas atualmente em Portugal pela EDP, em que, de acordo com o referido critério 14 são pequenas (acresce-se de todas as 25 *Pebble Hydro* e açudes que têm capacidade inferior a 10 hm³ com exceção de Ponte da Esperança no rio Ave), 21 são médias e as restantes 17 são grandes, os levantamentos deveriam ser efetuados com diferentes frequências. No entanto, no caso nacional, perante a falta de dados de base e/ou referências específicas, considera-se adequado adotar uma frequência de

partida para estes estudos de 10 anos. De acordo com os resultados que vierem a ser obtidos, essa frequência pode ser adaptada posteriormente, adaptando-se às necessidades e características específicas de cada albufeira. Haverá sempre lugar a casos excepcionais em que porventura poderá ser necessário realizar algum levantamento fora da frequência habitual definida como, por exemplo, devido a uma alteração na paisagem ou um evento climatérico extremo, assim como noutros casos não será justificável um levantamento num período de 10 anos, mas sim num período mais alargado por não se verificarem significativas alterações do fundo da albufeira.

Tabela 3 – Frequência aconselhada para levantamentos batimétricos (Carvalho *et al.*, 2000)

Dimensão da albufeira	Volume (hm ³)	Frequência
Pequena	< 10	2 anos
Média	10 a 100	5 anos
Grande	> 100	10 anos

Ainda que pesquisada, não foram encontrados na bibliografia muitos exemplos de realização sistemática de levantamentos batimétricos específicos para a monitorização de albufeiras, sendo que geralmente é frequente a realização de levantamentos no âmbito de estudos em que essa informação seja necessária. Destaca-se, no entanto, o caso da albufeira de *Conowingo* (EUA), que entrou em funcionamento em 1929 com cerca de 380 hm³ de capacidade total de armazenamento, onde foram realizados levantamentos em 1929, 1959, 1990, 1993, 1996, 2008 e 2011, apresentando à data do último levantamento uma percentagem de perda de capacidade total de 44% com 92% do volume morto ocupado por sedimentos, segundo Langland (2015). O caso de *Conowingo* pode ser então visto como um exemplo de uma albufeira em que houveram várias avaliações da quantidade de sedimentos acumulados, mas em que não se observa uma frequência padronizada, o que resultou da necessidade de adaptar a frequência dos levantamentos de acordo com a crescente e preocupante perda de capacidade total da albufeira.

Existem outros métodos para quantificar os sedimentos acumulados em albufeira, mas que se baseiam em estimativas. Ao serem monitorizadas as cargas sedimentares afluentes à albufeira e as que passam pela barragem e circuito hidráulico, através de amostradores que recolhem sedimentos em suspensão e amostradores para sedimentos da carga de leito, pode ser calculado o volume de sedimentos que fica retido e a eficiência de retenção. Recorrendo depois a modelos matemáticos pode ser estimada a distribuição espacial dos sedimentos e se estes se localizam na zona de volume morto da albufeira e/ou afetam o volume útil.

Como já foi referido em 2.5, a rede sedimentológica portuguesa apresenta estações nos cursos de água e albufeiras para caracterização dos regimes de transporte sólido, pelo que após se dar por concluído o processo de reestruturação desta rede e com uma recolha regular de dados, potencialmente será possível conjugar essa informação com levantamentos batimétricos periódicos e, desta forma, avaliar de uma forma mais completa a sedimentação nas albufeiras portuguesas em termos de volume e distribuição dos sedimentos retidos.

Assim, propõem-se a realização de levantamentos de linhas batimétricas com uma periodicidade de partida de 10 anos para as albufeiras portuguesas (Tabela 4), devendo esta frequência ser ajustada de acordo com os resultados obtidos após vários levantamentos e em casos excepcionais. Como na generalidade as albufeiras portuguesas não têm um historial de levantamentos batimétricos, será

aconselhável começar por fazer um levantamento batimétrico de todas as albufeiras com mais de 10 anos de existência e para as albufeiras mais recentes fazê-lo quando completarem 10 anos de funcionamento. Finalmente, para eventuais novas barragens destaca-se a importância de fazer um levantamento de linhas batimétricas inicial logo após concluído o enchimento da albufeira.

3.3. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS SEDIMENTOS

Como já referido em 2.3.1, a composição dos sedimentos é um melhor indicador de poluição em albufeira do que a qualidade da água, pois permite avaliar as alterações temporais na qualidade da massa de água devido à estratificação dos sedimentos, que apresentam diferentes teores de substâncias absorvidas e adsorvidas de acordo com a exposição a estas. Para além disso, algumas substâncias são difíceis de detetar na água devido a terem uma distribuição preferencial nos sedimentos e baixa solubilidade. Refere-se ainda que, uma vez que as albufeiras são um dos principais sumidouros de carbono, com elevadas taxas de enterro, e imobilizam parte da carga poluente que dá entrada na albufeira, uma possível dragagem, situações de eventos de cheias excepcionais, a ação do vento e tempestades ou alterações no equilíbrio do ecossistema ao nível do pH ou da matéria orgânica, podem fazer re-suspender os sedimentos depositados e libertar para a água os poluentes por estes retidos. Assim, o estudo da qualidade dos sedimentos em albufeiras permite não só avaliar a qualidade dos sedimentos acumulados e, conseqüentemente, os riscos para o ambiente e saúde pública dos contaminantes presentes, mas também obter um historial da exposição a fontes de poluição.

Para avaliar a qualidade dos sedimentos depositados em albufeira é fundamental definir a data de amostragem, em que zonas da albufeira se irá proceder à recolha dos sedimentos em termos de distribuição espacial, e também da espessura da amostra, quais os métodos de amostragem e, finalmente, quais serão os parâmetros físico-químicos a analisar e de que forma será realizada essa análise.

3.3.1. OBJETIVOS DO ESTUDO

Para este tipo de estudos importa sempre definir de forma clara quais são os objetivos que se pretendem atingir, sobretudo se tratar-se de um estudo pontual da qualidade dos sedimentos. Segundo o *Sediment Sampling Guide and Methodologies* (Kasich, *et al.*, 2012) os objetivos dos estudos ambientais relacionados com a sedimentação passam por bioensaios, estudos biológicos, monitorização, identificação de fontes de contaminação, medições *in situ* de alguns parâmetros como a carência de oxigénio nos sedimentos, a recolha de amostras *à priori* de se tomar a decisão de realizar uma dragagem, para estudar o historial de qualidade dos sedimentos e exposição a contaminantes, como prova jurídica, para avaliação das técnicas de recolha de sedimentos, avaliação da poluição difusa, libertação de nutrientes para a coluna de água e finalmente para previsão dos efeitos da re-suspensão dos sedimentos.

Como a presente dissertação se propõe a estabelecer uma metodologia que possa ser aplicada para avaliar a sedimentação em, genericamente, qualquer albufeira, serão dadas indicações sobre como proceder para encontrar as melhores práticas, não se pretendendo criar uma metodologia rígida e pouco flexível, mas sim estabelecer uma base para que o trabalho prático possa começar a ser desenvolvido, devendo a metodologia ser ajustada com a experiência.

Assim, pretendem-se avaliar os efeitos da sedimentação não só para monitorização, mas também proceder à avaliação da evolução histórica da qualidade dos sedimentos, pelo que se propõe o uso de diferentes métodos de acordo com o objetivo. Para a monitorização, é suficiente a recolha de sedimentos superficiais do fundo da albufeira e em suspensão, mas sendo fundamental que, por forma a que se

possam tecer comparações válidas entre diferentes recolhas, os locais de recolha e métodos utilizados sejam os mesmos. Por sua vez, para avaliação histórica da qualidade dos sedimentos é essencial a informação obtida pelos levantamentos batimétricos, para que se possam identificar zonas estratégicas com uma maior espessura de sedimentos acumulados, onde se pretenda extrair uma amostra vertical discreta.

3.3.2. PROGRAMAÇÃO DAS AMOSTRAGENS

Em termos de seleção da melhor altura do ano para realizar as amostragens é aconselhável que seja selecionada uma data no verão ou no outono. Podem ocorrer variações nos depósitos sedimentares assim como na sua qualidade devido a elevados caudais, degelo, acumulação de folhas no outono, práticas agrícolas como a aplicação de pesticidas, e ainda variações sazonais nas populações de bentónicos. Assim, para monitorização frequente de uma albufeira deve-se coordenar a recolha de amostras para uma mesma altura do ano, de forma a não serem introduzidos fatores de variabilidade resultantes da sazonalidade a que um sistema lagunar está sujeito e assim se poderem comparar esses resultados com os obtidos anteriormente. Deve-se ter ainda em atenção que poderá ser necessário remarcar a data de amostragem devido a condições climáticas adversas que se possam verificar.

Tabela 4 – Programação de atividades de avaliação da sedimentação em albufeiras

Período	Levantamento batimétrico	Monitorização	Avaliação histórica
Após enchimento da albufeira	1º		
1 – 9 anos		■	
10 anos	2º		(■)
11 – 19 anos		■	
20 anos	3º		(■)
Pós 20 anos	Reavaliar frequência	■	Reavaliar frequência

Quanto à frequência de amostragens, propõe-se o esquema apresentado na Tabela 4. A recolha dos perfis verticais para avaliação histórica da qualidade dos sedimentos deve proceder sempre um levantamento batimétrico, sendo a sua frequência dependente destes. Já as recolhas de amostras superficiais do fundo da albufeira e de sedimentos em suspensão para monitorização deverão ser executadas no período entre a realização dos levantamentos batimétricos. Será de referir que a realização de perfis verticais de sedimentos é ainda dependente dos resultados obtidos pelo levantamento batimétrico de forma que deve ser avaliada a necessidade da sua realização, sendo que se justifica que sejam recolhidas estas amostras onde se verificar a acumulação de depósitos com espessuras consideráveis entre os diferentes levantamentos. Para cada albufeira, após o 3º levantamento batimétrico, é aconselhável que todo o programa de avaliação, quer da quantidade quer da qualidade dos sedimentos, seja reavaliado. Por sua vez, a frequência de monitorização entre levantamentos deve ser ditada de acordo com a carga sedimentar afluente à albufeira, pelo que necessita de ser ajustada de acordo com os resultados que se verificarem e com os recursos financeiros disponíveis.

3.3.3. SELEÇÃO DOS PONTOS DE AMOSTRAGEM

A seleção da localização e número de amostras a recolher é uma das questões de maior relevo durante a fase de planeamento. Novamente, a seleção deve ter em consideração os objetivos que se pretendem para o estudo em causa, e de acordo com os recursos disponíveis, restrições existentes e de acordo com as dimensões da albufeira. Sempre que possível é aconselhável um reconhecimento inicial da zona através de levantamentos batimétricos e que sejam consultados outros estudos que possam ajudar na seleção dos melhores locais.

Para monitorização deve existir uma distribuição de pontos de amostragem na albufeira que permita a avaliação em diferentes zonas desta, sendo que a densidade de pontos fica dependente do tamanho da albufeira e dos recursos disponíveis. Já para a avaliação do historial da qualidade dos sedimentos acumulados o número de pontos de amostragem e a sua localização dependem do resultado dos levantamentos batimétricos.

3.3.4. MÉTODOS DE AMOSTRAGEM

Quanto ao tipo de amostra a recolher do fundo da albufeira destaca-se a existência de dois grandes tipos: as amostras superficiais e as verticais ou núcleos de sedimentos (do inglês: *cores*). Na metodologia que se apresenta na presente dissertação aborda-se a recolha destes dois tipos de amostras de sedimentos, uma vez que para monitorização frequente da albufeira é adequada a recolha de amostras superficiais, mas para uma avaliação histórica da qualidade dos sedimentos é necessária uma amostragem vertical. Já quanto aos diferentes tipos de amostragem do material em suspensão para a monitorização da albufeira indica-se que podem ser por recolha física ou por registo eletromagnético, existindo uma grande diversidade de equipamentos e metodologias.

Para recolha superficial de sedimentos do fundo da albufeira, isto é, da carga de leito, pode-se usar pás (Fig. 7) para águas muito pouco profundas e ainda dragas como a *Eckman*, *Peterson*, *Petite Ponar* e *Van Venn*. O uso de pás está limitado a pequenas profundidades da água, para além de que só podem ser usadas em situações com corrente calma e mesmo assim os sedimentos mais finos podem ser arrastados aquando da colheita. É, no entanto, um método simples e de baixo custo. A draga *Eckman* também deve ser usada em águas calmas e permite a recolha de argilas e silte, sendo que seixos e galhos podem interferir com o fecho da mandíbula. É um dispositivo que causa poucos distúrbios na amostra, mas que apresenta pouca estabilidade devido ao seu baixo peso que faz com que tenha tendência para se movimentar com a corrente e falhar o ponto pretendido para amostragem. As dragas *Petite Ponar* e *Peterson* têm similaridades com a *Eckman* destacando-se que podem recolher cascalho de reduzida dimensão para além dos sedimentos finos e intermédios, e ainda que são mais estáveis por serem mais pesadas, embora causem uma mistura dos sedimentos (Kasich *et al.*, 2012).



Fig. 7 – Pá para recolha de sedimentos (U.S. Geological Survey)

O uso de pás nas albufeiras portuguesas não é, em geral, viável pelo que se opta pelo uso das dragas, que não têm um custo elevado e são comumente usadas neste tipo de estudos. A draga deve ser mergulhada lentamente ao longo da coluna de água, sobretudo junto ao fundo, para minimizar a dispersão de material fino no impacto da draga com a superfície dos sedimentos. Após ser assegurado o afundamento da draga devido ao seu peso, esta deve ser puxada lentamente para a superfície e a amostra preservada num recipiente próprio. Nos casos em que o volume de amostra recolhida se apresentar insuficiente, é aconselhável o uso de pesos adicionais para permitir que a draga tenha uma maior penetração nos sedimentos, sendo que se tal continuar a não ser suficiente é necessário reavaliar o método de amostragem.

Adicionalmente, refere-se que existem métodos para medir a carga de sedimentos por arrasto, ou seja, quantificar os sedimentos que se movem sobre o leito, sendo que os métodos são classificados como sendo de cesta ou caixa, de bandeja ou tanque, de diferencial de pressão, e de estrutura de fenda ou poço, sendo os três primeiros casos estruturas móveis e o último uma construção fixa na seção transversal ao longo do leito. Este último tipo de dispositivo tem uma construção dispendiosa e é de difícil operação, pelo que são muito pouco frequentes os casos da sua implementação. Genericamente os dispositivos de amostragem da carga de arrasto são usados nos rios e compreendem um recipiente que é colocado sobre fundo do leito com recurso a uma corda e que tem uma abertura na direção de montante, na qual entram os sedimentos ao longo de um determinado período de tempo. É aconselhável a realização de várias medições ao longo da seção transversal em estudo, podendo-se definir um determinado tempo para cada amostragem, sendo as amostras recolhidas em posições a igual distância e no final do processo misturadas para uma análise única. Idealmente os dispositivos não deveriam interferir com a carga de arrasto, no entanto, como têm de ser dispostos sobre o leito, o padrão de escoamento e o movimento dos sedimentos na proximidade do amostrador sofrem algumas alterações. Por este motivo, tenta-se fazer uma calibração para minimização dos erros decorrentes destas interferências, embora nem sempre os resultados sejam os melhores, ou recorre-se a outros métodos como o uso de traçadores, por exemplo, desde que sirvam o propósito do estudo (Poletto, 2014).

Por sua vez, na amostragem de sedimentos em suspensão nas albufeiras é fundamental considerar que a quantidade de partículas em suspensão é variável ao longo de um perfil transversal, ou seja, é função da distância às margens, mas também da profundidade, isto devido à distribuição transversal da velocidade da corrente. Desta forma, para uma avaliação mais completa deveriam ser realizadas amostras ao longo da seção transversal e para diferentes profundidades. Para além disso, ao longo do perfil longitudinal da albufeira também ocorrem, naturalmente, variação da concentração de sedimentos em suspensão, pelo que devem ser realizadas recolhas em várias seções.

Um dos métodos de recolha física de sedimentos em suspensão é a colheita de uma amostra integrada de água, na vertical, desde a superfície até ao leito da albufeira ou a outra profundidade definida, em que o dispositivo desce a uma velocidade constante recolhendo amostras de água a várias profundidades, o que permite obter no final uma amostra com características médias da coluna de água analisada. Da mesma forma, podem-se recolher amostras em diferentes zonas da seção transversal que são depois reunidas numa só amostra, de acordo com o *Equal-Width Increment Method* ou o *Equal-Discharge Increment Method*, o que permite a obtenção da concentração média em sedimentos suspensos. Pode-se ainda proceder a amostragens pontuais de sedimentos em suspensão utilizando um amostrador que recolhe água a uma determinada profundidade apenas, destacando-se os dispositivos garrafa *Delft*, *Glenber*, *Van Dorn*, entre tantos outros. As amostragens de sedimentos em suspensão com registo eletromagnético podem ser feitas recorrendo igualmente a diversos dispositivos, nomeadamente, por exemplo, os que usam um turbidímetro (Poletto, 2014).

Já as amostragens verticais com recolha de núcleos (*cores*) de sedimentos (Fig. 8), tal como referido previamente, têm interesse para o estudo da evolução histórica da qualidade dos sedimentos e a sua exposição a contaminantes ao longo de um determinado período de tempo. Assim, propõe-se também a concretização nas albufeiras portuguesas deste tipo de amostragem pois, devido à inexistência de uma monitorização ao longo dos anos nas albufeiras já existentes, tal permitiria obter essa informação histórica e ser um grande passo na compreensão da sedimentação em albufeiras em Portugal. Para além disso, justifica-se que se aplique este método quando se observam acumulações de vários metros de sedimentos em determinadas zonas da albufeira, pois uma amostragem superficial é insuficiente para conhecer o material aí acumulado, se este não for uniforme. Para recolha destes núcleos de sedimentos recorre-se a um processo denominado por *coring*, existindo uma série de dispositivos, alguns dos quais apresentados na Tabela 5, que permitem este tipo de recolha dos sedimentos do fundo da albufeira.



Fig. 8 – Núcleo recolhido com um *Ogeechee corer* na albufeira de Rasmussen (EUA) (Straub *et al.*, 2006)

O processo de *coring* consiste, genericamente, na extração de um cone cilíndrico de material, a que se chama de núcleo, e que se pretende que contenha uma amostra intacta do material em profundidade, pelo que geralmente a amostra é recolhida num tubo que depois pode ser aberto em laboratório para análise das características físico-químicas do material. A obtenção destes núcleos pode ser feita com recurso a diferentes técnicas, com equipamentos em que é usado o efeito da gravidade para a penetração no solo, por vibrações, por diferentes técnicas de perfuração, e ainda por percussão.

Tabela 5 – Listagem de dispositivos de *coring* usados pela *University of Minnesota* (LacCore, 2011)

Dispositivos de <i>coring</i>	Max profundidade de água	Max espessura de sedimentos	Diâmetro do núcleo
<i>Hongve corer</i>	Limitada pelo comprimento da corda	0,15 m	2 cm
<i>HTH corer</i>		0,5 m	7 cm
<i>Freeze corer</i>		1,2 m	15 cm
<i>Muck corer</i>		1,5 m	7 cm
<i>Griffith corer</i>	3 m	3 m	7 cm
<i>Nesje corer</i>	100 m	6 a 9 m	variável
<i>Livingstone and bolivia corers</i>	30 m	15 a 20 m	variável
<i>Vibracoring system</i>		15 a 20 m	variável
<i>Kullenberg coring system</i>	Limitada pelo comprimento da corda	14 m	7 cm
<i>Global lake brilling (GLAD) system</i>	Max de sedimentos e água de 1500 m		variável

De acordo com os dados da Tabela 5, constata-se que grande parte dos dispositivos apresentados não podem ser usados em várias albufeiras portuguesas por não permitirem retirar sedimentos a grandes profundidades ou devido à profundidade da coluna de água. O *Kullenberg coring system* afigura-se como sendo o dispositivo ideal dos apresentados para as albufeiras com elevadas profundidades, tendo como desvantagem só poder recolher 14 m de sedimentos, o que pode ser insuficiente em algumas zonas. Nesses casos, pode-se recorrer ao *Livingstone and bolivia corers* ou *Vibracoring system* desde que a coluna de água o permita.

No entanto, os desafios da aplicação de métodos de *coring*, em particular os de precursão, não resultam só das limitações dos dispositivos disponíveis, mas também da necessidade de mobilizar uma plataforma flutuante de grande dimensão, com capacidade para suportar o equipamento de *coring* e permitir a sua operação, assim como a deposição temporária dos núcleos já extraídos. Esta plataforma tem ainda de ser fixa às margens para permitir que o trabalho seja realizado com sucesso e os núcleos sejam corretamente georreferenciados. Por todo este conjunto de características, o custo deste equipamento é elevado, assim como o custo do seu transporte para a albufeira sempre que se pretende fazer amostragens.

Por forma a avaliar a possibilidade de realizar este tipo de amostragem em Portugal procurou-se contactar com laboratórios e empresas nacionais com experiência em *coring*, de que resultou o envolvimento e interesse da empresa Mota-Engil, multinacional com atividade centrada na construção e gestão de infraestruturas. Segundo a informação fornecida pelo Núcleo de Geotecnia daquela empresa haveria a possibilidade e capacidade para a recolha de sedimentos pelos métodos de *Direct Push*, por perfuração com rotação convencional ou *airline*, por percussão e ainda por *Vibracoring*. Foi ainda analisada a possibilidade de realizar este trabalho na albufeira de Venda Nova, tendo-se concluído que o melhor método seria por sondagens mecânicas à percussão sobre uma plataforma flutuante de bidões, de forma a reduzir o custo associado. Foi fornecido orçamento para a realização deste trabalho, mas o mesmo não teve prosseguimento por não ter sido possível mobilizar cabimento orçamental no âmbito e em tempo de realização da presente dissertação.

3.3.5. FRAÇÃO DE SEDIMENTOS A ANALISAR

As características físico-químicas dos sedimentos são influenciadas pelo tamanho das partículas de sedimentos, verificando-se que as areias e partículas de maior dimensão são geralmente constituídas por minerais inorgânicos estáveis de silicatos, sendo que estas partículas de maior dimensão de depósitos não consolidados, geralmente, não estão associadas com contaminantes e não são requeridas para análise. Por outro lado, as partículas mais finas de silte e argilas são mais instáveis e têm um rácio de área de superfície pelo volume muito superior às partículas grosseiras, sendo por isso muito mais química, física e biologicamente interativas e, como tal, devem ser analisadas.

De facto, no que se refere à fração dos sedimentos a analisar, de acordo com o DL n.º 103/2010, de 24 de setembro, referente às normas de qualidade ambiental no domínio da Política de Água, alterado pelo DL n.º 83/2011, de 20 de junho, e ainda alterado e republicado pelo DL n.º 218/2015, de 7 de outubro, mais precisamente segundo as indicações do artigo 5.º, as análises nos sedimentos de contaminantes orgânicos devem ser efetuadas na fração de sedimentos inferior a 2 mm e a análise dos metais na fração inferior a 63 µm. Já de acordo com o *Sediment Sampling Guide and Methodologies* (Kasich *et al.*, 2012) é referido que, de modo a atingir determinados objetivos em termos de dados de qualidade específicos, devem-se realizar as análises na fração inferior a 0,06 mm e que a amostra deve ter mais de 30% de silte e argila, sendo que tem de ser conhecido o volume total de sedimentos e a massa volúmica do total para depois se poder calcular a concentração do contaminante. Para além disso, no caso de análises de Compostos Orgânicos Voláteis (COV) não se devem separar as frações, e para qualquer análise deve ser removido previamente qualquer resíduo como galhos e folhas, entre outros materiais. Na bibliografia consultada, quando especificado, é frequente selecionar-se a fração mais fina de forma semelhante ao referido no DL n.º 103/2010, pelo que segue o estipulado no Decreto-Lei.

3.3.6. PARÂMETROS A ANALISAR

A seleção dos parâmetros físico-químicos e biológicos a analisar nos sedimentos obedece aos objetivos que se pretendem para o estudo. No entanto, segundo Kasich *et al.* (2012) para cada amostra de sedimentos deve ser sempre analisado o Carbono Orgânico Total e a distribuição de tamanho das partículas. A identificação de possíveis fontes de poluição tóxica e difusa deve preceder a escolha dos parâmetros a analisar, caso não seja possível realizar uma avaliação mais completa.

Na Tabela 6 constam alguns dos parâmetros considerados mais relevantes a analisar, sendo que existe uma menor frequência da avaliação dos parâmetros biológicos segundo a bibliografia consultada (Tabela 2). Refira-se que, embora seja dada maior atenção a poluentes prioritários, deve-se acompanhar os estudos relativos a poluentes emergentes nas massas de água e verificar a sua necessidade de análise nos sedimentos das albufeiras.

As amostras, que devem ser corretamente identificadas (incluindo a indicação da profundidade da coluna de água foram recolhidas) e preservadas até à sua análise em laboratório, têm de ser analisadas num prazo de 14 dias para os compostos orgânicos, 6 meses para os metais, com exceção do mercúrio, e 28 dias para o mercúrio e nutrientes (Kasich *et al.*, 2012).

Já os métodos utilizados para análise devem seguir os *Standard Methods* ou outros que se considerem adequados e sigam práticas de qualidade, destacando-se a conveniência de que sejam mantidos os métodos de análise quando se pretendam comparar resultados.

Tabela 6 – Lista de alguns possíveis parâmetros a analisar nos sedimentos de fundo

Parâmetros	
Físicos	Densidade
	Distribuição do tamanho das partículas
	Aparência, textura, odor e cor (descritivo)
	Radioatividade
	Força de cisalhamento e teor de água (quando a amostragem é por draga)
Químicos	Carbono Orgânico Total (TOC)
	Metais: Al, As, Cd, Pb, Cu, Cr, Fe, Mn, Hg, Ni, Sn, Zn (e outros que mostrem relevantes)
	Nutrientes: CQO, Fósforo Total, Azoto Kjeldahl total e Amónia
	Cianeto
	Óleo e gordura
	Orgânicos persistentes: pesticidas, inseticidas, herbicidas, PCB, BNA, TPH, HCB, PAH, PCDD, PCDF
	Orgânicos voláteis
	Sulfitos voláteis
	Potencial de oxidação-redução
	pH
Biológicos	Carência de oxigénio dos sedimentos (<i>Sediment Oxygen Demand – SOD</i>)
	Bioensaios (toxicidade)
	Estudos biológicos (ex: macroinvertebrados)

No caso particular em que se pretende estudar a evolução histórica da qualidade dos sedimentos devem-se recolher diversas amostras em cada núcleo de sedimentos, correspondentes a diferentes profundidades destes. Desta forma, pela análise das diferentes amostras dos núcleos é possível obter perfis de variação de cada parâmetro em função da profundidade a que os sedimentos se encontram nesse ponto da albufeira. O número de amostras a recolher em cada núcleo deve ter em atenção o período de tempo em que essa camada de sedimentos se depositou e a sua espessura, podendo-se definir, ao assumir-se uma taxa de sedimentação constante, que as amostras devem ser extraídas a iguais distâncias entre elas ao longo da espessura do núcleo.

A recolha das amostras de água para avaliação dos sedimentos suspensos permite avaliar, em paralelo, a qualidade da água recolhida, conseguindo-se analisar o teor dos contaminantes quanto à sua concentração total e dissolvida. Segundo o artigo 6.º do DL n.º 103/2010, de 24 de setembro, as análises de água devem ser efetuadas com a amostra integral de água com exceção dos metais cádmio, chumbo, mercúrio e níquel em que a concentração é determinada na fase dissolvida.

Complementarmente, mesmo que o estudo em causa incida apenas na qualidade dos sedimentos, é conveniente a avaliação de alguns parâmetros gerais da qualidade da água, nomeadamente a temperatura, oxigénio dissolvido, condutividade, pH, turvação e se necessário a velocidade da corrente.

3.3.7. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos devem ser apresentados num relatório que inclua informação sobre os pontos de amostragem incluindo as coordenadas geográficas, data(s) de amostragem, equipamento e metodologias, tratamento das amostras e a sua preservação, análises laboratoriais realizadas, amostras de controlo (“brancos”), e os valores obtidos para cada parâmetro, que devem ser apresentados em base seca em $\mu\text{g/g}$ ou em mg/kg no caso dos teores em contaminantes nos sedimentos. Seria aconselhável que fosse ainda criada uma base de dados para inserir estes resultados, ou a sua inclusão numa base de dados já existente.

Sempre que possível os resultados devem ser comparados com as gamas de valores tabelados pela legislação nacional ou internacional, para além de normas existentes específicas para este tipo de estudos. A *Guideline for use at contaminated sites in Ontario* (1997) é frequentemente usada na bibliografia consultada, recorrendo-se para tal aos valores de referência da Tabela E do referido documento (*Sediment quality criteria*), que reportam às *Guidelines for the Protection and Management of Aquatic Sediment Quality in Ontario* (Persaud *et al.*, 1993), mais concretamente referentes ao nível de efeitos menores. Esses valores de referência permitem avaliar se os sedimentos apresentam concentrações de contaminantes que impliquem que deva existir uma reabilitação do local de forma a evitar potenciais riscos adversos à saúde humana, ao ecossistema e ao ambiente. As *Guidelines for the Protection and Management of Aquatic Sediment Quality in Ontario* estipulam também valores tabelados para o nível de efeitos severos e em alguns casos para o nível para o qual não se verificam efeitos. É especificado que os valores de referência seguem os *MOE Analytical Methods* de 1983 e são em base seca, com exceção dos referentes ao nível dos efeitos severos para os PCB, pesticidas organoclorados e PAH que estão em $\mu\text{g/g}$ de carbono orgânico e devem ser convertidos multiplicando pela fração em TOC dos sedimentos.

Também referentes a normas do Canadá estão disponíveis as *Sediment Quality Guidelines for the Protection on Aquatic Life* das *Canadian Environmental Quality Guidelines* (CCME, 2001). Nestas são apresentados valores de referência para avaliar os potenciais efeitos biológicos adversos em sistemas aquáticos, sendo derivados de informação obtida por avaliações toxicológicas. Existem dois tipos de valores de referência: um valor mais baixo referente à concentração abaixo da qual os efeitos biológicos ocorrem raramente e um valor mais elevado correspondente ao nível de efeitos prováveis e que se define como sendo o nível a partir do qual os efeitos adversos são expectáveis de ocorrer com frequência.

Destaca-se ainda a existência de alguns valores de referência da *U.S. Environment Protection Agency* nomeadamente aqueles que constam da *Proposed Sediment Quality Criteria for the Protection of Benthic Organisms* (U.S. EPA, 1993) e *Guidelines for Classifying Sediments of Great Lakes Harbors* (Heath *et al.*, 1995). No primeiro caso, tratam-se de alguns limites criados para proteção dos organismos bentónicos relativamente a compostos associados aos sedimentos e foram criados tanto para água doce como para ambiente marítimo. São expressos em micrograma por grama de carbono orgânico e aplicam-se a sedimentos permanentemente inundados por água, a sedimentos da zona intertidal, e a sedimentos inundados periodicamente durante tempo suficiente para o desenvolvimento de comunidades de bentónicos. Os referidos critérios (U.S. EPA, 1993) apresentam, no entanto, apenas valores de referência para acenafileno ($130 \mu\text{g/g}_{\text{oc}}$), dieldrina ($11 \mu\text{g/g}_{\text{oc}}$), endrina ($4,2 \mu\text{g/g}_{\text{oc}}$), fenantreno ($180 \mu\text{g/g}_{\text{oc}}$) e fluoranteno ($620 \mu\text{g/g}_{\text{oc}}$).

As já referidas *Guidelines for Classifying Sediments of Great Lakes Harbors* (Heath *et al.*, 1995) foram desenvolvidas como orientações para auxiliar a tomada de decisão relativa à eliminação de material dragado, de acordo com uma classificação deste como não poluído, moderadamente poluído e fortemente poluído. A classificação é obtida por determinação da gama de valores no qual cada

parâmetro avaliado se inclui de acordo com os valores de referência, sendo a posterior classificação global da amostra atribuída de acordo com a classificação predominante dos parâmetros individuais, com exceção do mercúrio e PCB em que, devido à conhecida bioacumulação destes compostos, caso sejam ultrapassados os correspondentes limites, os sedimentos são classificados como poluídos e a sua eliminação é mais exigente. Esta metodologia de avaliação da qualidade dos sedimentos foi desenvolvida para ser aplicada especificamente nos portos da região dos Grandes Lagos nos EUA (Illinois, Indiana, Michigan, Minnesota, Nova Iorque, Ohio, Pensilvânia e Wisconsin), tendo, no entanto, já sido usada noutros casos, nomeadamente para a albufeira de *Vaussaire* no rio *Rhue* em França (Frémion *et al.*, 2016).

Em termos de normas europeias, estão disponíveis valores de referência para a qualidade de sedimentos em França segundo o *Decree 08/09/2006* (NOR: DEVO0650505A) (Berteaud & Roche, 2006). Este decreto apresenta dois grupos de valores: o nível 1, abaixo do qual o potencial impacte é considerado neutro ou insignificante, e o nível 2, acima do qual é obrigatório realizar análises complementares mais específicas. Valores entre estes dois níveis podem requerer análises complementares para melhor compreender o fenómeno de contaminação. Os valores para cada nível constam nas tabelas 2 e 3 do referido decreto e devem ser comparados com análises às frações de sedimentos inferiores a 2 mm.

Por sua vez, nos Países Baixos tem havido uma preocupação em estabelecer políticas de proteção da qualidade dos solos e dos sedimentos, sendo que os valores de referência *Dutch Target and Intervention Values* (VROM, 2000) têm sido amplamente utilizados em todo o mundo por terem sido várias vezes testados. Estes valores foram reformulados na década de 90 com recurso a métodos ecotoxicológicos e tendo em consideração o potencial humano de exposição aos contaminantes, sendo que apresentam valores de referência nacional, ou de *background*, e definem a concentração de intervenção para além da concentração limite.

As amostras de *background* (ou de base) são utilizadas para se avaliar as concentrações naturais dos elementos do local em estudo, sendo obtidas em áreas geograficamente próximas àquela em estudo (têm de pertencer à mesma bacia hidrográfica). Estas amostras funcionam assim como um controlo pois a grande variedade de tipos de solo e sedimentos gerados têm influência nos resultados. Para a escolha do local de amostragem é importante que se identifique um local que não tenha sofrido ação antrópica, sendo aconselhável escolher áreas com vegetação original. As amostras do fundo da camada de sedimentos acumulados na albufeira podem também ser assumidas como uma referência (Poletto, 2014).

No Anexo I apresentam-se alguns dos valores de referência descritos, devendo referir-se que não se incluem todos os contaminantes presentes nos *Dutch Target and Intervention Values* (VROM, 2000). Os limites definidos por estas normas conseguem ser bastantes distintos. Para tal, comparem-se, por exemplo, os valores, no geral, mais exigentes do Canadá com os europeus. Isto é decorrente das diferenças na natureza mineralógica dos sedimentos entre os vários países e inclusive entre diferentes regiões. Por este motivo, a interpretação da qualidade dos sedimentos em Portugal não se deve basear unicamente na comparação com estes valores, sendo importante que se desenvolvam mais estudos em território nacional para se ter uma melhor base para analisar a qualidade dos sedimentos. Apesar disto, até que seja implementada uma política de proteção da qualidade dos sedimentos (e dos solos) em Portugal, as *guidelines* usadas por outros países são uma referência e devem ser vistas como um bom ponto de partida.

3.4. EFEITOS NA QUALIDADE DA ÁGUA

Ao contrário do que se verifica a nível nacional, e também internacional, para o estudo da qualidade dos sedimentos em albufeiras, a qualidade da água tem sido intensivamente estudada, existindo legislação comunitária, mas também nacional bastante exigente. Em Portugal, tem-se em vigor a Lei da Água que, transcrevendo a Diretiva Quadro da Água, estabelece as bases e o quadro institucional para a gestão sustentável das águas.

Em termos de normas e requisitos a observar na utilização das águas para consumo humano, suporte da vida aquícola, águas balneares e águas de rega, para além de normas de descarga de águas residuais na água e no solo, aplica-se o DL n.º 236/98, de 1 de Agosto, com a finalidade de proteger o meio aquático e melhorar a qualidade das águas em função dos seus principais usos, sendo atribuídas competências a diversas entidades no que respeita ao licenciamento, inspeção, fiscalização, vigilância e classificação e inventário das águas. O DL n.º 243/2001, de 5 de setembro, revisto pelo DL n.º 306/2007, de 27 de agosto, é relativo especificamente à qualidade de água destinada ao consumo humano, mantendo aspetos fundamentais do DL n.º 236/98, mas procedendo a algumas revisões e clarificações, tais como na lista dos parâmetros realizar, nos valores paramétricos, entre outros.

Por sua vez, o DL n.º 103/2010, de 24 de setembro, estabelece as normas de qualidade ambiental (NQA) para as substâncias prioritárias e para outros poluentes com vista a assegurar a redução gradual da poluição provocada por estas substâncias e com a finalidade de alcançar o bom estado das águas superficiais.

Posto isto, na tentativa de quantificar os efeitos da quantidade e qualidade dos sedimentos na albufeira na qualidade da água da mesma, deve-se dar continuidade à avaliação que já é realizada à qualidade da água seguindo os documentos legais em vigor, cruzando essa informação com a obtida pela monitorização da sedimentação, tentando-se estabelecer correspondências entre as variações da qualidade dos sedimentos com a qualidade da água e compreender melhor a partição dos contaminantes libertados ou transportados para a albufeira.

A avaliação histórica da qualidade dos sedimentos, como descrito em 3.3.6, permite uma comparação com os correspondentes valores históricos da qualidade da água para vários parâmetros de que existem já registos extensos para cada albufeira.

Tal como para os sedimentos, embora seja dada uma maior importância às substâncias tidas como prioritárias, mostra-se essencial acompanhar os desenvolvimentos no estudo de poluentes emergentes, cujo crescente uso, a par com a incapacidade atual da comunidade científica em cobrir o aparecimento de novos compostos, leva a que representem um risco ambiental complexo de conter.

3.5. EFEITOS NOS SERES VIVOS

Os contaminantes podem permanecer por longos períodos de tempo associados aos sedimentos, como é o caso dos metais em meio anóxico, ou podem sofrer degradação, como acontece com parte dos compostos orgânicos como os hidrocarbonetos e organoclorados, sendo que quando estão ligados aos sedimentos podem sofrer alterações químicas e biológicas que os disponibilizam à biota. Por este motivo, é defendido por alguns investigadores como Simpson *et al.* (2005) a utilização de um sistema para a avaliação dos efeitos da qualidade dos sedimentos sobre os seres vivos denominado de *Sediment Quality Assessment* que considera as especificidades de cada local e se baseia numa avaliação com três linhas de evidências: a especificação química dos contaminantes, testes ecotoxicológicos e avaliação da

comunidade bentónica, sendo que mais recentemente tem-se tentado também explorar a avaliação através do potencial de bioacumulação e bioconcentração.

Uma avaliação que tem em conta a especiação química dos sedimentos justifica-se por os metais nos sedimentos poderem ocorrer como solúveis ou trocáveis, como material amorfo, complexado pela matéria orgânica ou ligado a sulfetos, e na estrutura cristalina dos minerais, pelo que a determinação total dos elementos não é eficaz para compreender os efeitos da mobilidade, toxicidade e biodisponibilidade dos contaminantes. Assim, esta avaliação pode ser suportada por um modelo biogeoquímico de partição em que se relacionam as concentrações dos metais extraídos com as de sulfetos volatilizáveis com ácidos e ainda com as concentrações de compostos orgânicos, com o teor de matéria orgânica (geralmente através do TOC) e com a granulometria, de forma a determinar a biodisponibilidade dos contaminantes químicos nos sedimentos. Quando se verifica que as concentrações dos sulfetos volatilizáveis com ácidos são superiores às concentrações de metais extraídos, implica que os metais estão ligados aos sulfetos, o que reduz a sua biodisponibilidade, ao passo que se se suceder o inverso os metais podem ou não apresentar toxicidade. Outra abordagem passa pelo fracionamento de metais por extração sequencial, existindo diferentes metodologias para o fazer (Poletto, 2014).

A avaliação dos efeitos dos contaminantes dos sedimentos sobre os seres vivos não pode ser baseada somente em parâmetros químicos, mas também em parâmetros biológicos, motivo porque se recorre aos testes ecotoxicológicos e à avaliação da comunidade bentónica. Com os testes ecotoxicológicos pretendem-se identificar os efeitos adversos provocados pela exposição dos seres vivos a fatores de perturbação ambiental em testes de toxicidade aguda, crónica ou de multiespécies, e com a avaliação da comunidade bentónica pretende-se que seja estudada a evolução da estrutura da comunidade uma vez que os macroinvertebrados ocorrem em associação com o substrato de fundo, sendo por isso também organismos ideais para os testes de toxicidade de sedimentos.

É exemplo de um estudo realizado em albufeira, no sentido de avaliar os efeitos no ecossistema da sedimentação, a avaliação das alterações na composição comunidade bentónica ao longo do envelhecimento (1968-70 e 1991-92) da albufeira de *Pawnee* nos EUA por Popp & Hoagland (1995). Verificou-se um declínio acentuado da biomassa de macroinvertebrados bentónicos presentes na albufeira no período de tempo considerado e o desaparecimento de algumas espécies. Foram apresentadas como causas o aumento progressivo de sedimentos acumulados e de matéria orgânica. Outro estudo neste sentido foi realizado por Fontana & Bicudo (2009) nas albufeiras em cascata do rio *Parapanema* no Brasil, em que se realizou um inventário das diatomáceas pertencentes às classes *Coscinodiscophyceae* e *Fragilariophyceae* dos sedimentos superficiais do fundo, recolhidos com dragas em várias estações.

Tanto em Portugal como a nível internacional, o estudo da sedimentação para compreensão dos efeitos sobre o ecossistema precisa de ser mais explorado com o desenvolvimento de novos métodos e a seleção de novos organismos, sendo várias as dificuldades que acompanham estes estudos, tais como a falta de informações sobre as interações tróficas das espécies assim como o seu papel ecológico. Neste sentido, qualquer metodologia a adotar em Portugal deve ser vista, a esta data, do ponto de vista exploratório, não se especificando, por isso, um procedimento a seguir.

4

MEDIDAS DE PROTEÇÃO E OPERACIONAIS QUE VISAM A MITIGAÇÃO E/OU REDUÇÃO DOS EFEITOS DA SEDIMENTAÇÃO EM ALBUFEIRAS

4.1. INTRODUÇÃO

A sedimentação em albufeiras pode ocorrer de diferentes formas, podendo não só variar os efeitos já descritos em 2.3, como também a quantidade de sedimentos acumulados, verificando-se que, mundialmente, ocorrem taxas de sedimentação muito diferenciadas que, conjugadas com a capacidade de armazenamento da albufeira, conduzem a taxas de perda de armazenamento morto e total muito distintas. O enchimento de uma albufeira com sedimentos pode demorar desde somente alguns anos até mais de um século, dependendo das condições do local como a dimensão, topografia, solo, hidrologia e geologia da bacia hidrográfica, assim como o tamanho e forma da albufeira.

No panorama mundial, observa-se que a taxa de sedimentação anual típica num país varia entre 0,05% até mais de 3%, com uma média de 0,96%, sendo alguns dos países mais afetados a China e a Tanzânia (Boes *et al.*, 2014). Embora na Europa ocidental e central não sejam frequentes taxas de sedimentação muito elevadas, observaram-se taxas significativas em algumas zonas como, por exemplo, nos Alpes Suíços, onde ao fim de 50 anos de operação se puderam observar aumentos de 28 m no nível do leito do rio devido à acumulação de sedimentos (albufeira de Räterichsbodensee). Disso será exemplo e aprofundado, no presente capítulo, o caso da barragem de Gebidum, na Suíça, onde o volume morto seria completamente preenchido em 20 a 25 anos se não fossem feitas descargas (Meile *et al.*, 2014).

Também a título de exemplo, têm vindo a ser documentados diversos casos de taxas de perda de capacidade total de armazenamento superiores a 1% por ano nos Estados Unidos, sendo que 20 grandes barragens no estado do Kansas já perderam entre 2% a 43% da sua capacidade total de armazenamento com taxas de perda anual que variam entre 0,04 e 0,9% (Juracek, 2015).

Para mais facilmente se compreender estes valores, as taxas médias de sedimentação anual são classificadas com muito baixas se inferiores a 0,1%, baixas se entre 0,1 e 0,2%, moderadas se entre 0,2 e 0,4%, elevadas se entre 0,4 e 0,6%, e muito elevadas se superiores a 0,6%. Já a perda de capacidade total de armazenamento da albufeira traduz-se numa classificação equivalente da idade da albufeira em que se for inferior a 5% é muito jovem, se for entre 5 e 10% é jovem, entre 10 e 20% tem uma idade moderada, entre 20 e 30% é velha e com mais de 30% é muito velha (Juracek, 2015).

Com algumas albufeiras a serem afetadas pela sedimentação a um ritmo mais acelerado do que o previsto durante a fase de projeto da barragem e com todas as consequências que isso traz para a exploração dos aproveitamentos hidroelétricos e gestão dos recursos hídricos, torna-se fundamental estabelecer medidas de proteção e operacionais com o objetivo de mitigar ou reduzir estes efeitos. As possíveis medidas incluem a remoção dos sedimentos e a sua reutilização ou disposição, redução das cargas sedimentares afluentes, modificações nos órgãos da barragem como a tomada de água e descarga de fundo, alterações nas práticas de operação, e mudanças na localização e características dos habitats, para além de necessariamente se terem de avaliar todos os efeitos que estas medidas têm a nível ambiental.

Neste capítulo exploram-se as diferentes medidas que se têm vindo não só a estudar mas também a implementar internacionalmente, e que visam sobretudo reduzir a quantidade de sedimentos que são acumulados em albufeira, remover os sedimentos já acumulados ou diminuir a erosão na bacia hidrográfica.

4.2. MEDIDAS PARA MITIGAÇÃO E REDUÇÃO DOS SEDIMENTOS ACUMULADOS

As medidas para reduzir a quantidade de sedimentos depositados nas albufeiras podem ser categorizadas como de mitigação e de redução. As medidas de mitigação permitem minimizar a sedimentação na albufeira, o que inclui o controlo da erosão na bacia, bypass de sedimentos, a descarga de sedimentos (*sluicing*), e passagem das correntes de turbidez. Já as medidas de redução ou remoção envolvem a retirada de sedimentos que já se encontram depositados na albufeira, o que inclui dragagens, escavação a seco e descargas de fundo com esse efeito.

No primeiro caso, está-se a atuar na origem do problema, mas em grandes barragens é uma metodologia muito complicada e de elevados custos económicos. Para pequenos aproveitamentos, o processo de erosão pode ser minimizado através da conservação do solo, um processo que é moroso e cujos resultados são visíveis passadas décadas, para além de ter elevados custos, e ainda através de medidas na bacia hidrográfica que passam por criar bacias de retenção de sedimentos, que têm de ser limpas periodicamente.

Por sua vez, a remoção de sedimentos de um reservatório levanta questões como quais os sedimentos em causa e quais devem ser removidos. Para responder a estas questões deve-se atender à distribuição dos sedimentos na albufeira, assunto já abordado em 2.2. Como o delta sedimentar se desenvolve na zona montante da albufeira, o volume de armazenamento vai sendo sucessivamente reduzido para jusante, sendo que simultaneamente os sedimentos mais finos preenchem a zona mais profunda da albufeira e, como tal, ocupam parte do volume morto desta. Se a extremidade inferior do delta criado atingir o descarregador de fundo da barragem, ou se a camada de sedimentos finos depositados se elevar acima da cota desse descarregador, a correspondente saída da barragem é reduzida, até acabar por ficar obstruída, perdendo as suas funções. A remoção de sedimentos acumulados em albufeira, para além de ter como objetivo recuperar parte do volume de armazenamento que está a ser perdido para a sedimentação, deve ser conduzida no sentido de proteger todas as infraestruturas necessárias ao funcionamento da barragem, como o descarregador de fundo e a tomada de água, assegurando a segurança do aproveitamento (ver efeitos na segurança do projeto em 2.3.3).

Um plano de gestão de sedimentos numa albufeira e na bacia hidrográfica em que esta se insere comporta, idealmente, uma combinação de várias destas medidas, de modo a aumentar a eficiência das mesmas. Na seleção das melhores medidas para cada caso a estudar deve-se ter em consideração os caudais afluentes líquido e sólido, a capacidade de armazenamento da albufeira, os objetivos de exploração da barragem e da albufeira, e as condições do local. Deve atentar-se que algumas, senão

todas, as medidas têm efeitos relevantes nos ecossistemas e que dependem da magnitude das perturbações e das espécies afetadas. A título de exemplo, uma dragagem pode aumentar a turbidez da coluna de água na albufeira e a jusante, ao passo que uma descarga de caudais pode resultar no aumento da deposição de sedimentos a jusante, e o controlo da erosão numa zona pode resultar na erosão mais acentuada noutra.

Segundo Meile *et al.* (2014), as medidas de gestão dos sedimentos em albufeira podem ser organizadas de acordo com a zona intervencionada da seguinte forma:

- Na área de drenagem: proteção do solo, de encostas e bancos de sedimentos, bacias de desassoreamento e de cascalho, estrutura de *bypass*, e reservatório de armazenamento *offstream*;
- Na albufeira: volume morto, dragagem, hidrosução, escavação a seco, descarga com esvaziamento total, e bacia de armazenamento interna à própria albufeira;
- Junto à barragem: descarga de sedimentos (*sluicing*), passagem das correntes de turbidez, turbinamento de sedimentos suspensos, alteamento do coroamento da barragem, e alteração da localização do descarregador de fundo e tomada de água;
- A jusante: reservatório de sedimentação, diluição (ver 4.3), monitorização, e controlo do biótopo.

Os métodos de conservação do solo para minimizar a entrada de sedimentos numa albufeira abarcam medidas estruturais e não estruturais. As medidas estruturais incluem a construção de *checkdams* que são pequenas barragens que dissipam a energia, o revestimento das margens do rio e a realização de estruturas para estabilizar o leito. Já as medidas não estruturais incluem a preservação dos solos na bacia hidrográfica, a utilização de métodos de cultivo adequados à redução da erosão, a reflorestação, entre outros. A título de exemplo, uma das medidas de conservação, que pode ser aplicada a montante, mas também a jusante da barragem, é denominada por *warping*, com um já extenso historial na China, que consiste em desviar a água turva do rio durante uma cheia para terras agrícolas de forma a que os sedimentos suspensos cubram os solos que são pouco férteis (Yang, 1996).

Outra medida passa por fazer uma bacia de desassoreamento (Fig. 9), tendo esta como principal função reduzir os sedimentos finos que chegam às turbinas do aproveitamento hidroelétrico e que causam abrasão, uma vez que os sedimentos grosseiros ficam depositados na albufeira. As bacias são projetadas para reter tamanhos específicos de partículas, como por exemplo, na Índia, superiores a 0,2 mm, e que são depois descarregadas através de túneis no fundo da bacia. Tipicamente com este método conseguem-se remover cerca de 90% das partículas com dimensões superiores a 0,2 mm, limitando-se a velocidade na bacia a cerca de 0,3 m/s. Tem como desvantagem ser um método dispendioso e que pode inclusive ser desproporcionado ao custo da barragem e circuito hidráulico, pois a seção transversal da bacia tem de ter uma área suficientemente grande para se garantirem velocidades abaixo de 0,3 m/s, para além de que o dimensionamento é realizado para um dado valor de caudal líquido e caudal de sólido, pelo que alterações a esses valores podem causar uma maior deposição na bacia a ponto de ultrapassar a sua capacidade. Apesar de ser um método já aplicado em vários aproveitamentos hidroelétricos, nem sempre tal teve sucesso, tendo ocorrido danos nas turbinas em alguns casos. Isto porque cerca de 70% dos sedimentos, com dimensões de 0,075 a 0,2 mm, passam pelas turbinas, o que é especialmente problemático quando se trata de partículas de quartzo (Khatsuria, 2012).

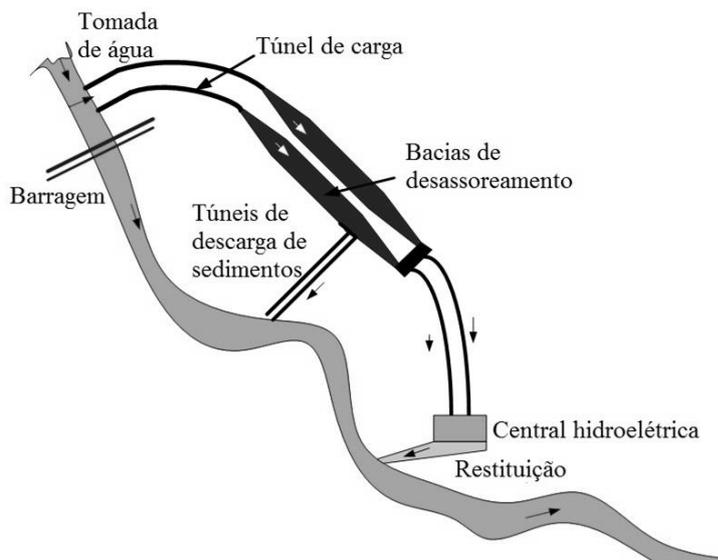


Fig. 9 – Esquema de um aproveitamento hidroelétrico com bacias de desassoreamento (adaptado de Khatsuria, 2012)

Por outro lado, pode-se recorrer a uma bacia de armazenamento de cascalho a montante da albufeira, sendo que esta bacia deve ser limpa anualmente ou depois de cada cheia. Tem como desvantagem o facto de que a retenção dos sedimentos a montante pode levar a um défice a jusante da bacia o que, eventualmente, pode resultar numa degradação do leito do rio que, por sua vez, diminui o efeito que se pretende com a retenção dos sedimentos a montante. Deste modo, a bacia de retenção só é eficaz se a zona a jusante apresentar resistência à erosão, se se tomarem medidas para reduzir a erosão, ou se a bacia for realizada imediatamente a montante da albufeira.

Uma medida com algumas semelhanças, mas que já é na zona da albufeira, consiste em construir uma bacia de armazenamento interna, ou seja, uma segunda barragem na zona inicial da albufeira que retém a carga de leito, nomeadamente o cascalho, mas também areia, sendo que a fração de silte é transportada para a albufeira onde pode sedimentar. Geralmente, esta segunda barragem fica abaixo do nível máximo do reservatório e deve ser limpa periodicamente ao remover-se o cascalho e areia ou libertando os sedimentos para uma zona a jusante da barragem. Esta opção pode considerar um sistema de *bypass* de sedimentos que é usado apenas durante cheias quando a velocidade da corrente é tal que permita evitar entupimentos do sistema (Hager, 1998).

Uma forma de tentar manter a continuidade do transporte sedimentar passa precisamente pela implementação de tuneis de *bypass* de sedimentos (de sigla inglesa SBT) que podem ser usados em albufeiras pequenas, particularmente em regiões montanhosas e durante eventos de cheia, e ligam a zona de montante à zona a jusante da barragem. Um sistema de túnel de *bypass* de sedimentos consiste em várias estruturas: retenção de cascalho e restos de madeira a montante, um açude de desvio, a admissão com grelhas para evitar entrada de material de grande dimensão, uma seção curta e de acentuada inclinação de aceleração, uma seção levemente inclinada e uma estrutura de saída. Um exemplo de aplicação deste sistema no Japão consta na Fig. 10.

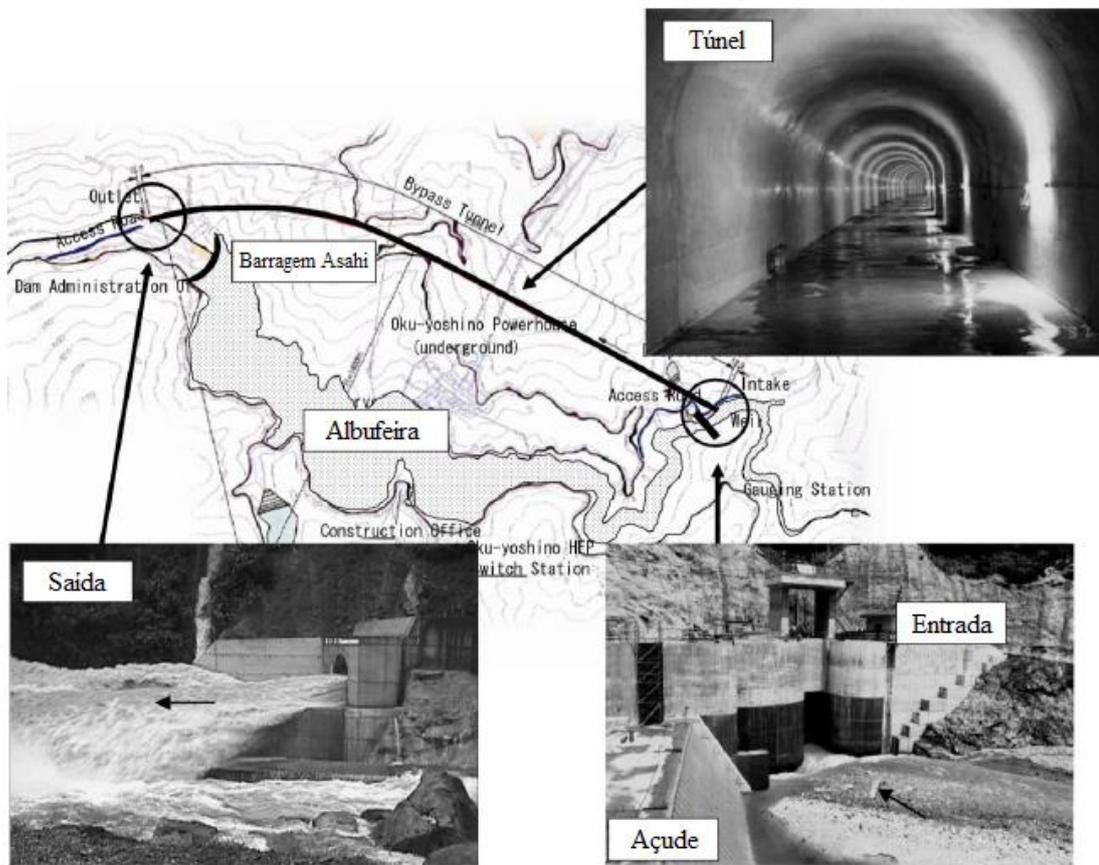


Fig. 10 – Vista em planta e fotografias do sistema de bypass de Asahi no Japão (adaptado de Nakajima *et al.*, 2015)

Esta medida de alteração do transporte sedimentar tem várias vantagens sobre outras medidas, nomeadamente tem efeitos positivos no que toca a aspetos ecológicos, uma vez que a transmissão de sedimentos pode desacelerar a erosão do leito do rio e aumentar a variabilidade morfológica a jusante da barragem. Para além de que tem provado ser eficaz na redução da sedimentação em albufeiras, sendo que, tipicamente, a deposição da carga de leito pode ser totalmente resolvida com SBT, enquanto a minimização da sedimentação de carga de sedimentos suspensos depende da recorrência das operações de descarga no túnel.

Em contrapartida, a principal desvantagem dos SBT é devido aos elevados custos da sua aplicação, uma vez que implica um elevado investimento inicial, mas também manutenção contínua devido às elevadas velocidades e taxas de transporte sedimentar, o que causa abrasão nos equipamentos. Assim, esta medida deve ser considerada para albufeiras de pequena a média dimensão com uma razão entre a capacidade total do reservatório e a volume afluente anual entre 0,003 e 0,2, de acordo com os SBT implementados na Suíça e no Japão. Para as albufeiras desta dimensão, a carga sedimentar transportada ao longo do fundo da albufeira e a formação do delta são problemas mais críticos do que a sedimentação dos finos, uma vez que estes últimos se mantêm em suspensão devido ao curto período de tempo de retenção na albufeira e, desta forma, não ocorre uma interrupção do seu transporte na barragem. Refere-se ainda que para pequenas albufeiras os custos são menores pois a extensão dos SBT é menor também.

Existem casos de sucesso de SBT no Japão e na Suíça, no entanto, devido às elevadas velocidades da corrente e taxas de transporte de sedimentos, o desgaste dos equipamentos é frequente sendo necessária

manutenção contínua, o que implica elevados custos anuais. Para combater esta questão, pode-se recorrer a betões de elevado desempenho e/ou otimizar as condições hidráulicas para proteção aquando da fase de projeto deste sistema (Boes *et al.*, 2014).

Outra medida de minimização consiste em realizar a descarga de sedimentos (*sluicing*), que corresponde a uma descarga de caudais elevados durante os períodos de grandes aflúências, com o objetivo de aumentar a velocidade de transporte dos sedimentos, não permitindo desta forma a sua deposição. Quando tal é feito através de um descarregador localizado acima da tomada de água possibilita que não tenha de cessar a produção hidroelétrica, desde que não se baixe o nível de água abaixo do nível mínimo de exploração. Geralmente quando obriga ao cessar da referida produção é porque se recorre ao descarregador de fundo, que permite também que seja feita uma libertação dos sedimentos já acumulados, como se irá ver mais adiante. A eficácia desta medida está dependente da localização e capacidade do descarregador, da aflúência, e da configuração da albufeira.

Outra opção a tomar para minimizar a acumulação de sedimentos na albufeira é a passagem de correntes de turbidez pela barragem. Estas correntes, com sedimentos suspensos, são criadas pela diferença de densidade entre a mistura de água e sedimentos afluente com a água retida na albufeira (ver 2.2), movimentando-se em direção ao fundo da albufeira e na direção da barragem. Para que as correntes de turbidez existam é necessário um fornecimento contínuo de sedimentos em suspensão e energia suficiente para transpor obstáculos, pelo que nem sempre estas ocorrem. Quando as características do rio e da albufeira conduzem à formação destas correntes, pode-se aproveitar as mesmas para remover sedimentos na albufeira através dos descarregadores de fundo, por exemplo. Para tal, torna-se necessário coordenar a abertura do descarregador, com recurso a sondas que medem a velocidade, turvação, condutividade e temperatura da água em vários pontos localizados no sentido da saída da corrente, para que quando a corrente atinge a barragem esta possa passar para jusante, evitando-se assim a acumulação destes sedimentos na albufeira. Esta medida já foi aplicada com sucesso em algumas albufeiras como a de *Lost Creek* em Oregon nos EUA, em *Sanmenxia* na China e em *Sefid-Rud* no Irão (Schneider *et al.*, 2007).

De modo geral, estas medidas devem ser tomadas o mais cedo possível para maximizar a sua eficiência e deve ser estudada a sua possível implementação na fase de planeamento e projeto da barragem e albufeira. Infelizmente, apesar do conhecimento destas medidas mitigadoras dos efeitos de sedimentação, as mesmas foram frequentemente ignoradas no passado e são atualmente ainda desconsideradas ou adiadas, limitando deste modo as medidas mitigadoras disponíveis quando se tem já a barragem em funcionamento.

No que toca a medidas de remoção de sedimentos, destaca-se o papel das descargas de fundo. O descarregador de fundo da barragem pode ser usado (anualmente por norma) para limpar o material que está depositado imediatamente a montante com uma descarga em pressão de um determinado volume de água, o que leva à formação de um cone de depressão dos sedimentos com declive de 1:1 nesta zona. Assim, os efeitos deste tipo de descargas de fundo são reduzidos uma vez que a área abrangida é, em geral, muito reduzida. Por outro lado, como referido anteriormente, como o descarregador de fundo não está permanentemente em operação, existe o risco deste órgão colmatar com o avanço dos sedimentos depositados a montante, devido a deslizamentos, ou ainda ocasionalmente, devido a material de maiores dimensões como troncos de árvores.

Se acionar a descarga de fundo como referido acima afeta apenas, em geral, uma diminuta zona da albufeira, uma limpeza que resulte do esvaziamento total do reservatório pode ser comparada com um processo de erosão extrema de um rio sob um leito arenoso ou siltoso. A erosão começa junto ao cone de depressão formado na zona próxima do descarregador de fundo e desenvolve-se para montante ao

longo do talvegue do rio. Assim, este processo é mais eficiente para remoção dos sedimentos do que uma descarga de fundo sem esvaziamento completo, mas implica que o aproveitamento hidráulico fique fora de funcionamento durante este período, para além de se perder uma grande quantidade de água. Terá de haver o cuidado em certificar-se que a capacidade de transporte do rio a jusante da barragem será suficiente e adequada a minimizar as acumulações de sedimentos após a barragem, sendo que este processo deve ser sempre criteriosamente estudado do ponto de vista ambiental para se manter um equilíbrio ecológico, atendendo-se à fauna e flora aquática que vivem na albufeira. Um exemplo de uma barragem onde se recorre ao esvaziamento periódico da albufeira é apresentado em 4.3.

Em alternativa, a dragagem dos sedimentos é também uma opção a considerar para remoção de sedimentos, existindo algumas variantes deste método que foram pensadas para situações particulares, como por exemplo a dragagem por sifão. A dragagem pode ser feita nas margens ou usando um barco, dependendo da profundidade do local, da qualidade e transporte dos sedimentos. Quando a coesão dos sedimentos depositados é elevada não podem ser usados dispositivos de sucção, sendo necessário desagregar primeiro o material para uma mais fácil dragagem. Refere-se ainda que o material removido pode ser usado como agregado para, por exemplo, fabrico de betão; se, para tal, esse material tiver demasiada matéria orgânica ou a granulometria não for a indicada é geralmente empilhado perto do local de remoção, devendo depois ser encaminhado para tratamento ou disposição (Hager, 1998).

Finalmente, a escavação a seco permite remover os sedimentos acumulados na albufeira com recurso a maquinaria pesada e adicionalmente possibilita ainda alterações ao leito do rio. Embora seja uma medida que permite remover eficazmente a totalidade dos sedimentos acumulados e de todas as granulometrias, tem como grande desvantagem a necessidade de a albufeira ser esvaziada para se realizarem as operações de remoção de sedimentos ao longo de um período considerável de tempo e, como tal, implica elevados custos por se parar a exploração do aproveitamento hidráulico. Assim, é uma opção de último recurso, que só deverá ser utilizada em situações muito particulares.

Refira-se que todas as medidas que conduzem a uma extração dos sedimentos, implicam que estes sejam tratados posteriormente, pois como se tem vindo a abordar ao longo deste trabalho, os sedimentos podem ter adsorvidas e absorvidas substâncias orgânicas e inorgânicas poluentes, como hidrocarbonetos e metais pesados. O tratamento depende do fim que os sedimentos terão, mas pode passar por uma peneiração para obtenção de determinadas granulometrias e por diferentes processos de descontaminação.

4.3. CASO DA BARRAGEM DE GEBIDUM NA SUÍÇA

Para se perceber melhor a aplicação de algumas destas medidas analisa-se seguidamente o caso da albufeira de Gebidum de 1967, na Suíça, onde se recorre a descargas de fundo anuais, esvaziando-se a albufeira, como medida de redução de sedimentos acumulados. Este processo é cuidadosamente planeado de forma a evitar danos materiais e ecológicos na zona a jusante da albufeira. Como medida adicional, existe ainda uma bacia de retenção com uma parede de betão de cerca de 30 m de altura a montante do canal de descarga (Fig. 11), com uma capacidade de retenção de 30.000 m³ de sedimentos.

A legislação suíça sobre a gestão de albufeiras tem dois objetivos: a proteção da barragem e a proteção da água e dos peixes. Para além disto, a Lei da Água suíça pretende evitar consequências para a saúde pública, fauna e flora, sendo que, como tal, quem explora a barragem deve assegurar que as descargas de caudais e/ou o esvaziamento da albufeira não trazem efeitos adversos para a fauna e flora no rio a jusante. Assim, as descargas periódicas requerem uma autorização para a sua realização num

Sem a abertura das descargas de fundo, o volume total da albufeira de Gebidum (9,2 hm³) seria completamente preenchido entre 20 a 25 anos, sendo que com a não realização de descargas durante 6 ou 7 anos, o nível da tomada de água pode ser atingido pelos sedimentos, o que coloca em causa o funcionamento da central hidroelétrica, para além de que o funcionamento do descarregador de fundo estaria também em risco.

A operação de descarga é complexa por vários motivos, nomeadamente devido à elevada quantidade de sedimentos, à ocorrência de poucos dias ou semanas entre maio e junho com condições adequadas no rio Massa e no Ródano para as descargas (altura antes dos grandes caudais que se verificam devido ao degelo que ocorre na segunda metade de junho e que ajudam a limpar sedimentos remanescentes da descarga e a restaurar o leito do rio), aos desafios decorrentes da configuração do perfil longitudinal com uma redução do declive entre a seção do rio Massa a jusante da barragem e o canal de descarga, às limitações ecológicas e económicas devido à carga de sedimentos a descarregar autorizada, e ainda devido ao volume de água que pode ser perdido e que, como tal, não será usado para produção de energia elétrica ou para processos de arrefecimento na indústria a jusante no rio Ródano.

Os sedimentos mais finos estão localizados junto à barragem enquanto os sedimentos mais grosseiros acumulam-se no delta que se desenvolve a montante durante o verão. Quando se abre o descarregador de fundo para limpeza da albufeira, os sedimentos mais finos acumulados no leito são os primeiros a ser descarregados levando a um aumento súbito na concentração de sedimentos em suspensão a jusante. O esvaziamento total da albufeira resulta ainda num acentuar do fundo do canal com erosão lateral e deslizamentos de material depositado nas encostas, sendo que desta forma o material grosseiro também é transportado para jusante. Assim, o material grosseiro transportado ao longo do fundo do leito e os sedimentos mais finos em suspensão passam a barragem de Gebidum simultaneamente.

Entre o descarregador de fundo e a entrada do canal de descarga (Fig. 11), o transporte dos sedimentos grosseiros anteriormente acumulados no fundo da albufeira demora de 60 a 72 horas para percorrer a seção a jusante da barragem, enquanto os sedimentos suspensos acompanham a velocidade da água. Durante um período de dois ou três dias verifica-se então um elevado caudal sólido nesta zona, sendo que depois disso começa a ocorrer a deposição deste material devido à perda de capacidade de transporte. O material mais fino começa por sedimentar de jusante para montante, assim como nas zonas de curva do rio, nas contrações do leito e na confluência com o rio Ródano.

Na confluência do rio Massa com o rio Ródano, ocorre a mistura do caudal saturado ao longo de várias centenas de metros, levando a uma redução gradual da concentração de sedimentos suspensos originários da albufeira. O transporte dos sedimentos grosseiros na confluência, provenientes dos depósitos do fundo da albufeira, depende do caudal total de ambos os rios, mas verifica-se geralmente um aumento do nível do leito do rio Ródano na zona imediatamente a jusante da confluência, que é posteriormente naturalmente repostado durante o verão.

Durante o processo de esvaziamento e lavagem da albufeira, segundo as *guidelines* cantonais, a concentração máxima de sedimentos tem de cumprir o limite de 10 mL/L, ou seja, para 40 milhões de m³ de água são evacuados 400 000 m³ de sedimentos. Este volume de água corresponde a 10 a 16% da contribuição anual. As concentrações de sedimentos que se verificam durante este processo acabam por ser superiores em 4 a 6 vezes o valor requerido, mas apesar disto o processo é permitido devido ao canyon rochoso e ao canal de betão a jusante da barragem não permitirem a existência de habitats naturais.

Desde a origem destas operações de descarga que se têm estudado melhorias ao processo através de modelação física e numérica, que levaram, por exemplo, à deteção, em 2002, da necessidade de haver

uma fonte adicional de água durante as descargas de modo a aumentar a capacidade de transporte e que reduz a quantidade de água descarregada da albufeira. Este caudal de diluição deveria ser introduzido na parte final da seção a jusante da barragem, assim que a camada de sedimentos atingisse 1,5 m de espessura na seção de controlo localizada a 200 m da entrada do canal de descarga (localização com maior espessura de sedimentos), e tendo de ser aumentado progressivamente de modo a evitar a acumulação de sedimentos numa primeira fase, e sendo gradualmente reduzido assim que a concentração de sedimentos começa a diminuir. Assim, e de acordo com os estudos prévios que propuseram esta solução, foi executado um projeto para construir um túnel para essa fonte adicional de água, com origem num outro aproveitamento hidroelétrico (Massaboden), do qual resulta um caudal até 15 m³/s, e que tem um período de amortização do investimento de 10 anos já que reduz os custos para cada operação de limpeza da albufeira. O túnel foi construído entre 2005 e 2006 por *drill-and-blast*. A primeira experiência com este novo sistema foi realizada com sucesso em 2007.

Apesar do sucesso da introdução deste novo túnel de diluição e dos seus efeitos, ainda restam alguns riscos associados à incerteza das previsões meteorológicas, mudanças repentinas de temperatura e precipitação na região, operação e estado das infraestruturas da bacia de sedimentos, deslizamentos, erosão e transporte de sedimentos, entre outros. O maior desafio identificado para as próximas décadas passa por encontrar uma forma de realizar as descargas num período que seja seguro e sustentável, isto quando se está a verificar uma tendência para a redução do caudal do Ródano devido ao facto de que a cobertura glacial inferior está a desaparecer e, simultaneamente, ao aumento das aflúncias do rio Massa previstas até 2050 por causa do degelo da cobertura glacial superior (Meile *et al.*, 2014).

Como referido previamente, o caso da albufeira de Gebidum é escolhido como exemplo no presente trabalho para demonstrar um caso de sucesso de aplicação conjunta de várias medidas de redução da sedimentação numa albufeira. No entanto, embora em Portugal o estado de sedimentação em albufeiras não seja conhecido com o detalhe necessário, não foi identificado nenhum caso tão extremo de sedimentação como o de Gebidum e, para além disso, o escoamento ao longo do ano é muito distinto pois os meses com mais intensidade de precipitação são geralmente no inverno e não existem glaciares. Apesar do caso referido ser bastante particular, foi bastante estudado (e continua a ser) e, assim sendo, poderá ser útil na potencial criação de um plano de gestão de sedimentos para as albufeiras portuguesas.

4.4. APLICAÇÃO EM PORTUGAL

Segundo Lameiro & Taveira-Pinto (2009), um esquema nacional de aproveitamento dos sedimentos seria uma mais valia para a economia de Portugal, uma vez que estes não só têm efeitos ao nível da redução do volume de armazenamento de água nas albufeiras como a sua retenção nas albufeiras é apresentada como sendo um dos fatores que contribui para o agravamento da erosão costeira, sendo que esta última questão é problemática no país.

Apesar desta necessidade, em Portugal, não existe um plano de gestão de sedimentos para as albufeiras, sendo que é necessário primeiramente avaliar o estado de sedimentação das albufeiras antes de se delinear um plano de intervenção para reduzir os seus efeitos. Algumas medidas de minimização, tais como a conservação do solo podem ser aplicadas e pode-se recorrer a algumas medidas de redução em casos problemáticos que estejam a colocar em causa a segurança de infraestruturas. Os casos intervencionados até à data resultaram precisamente de problemas detetados com o descarregador de fundo, por exemplo, devido a assoreamentos (ver 5.2.3.4).

Em termos genéricos e resultando apenas do levantamento do estado de arte das medidas de proteção e operacionais, é previsível que em Portugal se possam adotar medidas como a construção de bacias de

armazenamento a montante em zonas de mais intensa produção de sedimentos, bacias de armazenamento interno e a abertura anual dos descarregadores de fundo, estando esta última prevista para a barragem de Foz Tua (ver 2.5). A passagem de correntes de turbidez teria de ser estudada para cada albufeira para ser possível avaliar se seria aplicável. À partida a implementação de SBT seria complicada e muito dispendiosa devido a muitas barragens serem em cascata, o que por si já implica que, necessariamente, tenha de haver uma coordenação da gestão de sedimentos entre as várias albufeiras na mesma bacia hidrográfica, de modo a que a minimização de efeitos numa albufeira não agrave a situação de outra. Por sua vez, medidas como dragagens e sobretudo esvaziamentos totais da albufeira por descarga ou para escavação a seco devem ser evitados a não ser em último recurso, pois apresentam desvantagens a nível económico, mas também ecológico.

Em determinadas barragens como a de Venda Nova, caso que será aprofundado no capítulo seguinte, algumas destas medidas, nomeadamente as que implicam remover sedimentos já acumulados têm de ser muito bem estudadas pois os sedimentos no fundo da albufeira estão contaminados com metais pesados e os efeitos negativos poderão sobrepor-se aos positivos ao realizar-se uma dragagem, por exemplo. Refere-se que no aproveitamento hidroelétrico resultante do reforço de potência de Venda Nova III, foi recentemente construída uma variante de uma bacia de desassoreamento (ver 4.2) mas sem túneis de descarga de sedimentos, sendo que, caso ocorra uma eventual colmatagem da bacia, o circuito hidráulico terá de ser esvaziado para remover o material acumulado.

Concluindo, como muitas barragens foram construídas e têm sido geridas sem se prever a aplicação destas medidas, a eventual implementação de um plano de gestão de sedimentos será previsivelmente lenta e irá apresentar vários desafios que terão de ser solucionados com recurso a uma combinação de diferentes medidas e de acordo com análises de custo-benefício.

5

CASO DE ESTUDO: ALBUFEIRA DE VENDA NOVA

5.1. INTRODUÇÃO

Como referido em 3.1, neste capítulo pretende-se aplicar parcialmente a metodologia de monitorização da sedimentação em albufeiras proposta na presente dissertação ao caso da albufeira da barragem de Venda Nova. Selecionou a referida albufeira para o presente trabalho uma vez que já foram realizados alguns trabalhos relacionados com a quantificação da acumulação de sedimentos na albufeira que foram necessários, em grande medida, devido a um assoreamento que se deu na zona do descarregador de fundo na década de 1980 e que resultou numa intervenção. Para além disso, em alguns estudos foram realizadas recolhas pontuais de sedimentos acumulados no fundo da albufeira para análise da granulometria e da concentração em metais. Tudo isto permite ter uma base para o trabalho a desenvolver e também que se possam tecer algumas comparações com os dados existentes.

Assim, começa-se por fazer um enquadramento apresentando informações relevantes para o estudo da sedimentação na albufeira de Venda Nova e ainda os estudos que já foram realizados para a mesma nesse sentido. Segue-se a descrição da metodologia de trabalho adotada em que, numa primeira fase, procedeu-se à recolha e organização de dados para quantificação da acumulação de sedimentos e posteriormente estabeleceu-se um plano de trabalhos a aplicar no decorrer da presente dissertação no sentido de avaliar em vários pontos da albufeira a atual qualidade dos sedimentos e, simultaneamente, analisar comparativamente a qualidade da água. Apresentam-se os resultados obtidos, procurando-se fazer a sua interpretação, detetar dificuldades para este tipo de estudos e estabelecer que trabalho futuro pode ser desenvolvido para esta albufeira.

5.2. ENQUADRAMENTO

5.2.1. LOCALIZAÇÃO

A albufeira de Venda Nova insere-se na sub-bacia hidrográfica do rio Cávado (Fig. 13), tendo esta bacia uma área de 1593 km². Venda Nova é a albufeira de alimentação (Fig. 14) do aproveitamento hidroelétrico com o mesmo nome e é localizada no rio Rabagão (afluente do rio Cávado), no concelho de Montalegre (Vila Real), cujo principal afluente é a ribeira de Amiar, também vulgarmente denominada por rio Borralha. A albufeira tem uma área inundada ao Nível de Pleno Armazenamento (NPA) de 400 hectares e apresenta uma capacidade total de 94,5 hm³ e útil de 93 hm³, sendo o NPA

700,00 m, o Nível Mínimo de Exploração (Nme) 645 m e o Nível Máximo de Cheia (NMC) de 700,50 m. Todas as cotas que constam no presente capítulo são de acordo com o sistema da extinta Direção Geral de Hidráulica, pelo que se deve subtrair 9,215 m para passar ao sistema do antigo Instituto Português de Cartografia e Cadastro (IPCC) que é agora denominado por Instituto Geográfico Português. Refira-se que esta albufeira não tem um Plano de Ordenamento de Albufeira.

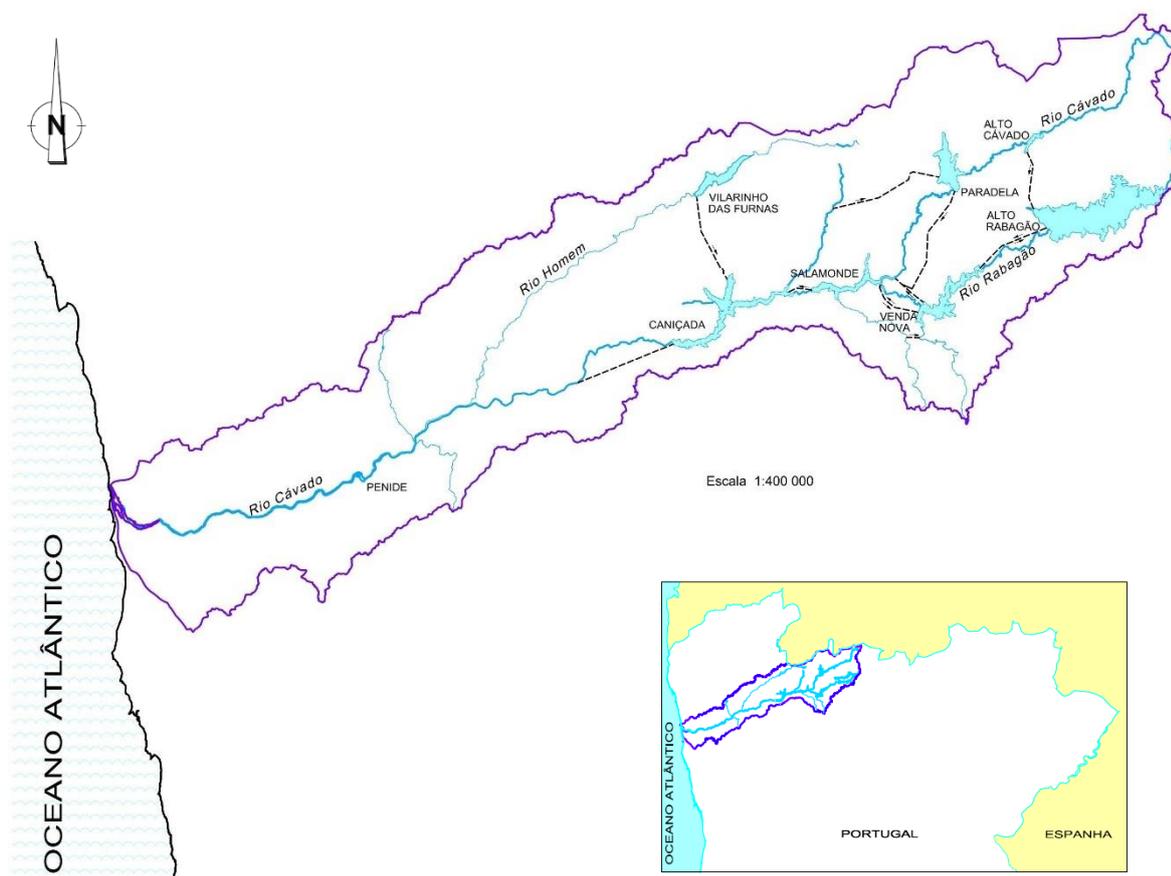


Fig. 13 – Bacia Hidrográfica do rio Cávado (Plano de Emergência Interno, 2014)



Fig. 14 – Carta Cartográfica (1:50000) da albufeira de Venda Nova (DGT)

Em termos de zonas protegidas, a albufeira não está incluída na Rede Natura 2000, na Rede Nacional de Áreas Protegidas, e não é uma zona vulnerável, sensível ou uma área de influência de zona sensível. No entanto, é uma zona protegida para abastecimento público e águas piscícolas, não sendo protegida para fins balneares. Apesar disto, existem zonas de praia fluvial não classificadas, uma marina de apoio, dois pequenos ancoradouros, uma zona de lazer e uma escola na proximidade.

No que toca à zona a montante da albufeira de Venda Nova, entre esta albufeira e albufeira do Alto Rabagão, o troço do rio Rabagão tem uma extensão de 9,4 km com uma área de drenagem de 39 km². A única proteção que abrange esta zona é a de águas piscícolas.

A ribeira de Amiar, que aflui na albufeira de Venda Nova, tem uma extensão de 13,3 km e uma área de drenagem de 52 km². Não é abrangida por nenhum tipo de classificação de proteção.

A zona a jusante da albufeira de Venda Nova, ou seja, o troço do rio Rabagão entre a albufeira de Venda Nova e a albufeira da Salomonde, tem uma extensão de 5,1 km com uma área de drenagem de 8 km². Ao contrário da albufeira e da zona a montante desta, a zona a jusante da albufeira está incluída na Rede Nacional de Áreas Protegidas, para além de ser protegida em termos piscícolas. A margem direita deste troço pertence ao Parque Nacional de Peneda-Gerês (PNPG) e Sítio PTCON0001 (Peneda-Gerês), salientando-se a proximidade à Zona de Proteção Especial PTZPE0002 (Serra do Gerês) e a uma zona importante para as aves IBA PT002 (Serras da Peneda e Gerês).

No que toca à paisagem, a área em estudo é caracterizada por elevações com cumes arredondados, com algumas encostas acidentadas e algumas zonas de planalto. É uma região essencialmente rural, que apresenta baixos índices de desenvolvimento económico, baixas densidades populacionais, e na qual se tem verificado um decréscimo da população, que é envelhecida.

5.2.2. APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO DE VENDA NOVA

O aproveitamento Hidroelétrico de Venda Nova integra o Sistema Hidroelétrico do Cávado-Rabagão-Homem da EDP, tal como se pode observar na Fig. 15. Este sistema é constituído pelos aproveitamentos do Alto Rabagão (que recebe também aflúências da Barragem do Alto Cávado) e Venda Nova (Vila Nova, Frades e Venda Nova III) no rio Rabagão (afluente do Cávado), Vilarinho das Furnas (Gerês) no rio Homem (afluente do Cávado) e Paradela (Vila Nova), Salamonde (I e II), Caniçada e Penide no rio Cávado, abrangendo os concelhos de Montalegre, Vieira do Minho e Terras de Bouro. Encontra-se em fase de anteprojecto o reforço de potência de Paradela II, estando-se a concluir a fase de construção dos reforços de potência de Salamonde II e Venda Nova III que ainda não constam na Fig. 15.

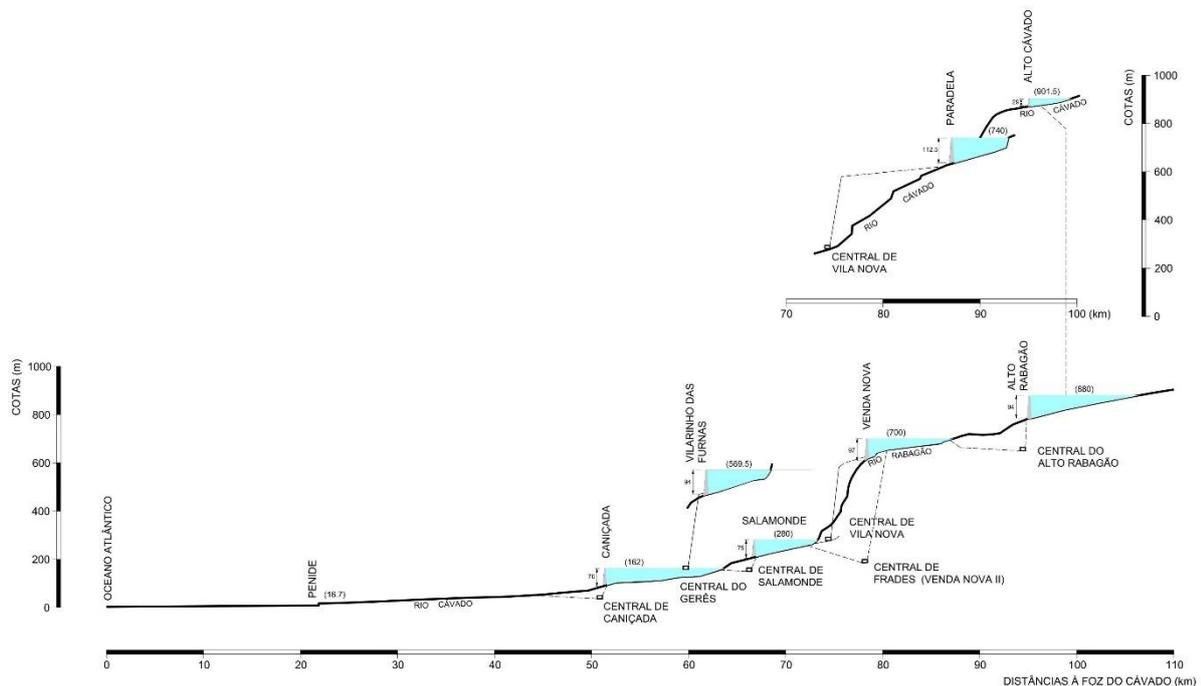


Fig. 15 – Sistema Cávado-Rabagão-Homem (Plano de Emergência Interno, 2014)

O escalão de Venda Nova, com entrada em funcionamento em 1951, foi o primeiro de grande dimensão a ser construído na bacia do Cávado, sendo constituído pela barragem, órgãos de segurança, circuito hidráulico e central a céu aberto. Atualmente fazem parte deste escalão duas centrais hidroelétricas, nomeadamente Venda Nova/Vila Nova, que é alimentada por turbinagem pela albufeira de Venda Nova, e Venda Nova II/Frades, que é equipada com grupos reversíveis sendo alimentada pela albufeira de Venda Nova em turbinagem e pela albufeira de Salamonde em bombagem. Está a ser concluída uma terceira central denominada por Venda Nova III também com grupos reversíveis.

A barragem de Venda Nova (Fig. 16), projetada pelo Eng. André Coyne, é uma barragem em arco de betão com desenvolvimento do coroamento ao longo de 230 m, com uma cota de 701,00 m e uma fundação em granito à cota 604 m, pelo que apresenta 97 m de altura. Apresenta uma descarga de fundo à cota 612 m que tem um diâmetro de 2,60 m (com uma contração na zona de entrada de diâmetro mínimo 2,00 m) e 34,02 m de comprimento, provida de uma grade protetora no paramento de montante, desde o fundo (609,50 m) até à cota 621,50 m, e com um raio de 7,90 m, e uma saída no paramento de jusante com uma válvula dispersora. O caudal máximo da descarga de fundo é de 135 m³/s e a dissipação

de energia é efetuada por dispersão por jato oco com direção ascendente. Enumera-se alguns momentos de abertura da descarga de fundo na Tabela 7, tendo sido essa informação disponibilizada pelo Engenheiro Ilídio Ferreira da Segurança de Estruturas da Direção de Produção Hidráulica da EDP Produção.

Tabela 7 – Historial das aberturas da descarga de fundo de Venda Nova

Período	Motivo
1984 (estiagem)	Funcionamento durante algumas horas depois de ter sido removido parte do assoreamento que impedia abertura da comporta de montante.
6 de fevereiro de 2002	Teste de verificação da operacionalidade com abertura da válvula de serviço durante alguns minutos.
31 de março de 2008	Teste de verificação da operacionalidade com abertura em 75% da válvula de serviço durante alguns minutos, com a presença da APA.
5 de fevereiro de 2014	Teste de verificação da operacionalidade com abertura de 50% da válvula de serviço durante alguns minutos, com a presença da APA.

A albufeira de Venda Nova já foi esvaziada totalmente (considerando-se como tal o abaixamento abaixo da cota 612 m, correspondente ao descarregador de fundo) em 1984, sendo que este abaixamento foi levado a cabo devido a dificuldades de funcionamento dos órgãos de descarga e que resultaram do intenso assoreamento da albufeira na zona da ribeira de Amiar e imediatamente a montante da barragem. Tal como se pode constatar por análise do Anexo II, no qual consta uma representação gráfica da variação do nível da albufeira de Venda Nova desde que foi construída a barragem até à data da presente dissertação, ocorreram abaixamentos parciais em 1964 (cota < 648 m) que foi o ano de entrada em funcionamento do aproveitamento do Alto Rabagão, em 1975 e 1977 (cota < 648 m), em 1990, 2001, 2002, 2011 e 2014 (cota < 672 m), destacando-se a necessidade em proceder a abaixamentos nos períodos de 2001 a 2004 e 2011 a 2015 para a realização das obras correspondentes aos reforços de potência realizados. No decorrer de maio a junho de 1975 procedeu-se ao esvaziamento parcial da albufeira para efetuar reparações nas juntas das comportas (com cota mínima a 11 de junho) e em 1990 o abaixamento foi para um tratamento das fundações da barragem. Importa referir que previamente a 1990 ocorriam grandes variações sazonais no nível da albufeira, especialmente no período prévio à construção da barragem do Alto Rabagão em 1964, em que a estabilização do nível a um valor próximo do NPA resultou de alterações à exploração do aproveitamento.

A barragem possui dois descarregadores de cheia no corpo da barragem, com 63,25 m de desenvolvimento, uma cota da crista da soleira de 692,00 m e duas comportas com uma largura de 11,00 m cada. O caudal máximo descarregado é de 1100 m³/s e a dissipação de energia é por trampolim.

Saliente-se que não existe qualquer dispositivo para passagem para peixes em Venda Nova. Já relativamente à existência de um regime de caudais ecológicos, refere-se que ainda não está a ser aplicado, apesar de já estar a ser construído, prevendo-se que comece a ser cumprido em 2018. Já a barragem do Alto Rabagão tem um regime de caudais ecológicos a ser aplicado desde agosto de 2012 e que, portanto, influência a zona entre a albufeira do Alto Rabagão e a de Venda Nova.

O circuito hidráulico de Venda Nova/Vila Nova tem a sua tomada de água na margem direita da albufeira de Venda Nova (Fig. 16), junto à barragem e encaminha a água para a central hidroelétrica de Vila Nova que fica na margem esquerda do rio Cávado. A central tem três grupos geradores Pelton com um caudal

máximo turbinável de 10,5 m³/s, uma potência total instalada de 90 MW e uma produtividade média anual de 383,9 GWh.

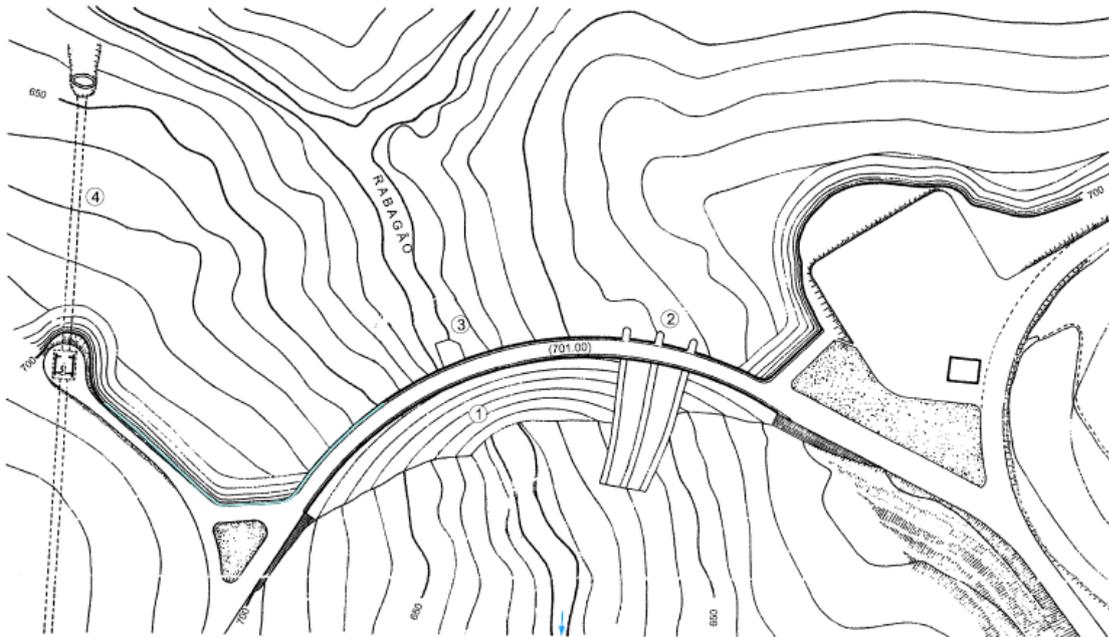


Fig. 16 – Barragem de Venda Nova (Plano de Emergência Interno, 2014)

Legenda: 1 - barragem; 2 - descarregador de cheias; 3 - descarga de fundo; 4 - circuito hidráulico. As cotas estão no sistema HICA, sendo que para passar para o sistema do IPCC deve-se subtrair 9,215 m.

O aproveitamento de Venda Nova II/Frades entrou em funcionamento em 2005 e é constituído por um circuito hidráulico com restituição a montante da ponte dos Lagos (Fig. 17) na albufeira de Salamonde e uma central com dois grupos geradores reversíveis subterrâneos, que estão na encosta da margem esquerda do rio Rabagão, com uma potência total instalada de 191,6 MW. O caudal equipado é de 50 m³/s e a produção média anual é de 220 GWh.



Fig. 17 – Zona de restituição de Venda Nova II e III (março de 2016)

O aproveitamento de Venda Nova III, que está em construção, é constituído por um circuito hidráulico e uma central com dois grupos geradores reversíveis, com uma potência total de 781 MW e capacidade para um caudal de 200 m³/s. A tomada de água, à semelhança de Venda Nova II, é no braço esquerdo da albufeira de Venda Nova, sendo constituída por um bocal com uma grade fixa e uma estrutura destinada ao abrigo e manobra das comportas. A restituição localiza-se na margem esquerda do rio Rabagão, estando na margem oposta à do Parque Nacional da Peneda-Gerês e Sítio PTCO0001, a uma distância de cerca de 110 metros da restituição de Venda Nova II (PROCESL, 2009).

Finalmente, importa mencionar a existência de uma mini-hídrica na albufeira de Venda Nova, o aproveitamento da central da Mesa do Galo, que entrou em funcionamento em 1944, tendo atualmente três grupos geradores com uma potência total instalada de 2,5 MW. Esta central de fio-de-água é equipada com três turbinas Francis que são alimentadas pela ribeira de Amiar, estando a sua exploração a cargo da empresa Caboareal, Madalena e Ilídio Lda.

5.2.3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO E ENVOLVENTE

5.2.3.1. Clima

Genericamente o clima da região em que se insere a zona de estudo é temperado, húmido e muito chuvoso. Para o presente trabalho procurou-se caracterizar as condições climáticas da área em estudo com recurso à estação udométrica de Venda Nova 03J/07, que é uma estação do antigo INAG que entrou em funcionamento em 1940 e que se encontra a 707 m de altitude, e ainda à estação climatológica de Montalegre do Instituto Português do Mar e Atmosfera (IPMA), localizada acima dos 1000 m. Consideram-se apenas dados após 1951 pois foi o ano de entrada em funcionamento da barragem de Venda Nova.

Por análise dos dados da Tabela 8, pode-se constatar que, em média, o mês mais frio é janeiro e o mais quente é julho, sendo nestes meses que se verificam a menor e maior evapotranspiração potencial, respetivamente, como seria de esperar. De destacar que a amplitude térmica verificada em Montalegre indica que possam ocorrer temperaturas entre -11°C e 35°C. Os meses mais húmidos são dezembro, janeiro e fevereiro com 85% de humidade relativa do ar às 9h e, em média, os meses mais ventosos são fevereiro e março.

Tabela 8 – Médias mensais da estação climatológica de Montalegre com base em dados de 1961 a 1990 (IPMA)

Montalegre: média mensal	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set
T Média (°C)	10,9	6,6	4,4	3,8	4,2	5,8	7,3	10,4	14,5	17,6	17,3	15,4
T Máxima (°C)	15,1	10,0	7,5	7,0	7,6	9,8	11,7	15,2	19,9	23,7	23,6	20,8
T Mínima (°C)	6,7	3,2	1,2	0,6	0,9	1,7	2,9	5,5	9,0	11,4	11,0	9,9
Humidade relativa do ar às 9h (%)	79,0	83,0	85,0	85,0	85,0	77,0	73,0	71,0	65,0	60,0	60,0	66,0
Velocidade do vento (km/h)	9,9	11,4	13,0	12,8	13,7	13,9	13,2	12,2	10,3	9,9	9,8	9,2
Evapotranspiração potencial (mm)	48,4	24,3	15,2	13,6	15,2	26,6	36,9	61,4	88,4	109,6	100,2	76,7

Nas Fig. 18 e Fig. 19 consta a variação da precipitação anual entre 1951 e 1991 e a precipitação média mensal para a estação de Venda Nova, respetivamente. De acordo com o ajuste a esses valores da função distribuição probabilidade de Gauss, entre 1951 e 1991 ocorreram 10 anos secos, 8 anos húmidos e 1

ano muito húmido, ao passo que 2006 foi um ano seco, sendo que a precipitação média anual é de 2199,4 mm. Verifica-se ainda que esta zona é bastante chuvosa, com os meses de maior precipitação no período entre novembro e março.

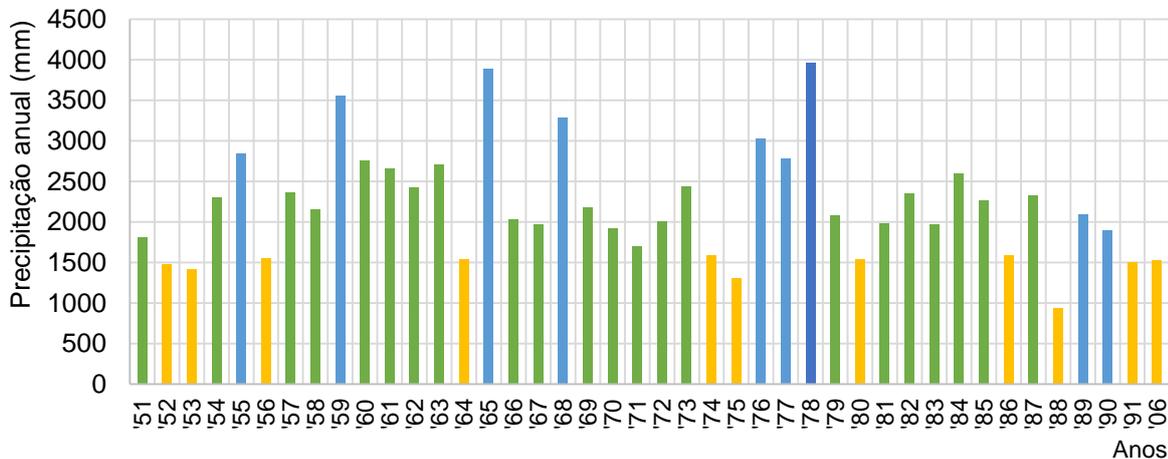


Fig. 18 – Variação da precipitação anual segundo dados da estação Venda Nova 03J/07G (SNIRH)
 Legenda: laranja – ano muito seco; amarelo – ano seco; verde – ano médio; azul claro – ano húmido; azul escuro – ano muito húmido.

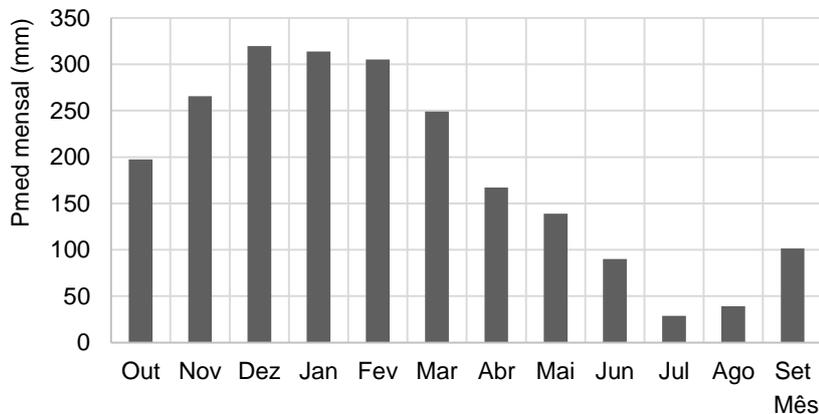


Fig. 19 – Precipitação média mensal segundo dados de 1951 a 1992 da estação Venda Nova 03J/07G (SNIRH)

5.2.3.2. Hidrologia e gestão de recursos hídricos superficiais

Na envolvente da albufeira de Venda Nova existem várias estações pertencentes à rede hidrométrica nacional, mais precisamente, a montante, a estação do Alto Rabagão (EDP) (03J/03A), e, a jusante as estações de Venda Nova (EDP) (03J/04A) e de Venda Nova Frades (EDP) (03J/05A). Existem, ainda, duas estações adicionais, que se encontram inativas: Venda Nova (rio) (03J/05H) e Foz do Borralha (04J/01H). Com base nos dados obtidos no SNIRH da estação de Venda Nova foi possível obter a informação da variação do volume armazenado na albufeira e do nível desta entre os anos de 1990 e 2015, apresentando-se na Fig. 22 uma média dos valores mensais durante estes anos.

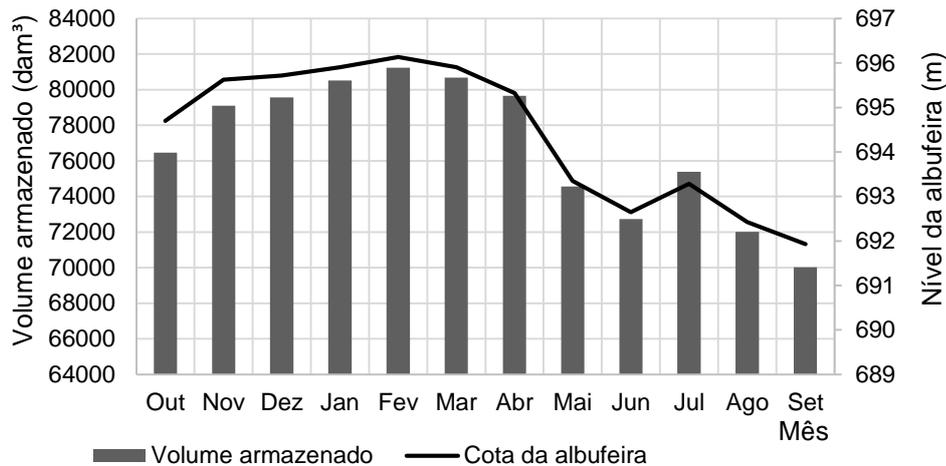


Fig. 20 – Médias mensais do volume armazenado e nível da albufeira de Venda Nova no período de 1990-2015 (SNIRH)

Relativamente à variação do nível de água na albufeira de Venda Nova (Anexo II), será de salientar que esta sofreu alterações consideráveis nos anos 90, sendo que após essa data passou a verificar-se a ocorrência de níveis de armazenamento de água próximos do NPA, não se observando significativas alterações com a entrada em funcionamento de Venda Nova II.

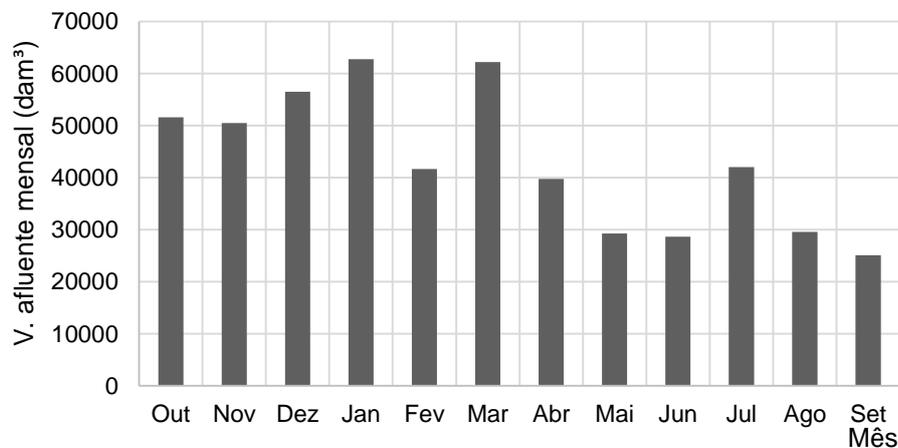


Fig. 21 – Médias do volume afluente mensal de Venda Nova no período de 2001-2008 (SNIRH)

No que concerne à gestão de recursos hídricos, será de referir que, para além dos caudais turbinados e bombados entre as albufeiras de Salamonde e Venda Nova, ocorre também transferência de caudais entre Venda Nova e Alto Rabagão por bombagem. Recorrendo ao SNIRH, nomeadamente aos dados disponibilizados para a estação de Venda Nova constata-se que não existe uma série de dados contínuos para os caudais afluentes à albufeira para nenhum ano, e de igual forma existem poucos dados do volume afluente sendo que apenas é patente a média dos dados do volume afluente mensal à albufeira no período de 2001 a 2008 na Fig. 21. Sendo a média anual do volume afluente à albufeira de Venda Nova de cerca de 520.000 dam³, e sabendo que a capacidade total da albufeira é de 94,5 hm³, resulta que a relação entre a capacidade da albufeira e o volume afluente é de 0,18 e, conseqüentemente, de acordo com a curva de

Brune (Fig. 4), a eficiência de retenção de sedimentos é de cerca de 85% para sedimentos finos e 96% para sedimentos grosseiros.

A albufeira de Venda Nova abrange os concelhos de Vieira do Minho, Boticas e Montalegre, sendo a população residente, na bacia hidrográfica própria, de 800 habitantes, a que corresponde uma densidade populacional de 17 hab/km². A taxa de utilização de recursos hídricos é de 1%, representando este valor a relação entre as necessidades onde se encontram as captações e as disponibilidades hídricas totais. As necessidades rondam a 1.530.560 m³/ano, sendo que 96,6% são usados para agricultura, 3% tem fim urbano e 0,2% para a pecuária e indústria cada. Reporta-se que na albufeira de Venda Nova existe uma captação superficial de água da Águas do Noroeste, S.A. com um volume associado de 0,2 hm³/ano.

O trecho do rio Rabagão a montante da albufeira de Venda Nova abrange os concelhos de Boticas e Montalegre com uma população residente, na bacia hidrográfica própria, de 751 habitantes, uma densidade populacional de 19 hab/km² e uma taxa de utilização de recursos hídricos de 8%. As necessidades rodam os 2.271.560 m³/ano, sendo que a maioria tem como finalidade a agricultura (97,9%), 1,9% tem uso urbano, 0,1% é para a pecuária e 0,1% para a indústria.

No caso da ribeira de Amiar, esta abrange os concelhos de Cabeceiras de Basto, Boticas e Montalegre, tendo uma população, na bacia hidrográfica própria, de 1499 habitantes, uma densidade populacional de 29 hab/km² e uma taxa de utilização de recursos hídricos de 5%. Relativamente às necessidades, estas correspondem a 1.428.070 m³/ano, com 93,4% para uso agrícola, 6% urbano, 0,3% para a pecuária e 0,3% para a indústria.

O troço do rio Rabagão a jusante da albufeira de Venda Nova abrange os concelhos de Montalegre e Vieira do Minho com uma população residente, na bacia hidrográfica própria, de 197 habitantes, uma densidade populacional de 26 hab/km² e uma taxa de utilização de recursos hídricos de 1%. Neste trecho as necessidades já são ligeiramente mais distribuídas pelos diferentes setores com 79,3% para fim agrícola, 19,2% para uso urbano, 1,2% para a pecuária e 0,3% para a indústria, perfazendo 54.710 m³/ano (APA & ARH, 2012).

Entende-se que, em relação à qualidade de água, segundo o Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Cávado, Ave e Leça (PGRH2) (APA & ARH, 2012), em 2010 o estado da massa de água na albufeira de Venda Nova era bom ou superior, e bom na ribeira do Amiar, mas a jusante da barragem era medíocre e a montante da albufeira era razoável. Apesar disto, pontualmente ocorrem perturbações na qualidade de água da albufeira, nomeadamente baixas concentrações de oxigénio nas camadas mais profundas no Verão. A amostragem da qualidade de água é realizada em estações de monitorização, estando assinaladas as seguintes estações no SNIRH:

- Montante: Albufeira do Alto Rabagão (03J/09), Pisões (03J/15) e Vila da Ponte (EDP) (03J/16);
- Albufeira: Albufeira Venda Nova_est 2 int (EDP) (03J/14C), ETA Rabagão (Alb. Venda Nova) (04J/12) e Alb. Venda Nova (03J/08).

Finalmente, deverá referir-se que foi aprovada uma medida que consta no PGRH2 para proceder à implementação de um regime de caudais ecológicos na barragem de Venda Nova que começará a ser libertado em 2018 e será registado em continuo. Em paralelo, no mesmo documento, está patente ainda uma medida que resultou na implementação de um regime de caudais ecológicos para a barragem de Alto Rabagão, que afeta o troço do rio Rabagão a montante da albufeira de Venda Nova, e se iniciou em 2012. No PGRH2 foi ainda definida uma medida que consiste no *levantamento batimétrico periódico dos leitos das albufeiras*, com a qual se pretende a obtenção de dados sobre a erosão e produção de sedimentos das bacias hidrográficas, assim como a sua regionalização e avaliação da vida útil efetiva das albufeiras, prevendo-se a realização de um levantamento batimétrico de dez em dez anos do leito

das albufeiras com mais de 1 milhão de m³ de capacidade original (excetuando as que são criadas por barragens móveis) e a sua comparação com levantamentos anteriores com vista a determinar as taxas de sedimentação (APA & ARH, 2012).

5.2.3.3. Geologia, hidrogeologia e ocupação do solo

A região em estudo está integrada numa grande unidade geotectónica denominada Zona Centro-Ibérica, na subzona Galiza Média/Trás-os-Montes. Por análise da carta geológica da área de enquadramento da albufeira de Venda Nova verifica-se que existe uma abundância de metassedimentos do Paleozoico, nomeadamente xistos pelíticos com raros níveis de xistos quartzíticos e com intercalações de rochas calcossilicatadas e de liditos. Nas zonas a jusante de Padrões e a montante de Pondras verifica-se a predominância de granitos antigos, mais precisamente de granito de Montalegre, Pongras e Borralha, que são granitos porfiroides, de grão médio a grosseiro, de duas micas e essencialmente biotíticos. Observa-se ainda a existência de vários filões e massas de aplitos, pegmatitos e básicos, sobretudo na margem direita, a jusante da barragem, mas também alguns filões e massas de quartzo. Destaca-se ainda a existência de uma falha na zona da antiga exploração mineira da Borralha, e várias localizações para prováveis falhas.

A unidade hidrogeológica insere-se no A0 - Maciço Antigo Indiferenciado, que é constituído por formações com baixa aptidão aquífera, podendo ocorrer pontualmente casos particulares que permitam a obtenção de caudais substanciais e estão associados a uma maior fracturação e descontinuidades mais abertas. Em termos de qualidade, a água subterrânea nas zonas mais superficiais (mais porosas) é de natureza bicarbonatada e preponderantemente sódica. Já nas zonas mais profundas (menos permeáveis) a água é mais básica que a superficial e contém mais minerais por causa do maior tempo de contacto com o material rochoso (PROCESL, 2009).

A ocupação do solo na zona em estudo (Fig. 22, Fig. 23 e Fig. 24) reflete os condicionamentos impostos pela topografia, sendo caracterizada por matos e florestas nas zonas de encosta e de maior declive, e por áreas agrícolas e de pastagem nas zonas mais planas e nos vales, junto às povoações e aos cursos de água. Os solos, na zona em estudo, resultaram da degradação ou destruição do coberto vegetal natural por meio da agricultura, pecuária ou por instalação de plantações florestais, sendo que, no geral, têm uma maior aptidão para matos e florestas do que para a agricultura (PROCESL, 2009).

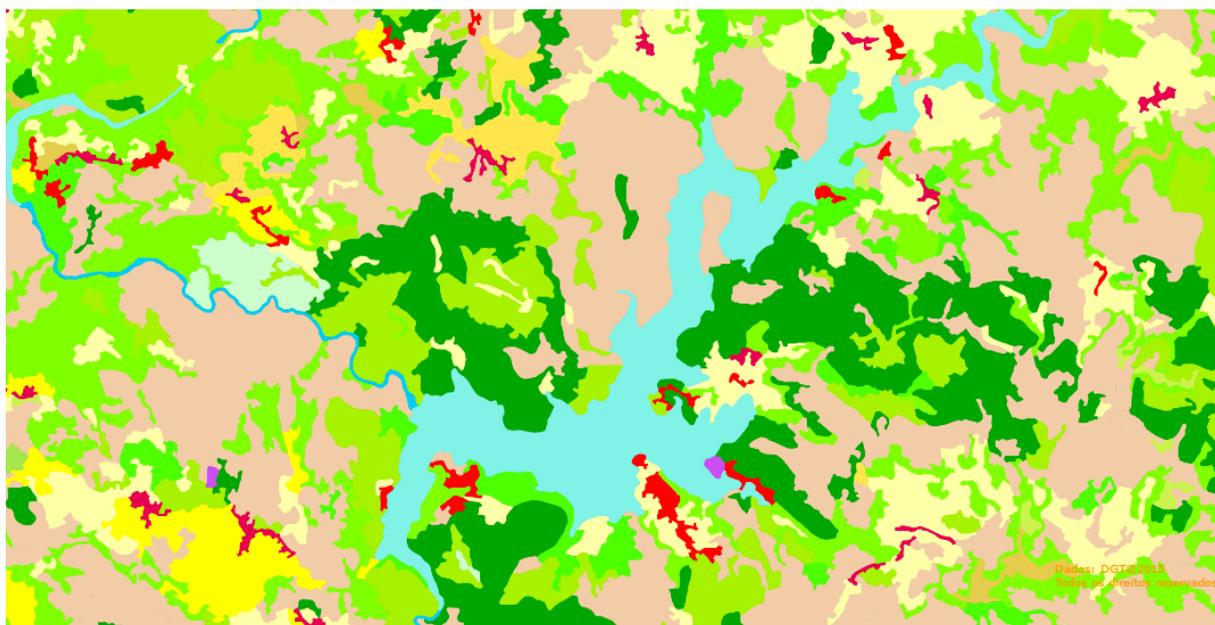


Fig. 22 – Carta de uso e ocupação de solo (COS 2007) da zona a jusante e da albufeira de Venda Nova (DGT)
Legenda: azul - albufeira e linhas de água; vermelho/rosa escuro – zonas urbanas; roxo – indústria, comércio e infraestruturas; verde e rosa claro – zonas florestais e matos; castanho/laranja/amarelo/bege – terrenos agrícolas, culturas e pastagens; cinza/azul claro – praias, dunas, areais, vegetação esparsa, entre outros. Pode-se consultar o mapa e a legenda mais pormenorizada em <http://mapas.dgterritorio.pt/viewer/index.html>

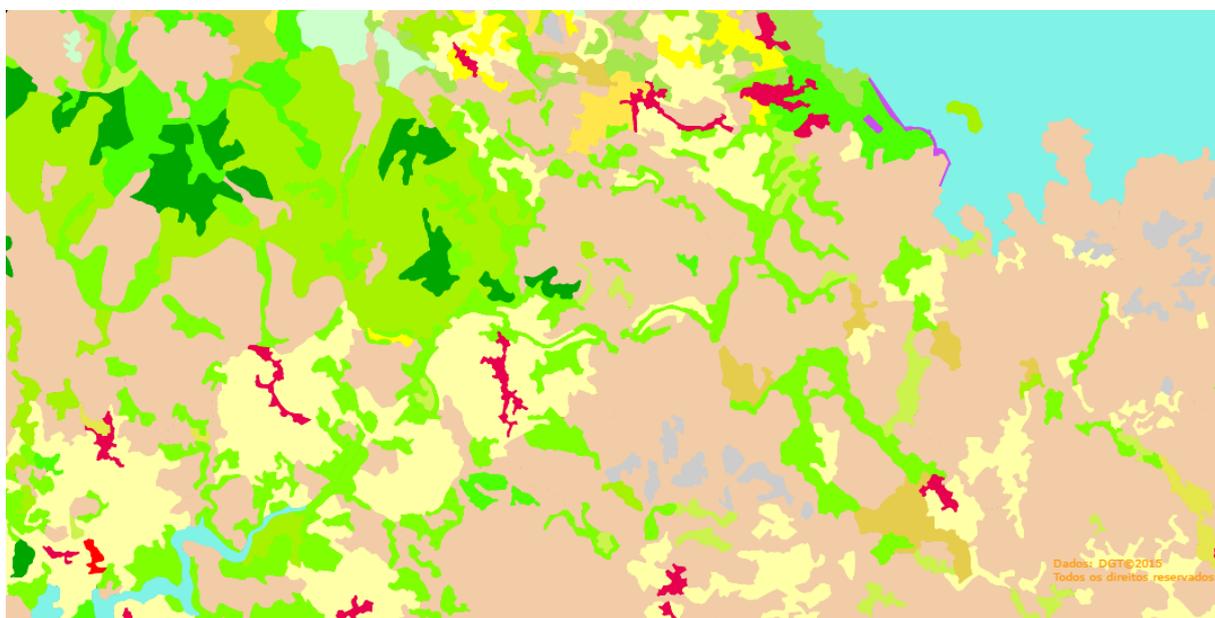


Fig. 23 – Carta de uso e ocupação de solo (COS 2007) da zona a montante da albufeira de Venda Nova (DGT)

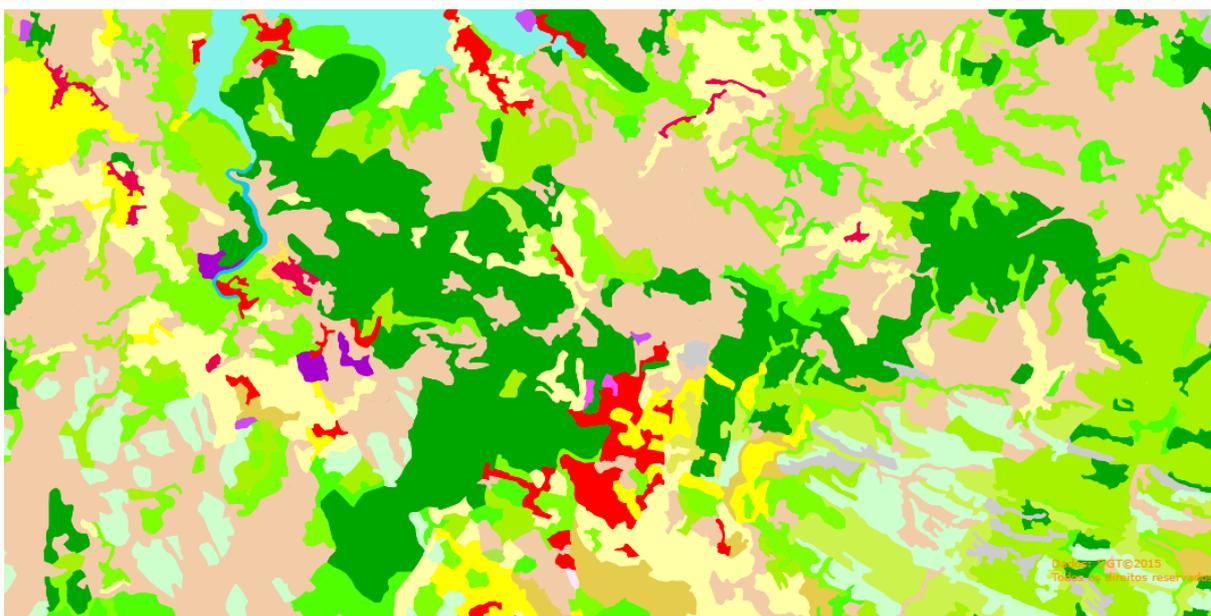


Fig. 24 – Carta de uso e ocupação de solo (COS 2007) da zona da ribeira de Amiar (sul da albufeira) (DGT)

5.2.3.4. Erosão hídrica, transporte e acumulação de material sólido

No PGRH2 (APA & ARH, 2012) é feita referência ao Plano Específico de Gestão de Extração de Inertes em Domínio Hídrico para as Bacias do Lima e do Cávado (PEGEI), realizado em 2006 pelas empresas PROCESL, CIDEC e PROSISTEMAS para o INAG, que permitiu a caracterização da erosão hídrica e do transporte de material sólido nas bacias dos referidos rios com o objetivo de, conjuntamente com os resultados obtidos através da rede de monitorização a implementar, se poderem tomar decisões em relação à eventual extração de inertes em domínio hídrico das bacias hidrográficas dos rios Lima e Cávado. Dos vários resultados obtidos neste trabalho, destaca-se a estimativa de 56,3 t/(ha.ano) para a erosão específica real e 590,1 t/(ha.ano) para a erosão potencial, para a totalidade da bacia do Cávado, em ano hidrológico médio. No caso particular da sub-bacia associada a barragem de Venda Nova, esta foi considerada a segunda com maior erosão real com 110,6 t/(ha.ano), apenas atrás da sub-bacia associada à barragem de Paradela com 150,4 t/(ha.ano). De acordo com a erosão calculada para cada sub-bacia, foi estimada a produção fluvial de sedimentos, verificando-se a maior produção no rio Rabagão com 23 t/(ha.ano).

De referir ainda que no PEGEI consta um levantamento topo-hidrográfico realizado em julho de 2004, num trecho com cerca de 60,3 km de extensão entre a barragem da Caniçada e a foz em Esposende (a jusante, pois, das barragens do Sistema Cávado-Rabagão-Homem), com recurso a 70 perfis transversais. Simultaneamente a este foram recolhidas amostras de sedimentos de fundo em 19 perfis transversais e realizadas curvas granulométricas. A partir desta informação e de caudais sólidos e líquidos, foi efetuado também a modelação matemática do transporte de material sólido no rio para prever a evolução dos fundos.

Em termos de balanço sedimentológico é considerado, no PEGEI, que se está perante uma situação de equilíbrio no rio Cávado. Apesar disto, a redução nas áreas agrícolas, que foi verificada por análise da ocupação de solo e dados do Instituto Nacional de Estatística (INE), suporta que tenha ocorrido uma diminuição da erosão média da bacia do Cávado e consequentemente da produção de sedimentos.

Não existindo estações de rede sedimentológica na Região Hidrográfica do Cávado, Ave e Leça seria aconselhável serem instaladas nos troços de maior produção de sedimentos, mais concretamente a montante e jusante das albufeiras do Alto Rabagão e Venda Nova e ainda a montante da albufeira da Caniçada, para a bacia do Cávado, sendo que idealmente se teria pelo menos a montante e a jusante de cada albufeira uma estação.

Com base no trabalho feito por Costa (2004), já referido em 2.5, verificou-se que o enchimento sedimentar a montante da barragem de Venda Nova integra um conjunto de sedimentos detríticos (cujo mineral pesado dominante é a turmalina e o de argilas é a caulinite), mais precisamente areias e silte/limo (Fig. 25). Estes sedimentos existem sobre as vertentes submersas da albufeira, em faixas ou bandas de sedimentos grosseiros que alternam com sedimentos finos siltosos, e na zona da ribeira de Amiar com sedimentos estratificados com restos vegetais que, em 2001 (aquando de um abaixamento da albufeira), apresentavam disposição em terraços.

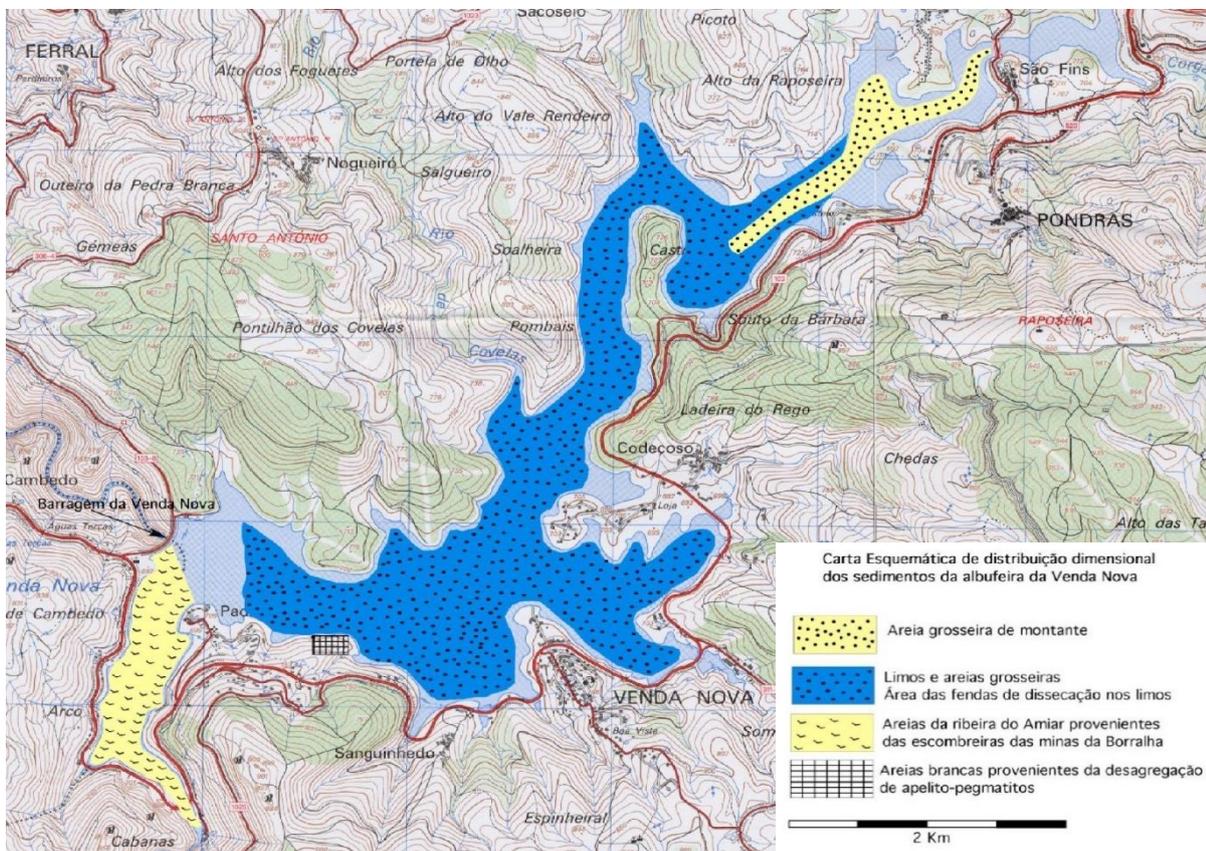


Fig. 25 – Carta Esquemática de distribuição dimensional dos sedimentos da albufeira de Venda Nova (Costa, 2004)

A disposição dos sedimentos detríticos em faixas ou bandas sobre as vertentes permitiu a Costa (2004) observar a acumulação de sedimentos na albufeira, tendo sido suposto que os sedimentos grosseiros acumulados têm origem no complexo de meteorização das rochas das vertentes e nos solos da área submersa, que praticamente não terão sofrido transporte uma vez que se verifica que existe uma elevada dispersão dimensional. Por sua vez, os sedimentos finos, com uma origem semelhante aos grosseiros, estariam em suspensão na água da albufeira, tendo-se acumulado sobre os grosseiros durante os

abaixamentos e durante as descidas de nível da albufeira. Já os sedimentos da ribeira de Amiar têm como principal origem a mina da Borralha, que se aborda mais aprofundadamente em 5.2.4.

Na zona mais a montante da albufeira, junto à ponte de São Fins (Fig. 25), foram recolhidas, à data do referido estudo, amostras de areia pouco calibrada, pelo que se inferiu da existência de uma faixa de areias no leito do rio. Este estudo identificou ainda que ocorre a Este de Padrões uma zona de areias esbranquiçadas e mal calibradas em torno de afloramentos de aplito-pegmatitos, que contrastam com os sedimentos de enchimento que têm cor mais escura e são provenientes dos metassedimentos.

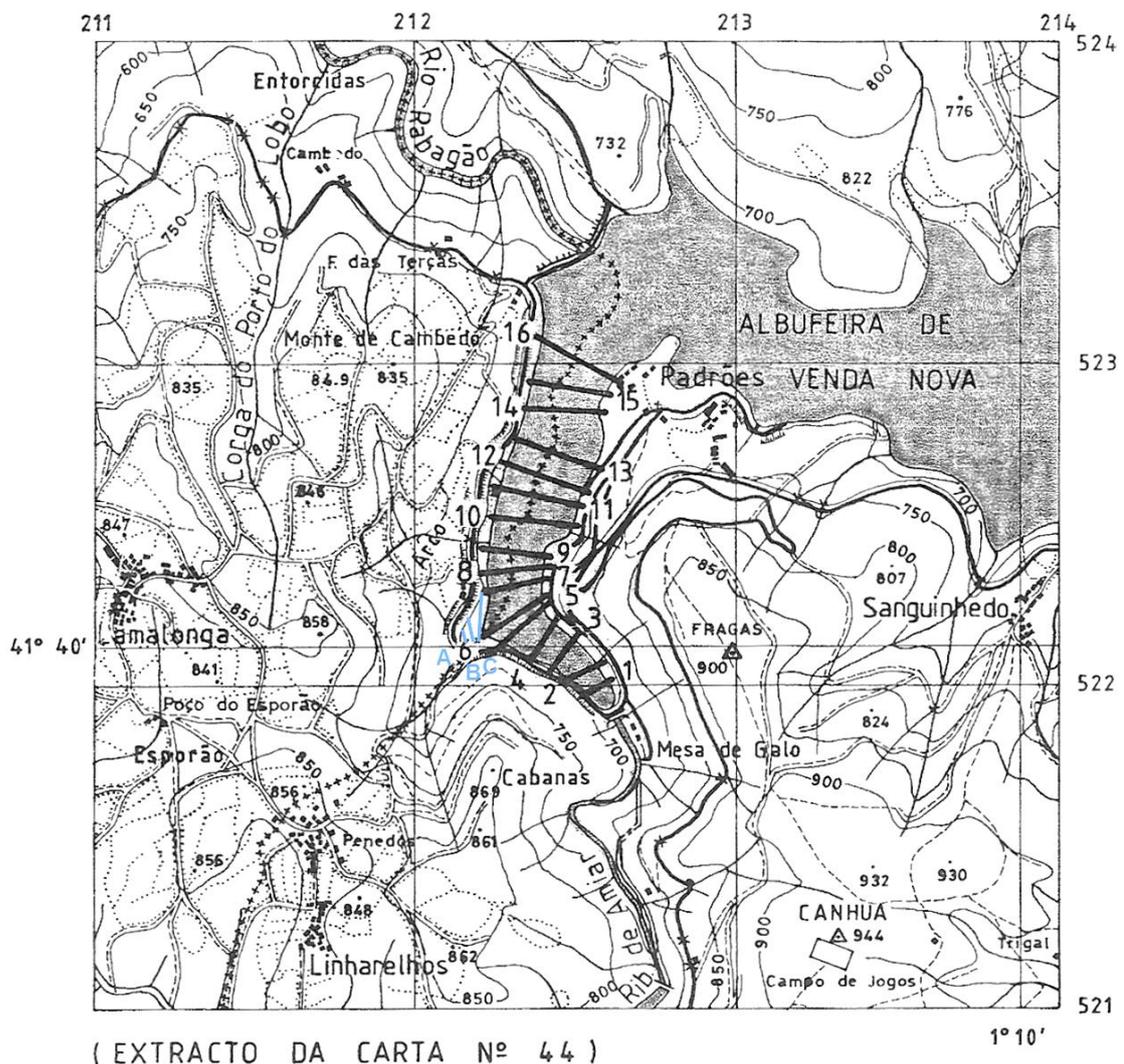


Fig. 26 – Localização dos perfis transversais da Ribeira de Amiar em Venda Nova (EDP, 1985)

Como já mencionado em 2.5 e 5.2.2, em 1984 ocorreu um assoreamento na zona imediatamente a montante da barragem e na ribeira de Amiar que causou problemas nos órgãos de descarga da barragem de Venda Nova. Esta ocorrência levou a que se fizesse um esvaziamento total da albufeira para proceder ao desassoreamento por escavação a seco, o que permitiu a análise e estudo da sedimentação ocorrida naquela albufeira pelo LNEC (Cardoso, 1986). Esse assoreamento esteve diretamente relacionado com

a exploração das minas da Borralha (5.2.4.), pois os afluentes das instalações de lavagem dos minérios e sedimentos das escombrelas eram descarregados na ribeira de Amiar e transportados até à albufeira. Essa zona foi, assim, alvo de maior atenção no estudo do LNEC, tendo sido realizadas várias amostragens superficiais e obtidos cortes estratigráficos ao longo de alguns dos perfis topográficos transversais levantados no braço da ribeira de Amiar: B1, B4, B8, B12, B16 (Fig. 26), no eixo principal da albufeira: 50 m a montante da barragem (na margem direita), 2000 m a montante da barragem (num afluente da margem direita e a jusante da antiga ponte de Venda Nova), 6150 m a montante da barragem (na margem direita e a jusante da ponte de S. Fins-Currais), e ainda 9 amostras superficiais de 80 em 80 m desde 180 m a montante da barragem até à antiga ponte de Venda Nova.

As análises das amostras recolhidas no estudo do LNEC permitiram avaliar a distribuição da granulometria dos sedimentos, tendo-se verificado a existência de estratificação com diferentes granulometrias no mesmo ponto, o que é indicativo de diferentes capacidades de transporte na albufeira ao longo do tempo e que estão relacionadas com fatores como a intensidade de precipitação na bacia (relembra-se que o ano de 1978 foi classificado como muito húmido, por exemplo).

As características dos sedimentos permitiram a Cardoso (1986) constatar que a mina da Borralha não teve uma notória influência nas acumulações de sedimentos na zona principal da albufeira, com exceção da zona imediatamente a montante da barragem, onde se encontraram espessuras de cerca de 17 m de depósitos sedimentares. Isto porque verificou-se que na zona da ribeira de Amiar abundavam as granulometrias grosseiras compostas sobretudo por quartzo e com o aspeto de lascas ou lâminas que resultavam da atividade da mina, e ainda leitos de materiais finos essencialmente silteosos, mas ao longo do eixo principal da albufeira existiam granulometrias mais homogêneas, fundamentalmente areias finas com grãos de quartzo sem o aspeto de lascas ou lâminas, embora angulosos. Estas menores granulometrias no eixo principal podem ser explicadas pela retenção dos sedimentos mais grosseiros pela barragem do Alto Rabagão.

Para além disso, a EDP estimou de acordo com os levantamentos de 1984 que houve uma acumulação de cerca de 300.000 m³ de sedimentos, na zona intervencionada, desde o abaixamento parcial de 1977. Este cálculo foi baseado no fato de que na operação de desassoreamento foram removidos quase por completo os depósitos acumulados no fundo da albufeira na zona da ribeira de Amiar e na zona da barragem, observando-se apenas vestígios de depósitos sedimentares no encontro com as margens de forma semelhante ao que já se tinha verificado em 1977, pelo que se considerou que os depósitos acumulados eram posteriores a essa data. Considerando que a área da bacia hidrográfica associada ao braço da albufeira é de 28,2 km², chega-se a um valor de assoreamento específico bastante elevado de 1520 m³/(km².ano) para esta zona, e que demonstra que esse assoreamento é resultado de ação antrópica. Segundo a estimativa então realizada (Cardoso, 1986), apenas uma pequena parte do assoreamento detetado teve origem nos tanques de sedimentação da mina da Borralha (cerca de 4300 m³/ano, 10% do total anual), sendo que os restantes 38557 m³/ano tiveram origem na erosão natural da bacia hidrográfica e, sobretudo, na erosão das escombrelas da própria mina, que atualmente ainda existem.

O referido valor permite ainda constatar que houve um contributo de cerca de 0,317% para a perda da capacidade total da albufeira e de 20% do volume morto com este assoreamento (admitindo que a perda é só de volume morto), valores repostos com o desassoreamento efetuado. Ainda assim, segundo Juracek (2015), e com base nestes dados, poder-se-ia classificar a albufeira como muito jovem, mesmo antes do desassoreamento. De acordo com o período considerado, obtêm-se taxas de perda de capacidade total de 0,0454%/ano e de perda de volume morto de 2,9%/ano. Caso se considerasse apenas a perda de capacidade da zona da ribeira de Amiar da albufeira e não a sua totalidade, ter-se-ia outra perspetiva

deste problema uma vez que a muito inferior acumulação de depósitos sedimentares no eixo principal da albufeira e a grande capacidade de armazenamento da mesma diluem o problema da ribeira.

Outro período problemático ocorreu no período (húmido) de 2000/2001 em que houve uma forte erosão na zona das escombrelas da mina, cuja cobertura vegetal tinha sido parcialmente destruída. De tal resultou o transporte dos sedimentos para a ribeira de Amiar, que se distribuíram, formando um delta, para jusante da minicentral hidroelétrica da Mesa do Galo. Este delta foi posteriormente destruído por ravinamento aquando do gradual esvaziamento parcial da albufeira, em 2001, que modelou os terraços nas margens da ribeira. Refere-se, no entanto, que não foram observados em 2001 indicadores de erosão acentuada nas vertentes não submersas da albufeira pois estas possuíam cobertura vegetal contínua e bem conservada. Já em 2002, ano menos pluvioso do que o anterior, o caudal sólido foi inferior ao ocorrido em 2001, observando-se a erosão das acumulações anteriores nas vertentes submersas e o quase total desaparecimento dos terraços (Costa, 2004). De acordo com um levantamento de perfis transversais do fundo da albufeira na zona da ribeira de Amiar (B1 a B7, PB e PC) em setembro de 2002 analisado pelo Departamento de Topografia e Geodesia da EDP Produção, verificou-se ao comparar com um levantamento de 2001 que foram acumuladas 4384 m³ de areias, tendo sido erodido um volume de 7831 m³ neste período.

5.2.3.5. Fauna e flora

Em termos da biodiversidade, existem na envolvência da área em estudo habitats importantes como os carvalhais e os afloramentos rochosos, que servem de abrigo a espécies faunísticas e que têm potencial de ocorrência de espécies florísticas raras ou pouco comuns. Existem, no entanto, também algumas áreas com pouco interesse ecológico, em que se encontra um avançado estado de degradação do coberto vegetal potencial. Como já foi referido anteriormente em 5.2.1 a zona a jusante da albufeira está incluída na Rede Nacional de Áreas Protegidas e, como tal, está abrangida por uma série de proteções no que toca a espécies protegidas.

Observando a Fig. 27 pode-se constatar que na imediata envolvência da albufeira de Venda Nova existem populações de pinheiros bravos, carvalhos, folhosas, pastagens, culturas irrigadas e não irrigadas, matos, e territórios artificializados.

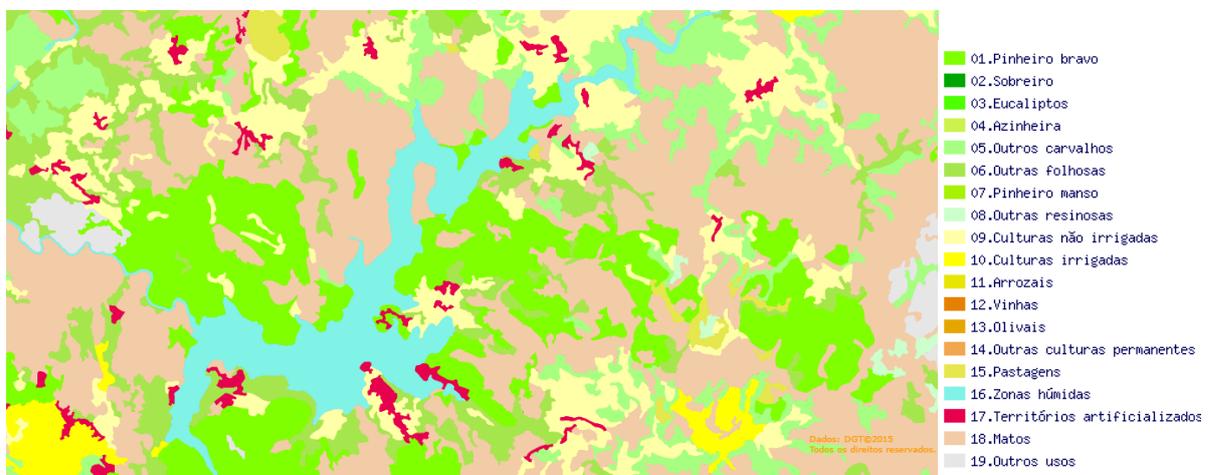


Fig. 27 – Carta de uso e ocupação de solo (COS-Kyoto 2010) da zona a jusante e da albufeira de Venda Nova (DGT)

Foram inventariados na zona da albufeira e sua envolvente peixes, anfíbios, répteis, aves e mamíferos, que na sua maioria não têm estatutos de conservação preocupantes e que se encontram amplamente distribuídos por Portugal. Recorrendo à carta da zona de caça ZCM 3089 de Montalegre (Anexo III) é possível constatar que praticamente quase toda a zona envolvente à albufeira está incluída nessa zona de caça, na qual, em grande parte da área, é assinalada a presença de lobo, espécie que está “em perigo” de extinção segundo o Livro Vermelho dos Vertebrados de Portugal. O Plano Anual de Exploração (PAE) e Condições de Candidatura ao Exercício da Caça em ZCM (CCEC) para 2015/2016 (ICNF, 2015) apresenta uma listagem dos animais que podem ser caçados na referida ZCM 3089, nomeadamente rolas, pombos, pato-real, codorniz, perdiz, coelho, lebre, raposa, galinhola, tordos, javali e corço.

No que toca a anfíbios, segundo o Atlas dos Anfíbios e Répteis de Portugal (Loureiro, Ferrand de Almeida, N. Carretero, & Paulo, 2008), prevê-se a existência de sapo-parteiro-comum, sapo-comum, sapo-corredor, salamandra-lusitânica, salamandra-de-pintas-amarelas, rã-de-focinho-pontiagudo, rã-ibérica, rã-verde, tritão-de-ventre-laranja e tritão-marmorado. De acordo com a mesma fonte, em termos de répteis antecipa-se a presença de cobra-de-pernas-tridáctila, cobra-de-escada, sardão, lagarto-de-água, cobra-rasteira, cágado-mediterrânico, cobra-de-água-viperina, cobra-de-água-de-colar, lagartixa-de-bocage, lagartixa-ibérica, lagartixa-do-mato e víbora-cornuda.

Em termos de fauna piscícola, recorrendo à Concessão de Pesca no Rio Rabagão (Despacho VCD_SCBS/662/2013 de 2 de dezembro, Alvará n.º 419/2014 de 17 de fevereiro), válida até 17 de fevereiro de 2024, é possível concluir que no troço a montante da albufeira de Venda Nova (entre a barragem do Alto Rabagão e o moinho do Lameiro de Mejuelas no lugar de Senhora de Fátima) é possível pescar achigã, barbo, boga, carpa, truta, ablete, escaló, lúcio, pimpão e perca-sol. Entretanto, a Carta Piscícola Nacional (F. Ribeiro, Beldade, Dix, & Bochechas, 2007), refere e discrimina para os diferentes trechos do rio Rabagão a existência das espécies apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Fauna piscícola para o Rabagão (F. Ribeiro et al., 2007)

Zona	Espécies
Rio Rabagão (próximo de Vila da Ponte)	Gobio
	Panjorca
	Ruivaco, Ruivaca, Pardelha-de-escamas-grandes
Rio Rabagão (ponte de Ladrujães e outros troços)	Truta-marisca, Truta-fário, Truta-de-rio
	Gobio
	Escalo do Norte
	Verdemã do Norte, Peixe-rei
Barragem do Alto Rabagão	Truta-arco-iris
	Truta-marisca, Truta-fário, Truta-de-rio
	Escalo do Norte
	Boga do Douro
	Carpa, Sarnão
Barragem de Venda Nova	Barbo-comum, Barbo do Norte
	Truta-marisca, Truta-fário, Truta-de-rio
	Boga do Douro
	Escalo do Norte

No entanto, segundo o relatório de Vale *et al.* (1980), a fauna piscícola tinha vindo progressivamente a desaparecer aquando desse estudo, em 1980, sendo que aquando do abaixamento do nível da albufeira em 1977 se verificou mesmo a completa inexistência de peixes na albufeira, não se tendo verificado qualquer recuperação até à data do supracitado relatório. De mencionar que previamente ao referido abaixamento já a população local se queixava há vários anos da ausência de peixes na zona da albufeira que recebia o efluente da mina da Borralha.

Nesse mesmo relatório (Vale *et al.*, 1980) foi concluído que, em termos quantitativos, o fitoplâncton era pobre, apresentado valores de densidade e biomassa idênticos aos encontrados noutras albufeiras oligotróficas, mas apresentava uma diversidade específica elevada, mesmo em locais com elevadas concentrações do contaminante estudado, o cobre. Este último ponto levou a inferir que a baixa densidade podia ser devido ao baixo teor em nutrientes na água e não ao efeito tóxico do cobre, e ainda que as espécies fitoplanctónicas dominantes estavam adaptadas a elevados teores deste metal. Ademais, algumas algas são capazes de produzir substâncias orgânicas que atuam como quelantes do cobre iónico, tendo-se encontrado estas espécies na albufeira, para além das espécies *Cosmarium tinctum* e *Cosmarium sp.* que, tendo um grande desenvolvimento nos locais mais contaminados, pode indicar que são espécies capazes de diminuir a toxicidade do meio ao fixarem o cobre iónico.

Em termos de zooplâncton, o referido estudo (Vale *et al.*, 1980) concluiu que, tendo em conta que não sofre predação por parte dos peixes e tendo boas condições de alimentação, não seriam de esperar valores de densidade e biomassa tão baixos, o que faz depreender que tal pode corresponder à ação tóxica dos metais pesados, presentes na água e no alimento. Simultaneamente, a ausência de peixes na albufeira em 1977 podia ser consequência, em parte, de uma quantidade insuficiente de zooplâncton, para além do efeito tóxico do cobre, que apresentava teores muito superiores àqueles acima dos quais os peixes são sensíveis.

5.2.3.6. Património arqueológico

Com a construção da barragem de Venda Nova foi submersa uma aldeia e também vários terrenos adjacentes, sendo possível observar vestígios da antiga povoação (Fig. 28) quando se procede ao abaixamento ou esvaziamento da albufeira. Foram também submersas algumas estruturas da Idade do Ferro e um troço da Via Romana XVII, que ligava Braga a Astorga (Espanha) por Chaves (Fig. 29). O trabalho de Tese de Mestrado desenvolvido por Filipe (2013), que teve apoio do arqueólogo João Fonte, permitiu recuperar esse traçado submerso da Via Romana XVII com recurso a um modelo digital de terreno (MDT) e um ortomosaico da zona de estudo, obtidos a partir da ortorretificação de fotografias aéreas de 1949 dos Serviços Cartográficos do Exército.



Fig. 28 – Localização dos vestígios arqueológicos
Legenda: 1 – Ponte do Arco (ponte romana); 2 – ruínas de antigas estruturas; 3 – povoação submersa; 4 – vestígios de antigas vias; 5 – Castro de Codeçoso (antigo povoado fortificado da Idade do Ferro).

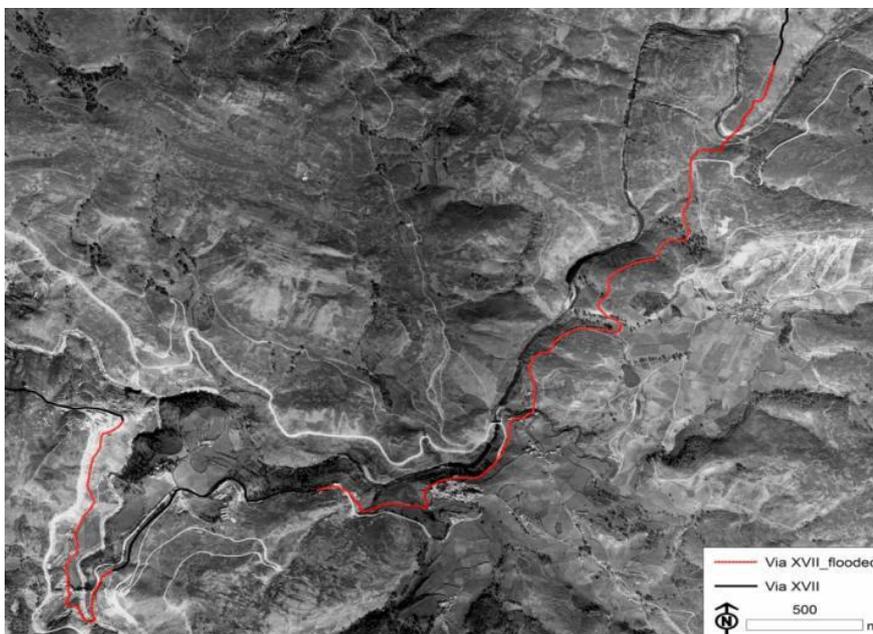


Fig. 29 – Reconstrução da Via Romana XVII. (Filipe, 2013)
Legenda: vermelho – trecho submerso; preto – trecho visível.

5.2.4. FONTES DE POLUIÇÃO

Consideraram-se como possíveis fontes de poluição aquelas que apresentam um risco de poluição accidental da massa de água, tendo como base o trabalho já efetuado e apresentado no PGRH2 (APA & ARH, 2012) uma vez que, de acordo com o previsto na Lei da Água (Lei n.º 58/2005, de 29 de dezembro), esse tipo de planos devem identificar as pressões e descrever os impactes significativos da atividade humana sobre as águas superficiais e subterrâneas. Nessa Lei identificam-se como atividades potencialmente geradoras de poluição:

- Instalações PCIP, que são instalações abrangidas pelo Anexo I do DL n.º 173/2008, de 26 de agosto, relativo à prevenção e controlo integrados da poluição;
- Instalações Seveso, que são instalações que contenham substâncias perigosas em quantidades iguais ou superiores às estipuladas no Anexo I do DL n.º 254/2007, de 12 de julho;
- Unidades de Gestão de Resíduos (aterros);
- Minas;
- Unidades Fitofarmacêuticas;
- Bombas de Gasolina;
- Estações de Tratamento de Águas Residuais Urbanas com capacidade de tratamento igual ou superior a 2000 habitantes;
- Emissários submarinos;
- Zonas portuárias;
- Transporte de matérias perigosas: gasodutos, rede viária principal e rede ferroviária;
- Fontes difusas.



Fig. 30 – Localização de atividades ou instalações potencialmente geradoras de poluição tóxica da albufeira de Venda Nova (Google Earth)

No caso específico da albufeira de Venda Nova e zona envolvente, não se identifica um elevado número de atividades potencialmente geradoras de poluição tóxica (Fig. 30), sendo de referir, para além da Mina da Borralha, a existência de uma bomba de gasolina (GALP), e fontes difusas. Identificou-se uma outra bomba de gasolina (BP) próxima da barragem do Alto Rabagão, a montante de Venda Nova, sendo que

esta última albufeira possui ainda uma instalação de aquicultura em regime industrial de salmonídeos, a Quinta do Salmão – Grupo A. Coelho e Castro.

A atividade de extração de minérios ostenta o risco de contaminação das águas subterrâneas e superficiais através de escorrências ou infiltração dos lixiviados, com metais pesados ou elementos radioativos, e com origem nas escombrelas, eiras de lixiviação, depósitos de lamas e nas bacias de decantação.

A Mina da Borralha localiza-se a sul da albufeira de Venda Nova, no concelho de Montalegre (Vila Real), e constitui o segundo maior jazigo de estanho e tungsténio do país, embora esteja inativa. Esta mina tem especial relevância em termos sedimentares e de contaminação para a albufeira de Venda Nova, uma vez que a ribeira de Amiar transporta sedimentos com proveniência da zona da mina para a albufeira. Em termos de geologia, apresenta uma zona essencialmente granítica, outra xistenta de rochas metassedimentares com predomínio de micaxistos, e uma de granito porfiroide. A mineralização da Borralha apresenta uma associação de volframite (o mineral responsável pela exploração da mina), scheelite e sulfuretos. Os principais minérios extraídos eram o volfrâmio, estanho, cobre, prata e molibdénio, sendo os dois primeiros os mais representativos. Esta mina começou a sua atividade em 1902, tendo sucessivamente aumentado a sua superfície de exploração, mas também teve períodos de inatividade de 1944 a 1946 e 1958 a 1962, tendo fechado em 1986 (Ribeiro, 2010).

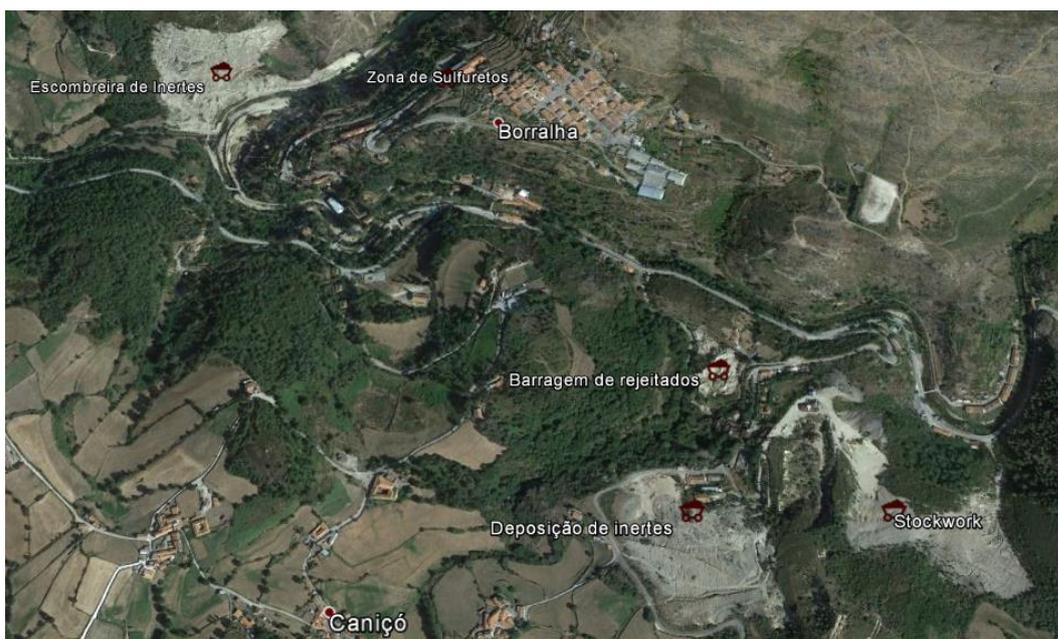


Fig. 31 – Zonas de resíduos do Couto Mineiro da Borralha (Google Earth)

Os resíduos do Couto Mineiro da Borralha distribuem-se pelas seguintes zonas (Fig. 31) (Nunes, 2010):

- Escombrela de inertes com uma bacia de decantação;
- Zona dos sulfuretos da fundição;
- Barragem de rejeitados;
- *Stockwork*, local a céu aberto da mina onde era feita a exploração dos sulfuretos;
- Deposição de inertes.

Para o estudo de Ribeiro (2010) foram realizadas análises ao solo, com um Analisador Portátil de Metais Pesados por Fluorescência de Raios X de Energia Dispersiva, de modo a detetar e identificar o tipo e extensão de eventuais contaminações por metais pesados na escombreira, na barragem de rejeitados, na bacia de decantação e no *stockwork*. Adicionalmente, realizaram-se algumas análises na ribeira de Amiar e nos afluentes e descargas residuais, com um analisador portátil de pH, condutividade e oxigénio dissolvido. Concluiu-se que, à data do referido trabalho, o solo de todas as zonas analisadas se encontrava contaminado com cobre e mercúrio, e ainda que a bacia de decantação apresentava também uma contaminação de arsénio, sendo esta última zona a que exibia os teores mais elevados destes três metais. No que toca às águas superficiais verificou-se que apresentavam valores normais de pH e oxigénio dissolvido para a ribeira de Amiar e Caniçó, mas que as descargas de águas residuais analisadas e a água na lagoa eram ácidas ($\text{pH} < 6$).

Outros estudos que abordam a contaminação resultante das minas da Borralha constam no, já referido em 5.2.3.5, relatório “Estudos relativos à albufeira de Venda Nova” (Vale *et al.*, 1980): “Distribuição do cobre na albufeira”, “Influência do cobre na comunidade fitoplanctónica” e “Influência do cobre na comunidade zooplanctónica”. Nestes trabalhos foi dada especial atenção à contaminação por cobre (mas também ferro, manganês e zinco) devido aos elevados teores observados e também por causa dos efeitos nocivos deste metal, mesmo em baixas concentrações, sobre os seres vivos. Assim, analisaram-se características físicas e químicas da água e dos sedimentos, nomeadamente os teores de cobre nos sedimentos do fundo da albufeira, na matéria em suspensão e dissolvido na água, assim como alterações na estrutura da biocenose planctónica (fitoplâncton e zooplâncton). Uma das conclusões a que se chegou no supracitado estudo foi que a albufeira de Venda Nova é diferentemente afetada pelo cobre, distinguindo-se uma zona a jusante da povoação de Codeçoso com concentrações nos sedimentos do fundo geralmente superiores a 1000 ppm e outra zona a montante com valores inferiores a 500 ppm, sendo que o cobre é provavelmente transportado para esta última zona sob forma coloidal. No que toca à concentração de cobre na água verificaram-se concentrações de 0,05 a 0,50 ppm de cobre dissolvido e 1200 a 1500 ppm de cobre em suspensão. Nos estudos mais recentes realizados pela EDP Labelec (ver 2.5) observaram-se teores em cobre total da ordem de grandeza dos 0,01 a 1 ppm na água e da ordem de 1000 ppm nos sedimentos, na primeira zona referida, o que para a água pode ser superior ao (Valor Máximo Admissível) VMA do DL n.º 236/98 (Anexo XXI) e para os sedimentos é muito superior ao nível de efeitos severos das normas de Ontário.

Os postos de combustível são o tipo atividade potencialmente geradora de poluição que existem em maior número na região hidrográfica, tendo como riscos associados as contaminações por hidrocarbonetos devido ao derrame de combustíveis em situações excecionais, mais concretamente durante a trasfega, devido a fugas nos tanques de armazenamento, e ainda devido a rejeições de efluentes com hidrocarbonetos e outros compostos orgânicos.

Relativamente aos riscos de poluição accidental associados a fontes difusas, têm especial relevo as atividades agrícolas e pecuárias da zona, ainda que se deva também considerar a ocupação humana e as redes viárias. As atividades agrícolas apresentam riscos devido ao uso de fertilizantes e pesticidas, que levam ao aumento de azoto e fósforo nas massas de águas e a possíveis contaminações por derrames accidentais, para além de apresentarem riscos por indevida rejeição de embalagens e lavagem de material contaminado. Adicionalmente, as práticas de regadio podem levar ao aumento de sais devido à alternância dos ciclos de evapotranspiração. Por outro lado, o abandono da prática agrícola potencia o risco de ocorrência de incêndios florestais, que conduzem ao aumento da erosão e, conseqüentemente, a que mais facilmente ocorram contaminações dos solos e massas de água, e ainda a que ocorra o arrastamento e lixiviação de cinzas. Por sua vez, a atividade pecuária, nomeadamente através de

suiniculturas, aviários, boviniculturas e a criação de animais não estabulados, pode causar a acumulação e/ou dispersão de efluentes pelos terrenos com elevadas cargas orgânicas, de sólidos suspensos, de nitratos e de contaminação microbiológica. Em termos de ocupação humana, referem-se os efeitos dos sistemas de tratamento de águas residuais se não forem devidamente construídos e mantidos, e ainda a lavagem de viaturas, regas de jardins, entre outros. O tráfego automóvel cria riscos associados aos gases de combustão e à contaminação por escoamento superficial com hidrocarbonetos (APA & ARH, 2012).

5.3. METODOLOGIA DE TRABALHO

Após o enquadramento apresentado no presente capítulo que possibilita a caracterização da albufeira e sua envolvente, e conhecer o trabalho já realizado para a albufeira de Venda Nova com relevo para o estudo da sedimentação em albufeiras, apresenta-se seguidamente a metodologia adotada para a obtenção de dados para quantificação da acumulação de sedimentos na albufeira, assim como para avaliar em vários pontos da albufeira a atual qualidade dos sedimentos e, simultaneamente, analisar comparativamente a qualidade da água.

5.3.1. QUANTIFICAÇÃO DA ACUMULAÇÃO DE SEDIMENTOS

Para poder estudar a evolução da acumulação de sedimentos na albufeira de Venda Nova em termos de volume acumulado e de distribuição espacial, procuraram-se obter levantamentos batimétricos já realizados.

Primeiramente, procurou-se o levantamento inicial da albufeira, no entanto só foi possível obter dois desenhos não numerados, correspondentes à planta antes da construção da barragem e com a sua implantação e que constam numa compilação da EDP, datada de 2003, de desenhos e perfis da albufeira de Venda Nova para a zona da ribeira de Amiar. Estes dois desenhos, que contêm a topografia do terreno apenas na zona da barragem e da ribeira de Amiar, aparentam ser uma reprodução parcial dos desenhos originais, não tendo, no entanto, sido possível obter os mesmos.

Em paralelo, consultaram-se as cartas militares de Portugal correspondentes à zona em estudo (nº 43, 44 e 45) à escala 1:25000, que datam de 1949 mas que, embora tenham resultado de um trabalho de campo prévio à entrada em funcionamento do aproveitamento da Venda Nova, em 1951, incluem já a albufeira. Tal será devido, possivelmente, a uma atualização das referidas cartas para incluir a albufeira após os trabalhos de campo, já que a primeira edição de cada uma das cartas é posterior a 1951, o que inviabiliza o seu uso para o presente trabalho. Com base no trabalho realizado por Filipe (2013) foi possível identificar a existência de 34 negativos originais das fotografias (18 cm por 18 cm para uma distância focal de 204,4 mm) do voo realizado em 1949 pelos Serviços Cartográficos do Exército com uma câmara aérea *Zeiss RMK S 1818*. Pela ortorretificação de fotografias aéreas, no referido trabalho, foi possível obter-se um ortomosaico e um MDT da zona de estudo. Por este motivo, contactou-se com a orientadora da dissertação em causa, a professora doutora Paula Redweik do Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia da Universidade de Lisboa, com a qual se constatou que os dados existentes não se encontravam com a resolução que se pretendia pelo que se teria de requerer as fotografias áreas ao Centro de Informação Geoespacial do Exército e por fotogrametria obter um novo MDT.

Entretanto, com o apoio da Direção de Engenharia de Barragens (DEB) da EDP foi possível ter acesso as cotas de 38 perfis transversais ao longo do eixo principal da albufeira (Anexo IV) que resultaram de um levantamento de linhas batimétricas efetuado em 1985. O acesso a estes perfis permitiu obter o

levantamento completo da albufeira em 1985 por junção dessa informação aos 19 perfis transversais relativos à mesma data, já antes obtidos, para a ribeira de Amiar (Fig. 26). De referir que, para os perfis transversais na ribeira de Amiar existem dados para vários anos, nomeadamente para 1985, 2001 e 2002, existindo ainda as linhas mais prováveis para os assoreamentos em 1984 e 1990. A partir e de acordo com os dados disponíveis, obtiveram-se as cotas de talvegue correspondentes aos diferentes perfis, para diferentes datas, tendo-se representado esta informação na forma de perfis longitudinais: um para o eixo principal da albufeira e outro para o eixo da ribeira de Amiar. Estimou-se ainda a maior altura de depósitos sedimentares para a ribeira, por comparação das cotas dos perfis em 1985 e em 2001/2002 e de acordo com as linhas mais prováveis para os assoreamentos em 1984 e 1990. Finalmente, compilaram-se os dados para 1985 e 2002, quando existentes, para a obtenção gráfica de todos os perfis transversais, com exceção dos perfis a jusante do B7 (ribeira de Amiar), pelo facto dos correspondentes desenhos não se encontrarem cotados. Com base nestes dados, quantificou-se ainda o assoreamento entre 1985 e 2002 entre os perfis B1 e B7 e PB e PC.

Encontraram-se algumas discrepâncias nos valores das distâncias entre os perfis que estão indicadas nos documentos consultados e as medidas patentes no desenho para o eixo da ribeira de Amiar, assim como para duas cotas de talvegue de 1985 também desta área. Estas diferenças poderão ser resultado de erros no desenho ou nos valores tabelados, sendo que se adotaram para os perfis longitudinais os valores das cotas obtidos por medições no desenho, por não se terem dados tabelados para todos os perfis. No entanto, os valores tabelados das cotas foram usados para a estimativa do volume de depósitos de sedimentos ocorrido entre 1985 e 2002 e para a compilação dos perfis, por se considerarem valores mais precisos. As distâncias entre cada perfil e a barragem foram mantidas para todo o trabalho, correspondendo: no caso da ribeira de Amiar, aos valores obtidos através do desenho; no caso da albufeira, aos valores tabelados para o eixo principal, tal porque as distâncias dos perfis da ribeira à barragem não se encontram explicitadas em qualquer documento. Tiveram, assim, de ser obtidas por medições no desenho PH3762, às escalas 1:1000 e 1:25000. Estas distâncias foram obtidas pelo somatório das distâncias entre os pontos de interseção dos perfis com o eixo da ribeira, geralmente coincidentes com o talvegue dos perfis, e a distância em linha reta entre o talvegue do perfil B16 e o descarregador de fundo da barragem. Para os perfis PA, PB e PC somou-se a distância que foi medida entre a interseção dos perfis com o eixo P (eixo que corta os perfis desta área) e o talvegue do perfil B7.

Refere-se que existe ainda um levantamento hidrográfico por ecosonda, com recurso ao *software* de hidrografia *Hypack Max*, do braço da ribeira de Amiar, de fevereiro de 2004, realizado pela IOMAR – Recolha e Tratamento de Dados de Engenharia, Lda, que não foi, no entanto, utilizado por não se encontrar no formato de perfis transversais.

Importa ter em atenção que ocorreram intervenções, para além do desassoreamento de 1984, na zona da ribeira de Amiar devido à realização dos reforços de potência de Venda Nova II e III, uma vez que as tomadas de água dos dois novos circuitos hidráulicos se localizam nesta zona, em particular na zona dos perfis B13 e B14. Assim, admite-se que terão ocorrido alterações nesta área nos períodos dos vários abaixamentos de 2001 a 2004 e 2011 a 2015, necessários para a realização dos referidos reforços de potência. Por este motivo, e porque os dados mais recentes a que se teve acesso serem já de 2004, seria importante tornar a realizar o levantamento das cotas dos vários perfis da albufeira para estudo da situação atual, e que serviria de base para a previsão da evolução da sedimentação em albufeira. No entanto, não foi possível realizar esse trabalho no âmbito da presente dissertação.

Assim, e dado que o assoreamento ocorrido à data de 1984 é já abordado em 5.2.3.4, o estudo foi focado nos sedimentos acumulados entre 1985 e 2002, o que perante a inexistência de levantamentos recentes, pode fornecer uma base para melhor definir as localizações das amostragens de sedimentos.

5.3.2. AMOSTRAGENS DE SEDIMENTOS E ÁGUA

Realizou-se no dia 31 de maio de 2016, com apoio operacional da EDP Labeltec, um trabalho de campo de amostragem superficial de sedimentos de fundo e de água em quatro pontos previamente selecionados na albufeira de Venda Nova. Ou seja, pretendeu-se aplicar a metodologia proposta em 3.3 para monitorização da qualidade dos sedimentos na albufeira. A data escolhida resultou da necessidade de realizar as amostragens a tempo de a análise correspondente permitir a obtenção de resultados antes do final do prazo de entrega desta dissertação e que coincidissem com a calendarização de amostragens que a EDP Labeltec realiza para todo o conjunto de albufeiras da EDP Produção. Os trabalhos anteriores de análise da qualidade de sedimentos do fundo da albufeira quanto à presença de contaminantes haviam ocorrido em junho de 1979 e julho, agosto e setembro de 2014, pelo que a data escolhida não coincide exatamente com as anteriores e como tal é um fator a ter em conta aquando da interpretação dos resultados.

Numa primeira fase, identificaram-se os pontos em que a amostragem seria realizada. Na inexistência de um levantamento batimétrico recente da albufeira – que, por comparação com o levantamento de 1985, permitiria detetar as zonas em que está a ocorrer de forma mais crítica a acumulação de sedimentos e, ainda, determinar uma taxa média de deposição anual dos sedimentos –, recorreu-se à localização das amostragens de sedimentos e água realizadas previamente pela EDP Labeltec, já descritas em 2.5, e à informação da distribuição granulométrica dos sedimentos na albufeira, patente na Fig. 25.

No trabalho realizado pela EDP Labeltec, em 2014, foi recolhida uma amostra de sedimentos na zona junto ao descarregador de fundo da barragem, a cerca de 20 m a montante desta, com uma draga do tipo *Petite Ponar Grab* e foi ainda feita uma amostragem e análise da água na zona de contacto água-sedimento, utilizando uma garrafa de *Van Dorn*. A qualidade da água a várias profundidades é analisada periodicamente na albufeira em três estações de monitorização (Fig. 32) e a várias profundidades, sendo que nas estações de amostragem 1 e 2 são recolhidas amostras integradas da zona eufótica de superfície, à cota do teto da tomada de água (665m) e em profundidade. Na estação de amostragem 3 e devido à reduzida profundidade são recolhidas amostras à superfície e em profundidade (Rosa & Pádua, 2014).

Com base nesta informação, optou-se por localizar um dos pontos de amostragem no mesmo local de amostragem de sedimentos utilizado em 2014 por ser o único ponto em que se dispõe de todos os dados que permitem comparar e detetar eventuais alterações na qualidade dos sedimentos, tendo-se denominado esta estação de amostragem de 1.1 por se localizar perto da estação de monitorização da qualidade de água 1. Selecionaram-se ainda para a amostragem as estações de monitorização da qualidade de água 2 e 3, por permitirem uma análise da qualidade dos sedimentos e da água na zona central da albufeira e na ribeira de Amiar, respetivamente. A estação 1 não foi selecionada pela proximidade à estação 1.1, sendo que esta última estação tem uma maior relevância por receber sedimentos provenientes tanto do eixo principal da albufeira como sobretudo da ribeira de Amiar, para além da sua proximidade ao descarregador de fundo.

Finalmente, selecionou-se uma nova estação para monitorização da qualidade de sedimentos e da água, que se pretendia que fosse localizada numa zona da albufeira mais a montante. Com base no trabalho realizado por Costa (2004), que detetou a existência de areias grosseiras desde da zona de S. Fins até Souto da Bárbara (Fig. 25), optou-se pela localização desta nova estação nessa região da albufeira.



Fig. 32 – Localização das estações de amostragem de sedimentos e água

Assim, realizou-se as amostragens nas seguintes estações (Fig. 32):

- Estação 1.1: localizada perto da barragem de Venda Nova e a jusante da estação de monitorização da qualidade da água 1, local onde se deverá verificar a deposição dos sedimentos mais finos. Esta localização foi escolhida tendo por base que é a partir deste local que ocorre o efeito conjunto dos sedimentos transportados não só de montante da albufeira, mas também da ribeira de Amiar, que recebe efluentes e sedimentos da Mina da Borralha, ainda que inativa. Esta estação coincide com o local de amostragem de sedimentos utilizado nas campanhas de 2014, ou seja, localiza-se a cerca de 20 m a montante da barragem e junto ao descarregador de fundo.
- Estação 2: corresponde à localização da estação de monitorização da qualidade da água 2, na zona central da albufeira, onde existirá a deposição do material de calibre fino/intermédio;
- Estação 3: mesma localização da estação de monitorização da qualidade da água 3, sendo que esta zona recebe sedimentos provenientes da ribeira de Amiar e, como tal, a correspondente carga sedimentar será a que se prevê ser mais problemática em termos de qualidade pois transporta contaminantes (sobretudo metais pesados) da antiga Mina da Borralha;
- Estação 4: corresponde a uma nova localização, onde se pretende estudar a acumulação dos sedimentos mais grosseiros transportados pelo rio Rabagão. Selecionou-se o local de acordo com a previsão da distribuição dimensional de sedimentos.

Na Tabela 10 constam as coordenadas geográficas de cada estação de amostragem, de acordo com a EDP Labellec para as para as estações 1.1, 2 e 3, e com recurso ao *software Google Earth* para estabelecer as coordenadas da estação 4. Na mesma tabela, identificam-se ainda os perfis transversais mais próximos dos locais de amostragem, sendo que nesses mesmos perfis, que constam em 5.4.1, tentou-se localizar aproximadamente o ponto de amostragem correspondente.

Tabela 10 – Localização das estações de amostragem de sedimentos e água

Estação	Perfil	Zona	Coordenadas	
1.1	VN1	A 20 metros da barragem e a 40 m em linha reta do descarregador de fundo.	41°40'44.70"N	07°58'55.80"W
2	VN6	Entre as povoações de Sanguinhedo e Venda Nova, na zona central da albufeira.	41°40'33.10"N	07°58'03.20"W
3	B4	Ribeira de Amiar	41°40'04.90"N	07°58'58.70"W
4	VN22	Perto de Currais	41°41'59.87"N	07°56'27.30"W



Fig. 33 – Barco de apoio usado para as amostragens em Venda Nova (maio de 2016)

Uma segunda fase implicou selecionar os métodos de amostragem. Inicialmente foi pensado realizar uma recolha de colunas (perfis) verticais de sedimentos acumulados no fundo da albufeira, uma vez que permitiria perceber a evolução da qualidade dos sedimentos acumulados ao longo do tempo e comparar a mesma com os registos históricos da qualidade da água. Nesse sentido, procuraram-se contactar empresas que pudessem desenvolver esse trabalho, tendo-se analisado a possibilidade da sua realização com a Mota-Engil, como já referido em 3.3.4. No entanto, devido à sua complexidade e por tal implicar um custo que não estaria previsto para a realização deste estudo, esse trabalho não teve prosseguimento, pelo que foi apenas possível considerar a realização de amostragens superficiais dos sedimentos de fundo com a EDP Labelec. Para tal, foi necessário o apoio de um pequeno barco (Fig. 33) para deslocação às estações de amostragem e à recolha das amostras.

Para a recolha de sedimentos superficiais do fundo da albufeira em cada uma das estações recorreu-se à draga *Petite Ponar* da EDP Labelec (Fig. 34). O correspondente método de amostragem, para além de ter a desvantagem de a amostra ser apenas superficial, conduz a que os sedimentos sejam misturados, não sendo possível estudar a estratificação dos mesmos. Apesar disto, tem como vantagens ser economicamente viável e simples de efetuar, para além de não haver uma limitação da profundidade da coluna de água, o que poderia ser problemático em Venda Nova. O procedimento em campo consistiu em descer lentamente a draga no ponto de amostragem, sendo a corda de suspensão da draga amarrada ao barco após esta chegar ao fundo, e deixar a draga a fazer peso sobre o leito enquanto se procediam às amostragens de água. Terminadas as amostragens de água, procedeu-se à recolha da draga que,

quando a seco, foi aberta sobre um tabuleiro de plástico, sendo depois recolhida a amostra de sedimentos com uma pequena pá para um recipiente de plástico (Fig. 35).



Fig. 34 – Draga *Petite Ponar* da EDP Labelec (maio de 2016)



Fig. 35 – Colheita da amostra 1.1 de sedimentos de fundo (maio de 2016)

Após a descida da draga, foi feita a leitura direta dos valores de temperatura e oxigénio dissolvido para cada estação, através de uma sonda eletroquímica, ligada por um cabo graduado com métrica para leitura da profundidade de imersão ao equipamento eletrónico. Para cada estação, esses dados são recolhidos ao longo da descida da sonda desde 0,5 m de profundidade até ao fundo da albufeira, sendo o registo dos dados efetuados: até 20 m de profundidade, a cada metro; de 20 a 40 m de profundidade, de 2 em 2 metros; a partir de 40 m de profundidade, de 5 em 5 m, até se atingir o fundo, profundidade à qual se também realiza o registo. A profundidade máxima registada assume-se ser a profundidade da estação, sendo que esta informação foi depois usada para estabelecer a profundidade de descida da garrafa de *Van Dorn* e para se comparar com a profundidade prevista a partir dos perfis transversais dos levantamentos batimétricos.



Fig. 36 – Draga e amostrador *Hydro-Bios* (maio de 2016)



Fig. 37 – Disco de *Secchi* (maio de 2016)

Quanto às amostragens de água realizadas, importa primeiramente referir que estas tiveram como objetivos analisar a qualidade dos sedimentos suspensos e comparar a qualidade dos sedimentos com a qualidade da água. Neste sentido, procedeu-se à recolha de dois tipos de amostras: integradas, na zona eufótica, e em profundidade, na zona de contato da água com os sedimentos. As amostras integradas de

água foram recolhidas para cada ponto com recurso a um amostrador *Hydro-Bios*, representado na Fig. 36, ao passo que as amostras em profundidade foram recolhidas com uma garrafa de *Van Dorn*, patente na Fig. 38.

O amostrador *Hydro-Bios* (Fig. 36) permite a recolha de uma amostra desde 0,5 m de profundidade até à profundidade de recolha que for definida, havendo a entrada de água a uma taxa constante à medida que o amostrador é descido a uma determinada velocidade, ao longo da coluna de água. Tendo-se optado por fazer a amostragem na zona eufótica – ou seja, da zona na qual existe penetração suficiente da luz solar para permitir a fotossíntese –, por corresponder a uma zona em que se encontram muitos organismos, nomeadamente os autotróficos, e também por haver uma monitorização frequente da qualidade da água dessa zona em vários pontos da albufeira, o que permite uma comparação de resultados, tornou-se necessário determinar a que profundidade termina a referida zona. Para tal, foi então necessário recorrer a um disco de *Secchi* (Fig. 37) para que se efetuasse a medição da profundidade de penetração vertical da luz solar na coluna de água para cada estação, de forma a inserir essa informação no sistema do amostrador *Hydro-Bios*. O disco de *Secchi* consiste num disco metálico com 20 cm de diâmetro dividido em dois quadrantes pintados de preto e dois de branco e que é mergulhado na água com auxílio de uma corda graduada. O procedimento é simples, sendo necessário mergulhar o disco na água no lado da sombra e descê-lo lentamente até ao ponto em que se deixa de o observar. O valor da profundidade que deve ser registado é a média da menor profundidade a que não se vê o disco e aquela em que este ressurge no campo de visão. Como o olho humano não consegue ter uma correta perceção da profundidade a que a luz solar chega com o disco, devido a fenómenos de dispersão e reflexão, e devido à turvação, multiplica-se a profundidade obtida por um fator de correção (variável) que se assumiu como sendo 2,5. Após ter sido determinada a profundidade da zona eufótica, essa informação foi inserida no amostrador *Hydro-Bios* e determinada a velocidade de descida. Atingida a profundidade máxima da zona eufótica, o amostrador é recolhido por meio da corda e a mistura de água das diferentes profundidades da coluna de água da zona eufótica é distribuída por recipientes para que depois se analisassem os diversos parâmetros da qualidade da água. Foi necessário proceder a duas descidas do amostrador para cada estação de forma a ser recolhido um volume de água suficiente para todas as análises.



Fig. 38 – Garrafa de *Van Dorn* (maio de 2016)

A garrafa de *Van Dorn* (Fig. 38) foi usada para a recolha das amostras de água em profundidade, recorrendo-se desta forma ao mesmo método usado antes, em 2014, para avaliar a qualidade da água a uma distância vertical de cerca de 1 metro do leito da albufeira, para cada estação. Esta amostra tem interesse sobretudo por permitir avaliar a qualidade da água e dos sedimentos suspensos junto aos depósitos sedimentares da albufeira, e que apresentam teores de contaminantes intermédios entre os que se verificam para a água a menores profundidades e os dos sedimentos acumulados no leito da albufeira. A garrafa de *Van Dorn* foi mergulhada na água e descida lentamente até um metro da profundidade máxima estimada para essa estação de amostragem, de forma a evitar a entrada de sedimentos do leito, o que aconteceria caso se descresse a uma profundidade superior. Atingida a profundidade desejada, determinada através da graduação do comprimento da corda usada a descida da garrafa, deixa-se cair na vertical o peso associado à corda, o que conduz ao fecho das duas entradas de água da garrafa. O equipamento é posteriormente puxado para a superfície onde, após ter sido assegurado que não houve entrada de sedimentos de fundo, a água é distribuída pelos recipientes adequados para remessa para as análises de laboratório. À semelhança do que aconteceu com o uso do amostrador *Hydro-Bios*, foi necessária a descida por duas vezes da garrafa de *Van Dorn* para cada estação para se ter um volume de amostra suficiente.

Finalizadas as amostragens de água e sedimentos, todas as amostras recolhidas devidamente identificadas foram acondicionadas em geleiras, também corretamente identificadas, e preservadas termicamente a uma temperatura em torno de 4°C, com recurso a barras de gelo.

As amostras foram recolhidas nas estações de amostragem pela seguinte ordem, de acordo com as referências utilizadas (ver Fig. 32): 3, 1.1, 4 e 2. No Anexo V podem ser encontradas algumas fotografias dessas amostragens.

As condições climatéricas verificadas ao longo do dia foram ótimas para a realização do trabalho de campo, sendo que, segundo dados disponibilizados pelo IPMA, a temperatura média do ar rondou os 17°C com uma temperatura máxima de 24°C. O dia manteve-se com céu limpo, não tendo chovido. O vento apresentou direção predominante para o sul e intensidade máxima de 21 km/h e média de 4 km/h, tendo-se constatado que a intensidade do vento aumentou ao longo do dia.

Segundo os dados fornecidos no local e depois confirmados no SNIRH, o nível de água da albufeira de Venda Nova estava à cota 698,97 m (HICA), ou seja, a cerca de 1 m do NPA, como resultado de o mês de maio do corrente ano ter sido extremamente chuvoso, o que justifica que o referido nível tenha sido superior ao valor médio de 693 m correspondente a esse mês entre 1990 e 2015 (Fig. 20). De acordo com o resumo climatológico do IPMA, a nível nacional, foi o mês de maio mais chuvoso dos últimos 22 anos.

No decorrer do trabalho prático de amostragem detetaram-se algumas dificuldades, nomeadamente:

- A cota a que se encontra a superfície dos sedimentos na estação 1.1. foi muito distinta da obtida em 2014 pela EDP Labelec, pelo que se infere que a localização de amostragem não tenha sido exatamente a mesma, mais precisamente tenha sido mais próxima da margem esquerda. Esta zona da albufeira, como será analisado nos resultados, apresenta uma variação da cota do leito bastante acentuada ao longo da seção, de forma que, amostragens realizadas a poucos metros de distância podem apresentar uma profundidade consideravelmente diferente.
- Ainda na estação 1.1 a descida da garrafa de *Van Dorn* pela segunda vez, para recolha do volume de água para análise dos PCB e PAH ocorreu, erradamente, depois da recolha da draga, o que poderá introduzir erros nos resultados, uma vez que a subida da draga causa distúrbios nos

sedimentos do leito. Apesar disto, não foram detetados visualmente sedimentos na água recolhida nessa garrafa.

- Na estação 2, à semelhança do que ocorreu para a estação 1.1, assume-se que a recolha de sedimentos terá ocorrido alguns metros mais próxima da margem esquerda. Tendo sido a única recolha efetuada da parte da tarde, foi ainda afetada pelo facto do vento ter aumentado de intensidade, verificando-se alguma agitação da superfície da água, o que não ocorreu nas outras estações. Assim, o ligeiro afastamento do local de amostragem poderá ter estado na origem da diferença da cota prevista para a superfície dos sedimentos do leito e o aumento da agitação terá originado uma mais difícil leitura do disco de *Secchi*.
- Na estação 3, os sedimentos recolhidos apresentaram bastantes restos de vegetação, pelo que foi recolhido um volume de sedimentos inferior quando comparado com o das outras estações.
- Na estação 4 procedeu-se a duas descidas sem sucesso da garrafa de *Van Dorn* pois a garrafa vinha com alguns sedimentos que estariam acumulados no leito da albufeira. Para contornar este problema, decidiu-se, neste caso, proceder à recolha da amostra a uma distância ligeiramente superior a um metro da prevista para a superfície do depósito sedimentar. Após isto, as duas descidas seguintes do equipamento decorreram com sucesso.

5.3.3. PARÂMETROS ANALISADOS, PRÉ-TRATAMENTO DAS AMOSTRAS E MÉTODOS ANALÍTICOS

Dos parâmetros que se consideram mais relevantes de analisar nos sedimentos de fundo, que foram propostos na Tabela 6 em 3.3.6 para este tipo de estudo, selecionaram-se alguns de acordo com o levantamento das fontes de poluição da albufeira de Venda Nova, que consta em 5.2.4. Segue-se uma enumeração desses parâmetros:

- Granulometria;
- Descrição da aparência, textura, odor e cor;
- Metais: alumínio, arsénio, cádmio, chumbo, cobre, crómio, estanho, ferro, manganês, mercúrio, níquel e zinco;
- Orgânicos e nutrientes: Carbono Orgânico Total (TOC), fósforo total, azoto Kjeldahl, azoto amoniacal, Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (PAH), Bifenilpoliclorados (PCB) e Hidrocarbonetos Petrolíferos Totais (TPH).

Destaca-se a importância de avaliar a concentração em metais, sobretudo o cobre, mercúrio e arsénio, uma vez que foram detetadas contaminações por estes metais nas zonas de resíduos do Couto Mineiro da Borralha e que têm a potencialidade de chegar à albufeira por transporte fluvial e sedimentar na ribeira de Amiar. Comparativamente com os estudos de contaminação dos sedimentos que já foram efetuados na albufeira de Venda Nova, que tenderam a focar-se nas contaminações por metais e na análise da granulometria, destaca-se a inclusão no presente trabalho de alguns parâmetros de substâncias orgânicas e de nutrientes, que procuram analisar uma eventual efluência dos postos de combustível e de algumas fontes difusas de poluição.

As análises à qualidade da água consistiram em avaliar, em paralelo, os mesmos parâmetros avaliados nas amostras de sedimentos, sendo que nas de água se analisaram os metais nas formas dissolvida e total. Adicionalmente, fez-se o perfil da temperatura e oxigénio dissolvido ao longo da coluna de água para cada estação com recurso a uma sonda eletroquímica, *in situ*, e determinaram-se os Sólidos Suspensos Totais (SST), azoto total, dureza, pH, alcalinidade TA (carbonatos) e TAC, turvação, nitritos, nitratos e descritivamente o cheiro e cor da água, em laboratório.

O pré-tratamento das amostras de sedimentos consistiu, primeiramente, em deixar repousar as amostras numa estufa de forma a que fosse removida a água. Este passo foi bastante moroso, sobretudo para a amostra da estação 2, uma vez que os sedimentos têm de secar a uma temperatura controlada entre os 35 e os 40 °C para que não se altere a composição destes.

Seguidamente, procedeu-se à separação das diferentes frações necessárias para as análises a realizar, com recurso a crivos. No ensaio de granulometria para cada uma das quatro amostras, começou-se por remover manualmente restos de vegetação e, depois da seleção de uma subamostra por quartejamento, utilizou-se um crivo de malha 6,3 mm para remover algum material de maior dimensão ainda existente. De referir que foi possível remover durante este processo alguns plásticos, mas sobretudo vegetação para a amostra da estação 3. Depois, procedeu-se então à passagem sucessiva pelos crivos: 3,55 mm, 2 mm, 1 mm, 500 µm, 250 µm, 125 µm e 63 µm, pesando-se a massa retida em cada crivo. Uma vez que as análises das substâncias orgânicas devem ser efetuadas na fração de sedimentos inferior a 2 mm e dos metais na fração inferior a 63 µm, de acordo com o DL n.º 103/2010, de 24 de setembro, no decorrer do ensaio para determinação de granulometria retiraram-se porções de sedimentos em quantidade suficiente para realizar as diversas determinações, nomeadamente 2 g da fração inferior a 63 µm, que foi guardada num recipiente plástico, e 120 g da fração inferior a 2 mm, guardada num recipiente de vidro. Os sedimentos que sobraram foram guardados num terceiro recipiente plástico, para cada estação.

O terceiro passo do pré-tratamento das amostras de sedimentos consistiu numa digestão em micro-ondas com água-régia.

O pré-tratamento das amostras de água implicou a filtração de parte das amostras para obter os resultados para a fase dissolvida. Para a determinação da concentração total em metais nas amostras de água, estas foram igualmente digeridas em micro-ondas, mas apenas com ácido nítrico. Para a determinação da concentração dos metais na fase dissolvida, as amostras de água foram filtradas com uma membrana de porosidade 0,45 µm e acidificadas a pH inferior a 2 com ácido nítrico.

Os métodos de análise podem ser consultados no Anexo VI, referindo-se que todas as análises laboratoriais foram realizadas pela EDP Labelec, com exceção dos seguintes parâmetros: PAH, PCB e TPH para as amostras de água, e azoto Kjeldahl, TOC, PAH, PCB e TPH para os sedimentos, que foram analisados por um laboratório externo.

5.4. RESULTADOS

5.4.1. EVOLUÇÃO DA QUANTIDADE DE SEDIMENTOS ACUMULADOS EM ALBUFEIRA

Na Fig. 39 apresenta-se a representação gráfica das cotas de talvegue dos 38 perfis transversais do eixo principal da albufeira de Venda Nova (ver Anexo IV) para 1985, o único ano para o qual se conseguiram recolher dados para o eixo principal, e ainda a cota (609,50 m) da base do gradeamento que protege a descarga de fundo. Os valores das cotas de talvegue já tinham sido tabelados previamente à realização da presente dissertação para um estudo da EDP das ondas de inundação na albufeira de Venda Nova, tendo sido estes os dados utilizados. No entanto, procedeu-se à verificação destes valores com os valores das cotas de talvegue dos perfis transversais, tendo-se constatado que dois valores eram distintos, nomeadamente para os perfis VN1 e VN2, ou seja, os dois perfis mais próximos da barragem (a 10 m e 281 m). Para ambos os resultados, entre VN1 e VN2, a cota de talvegue varia um metro de altura, mas enquanto os dados tabelados indicam uma passagem de 609,51 m para 610,52 m, os dos perfis transversais apresentam os valores 625,01 m e 626,00 m. Não foi possível esclarecer em tempo útil para a presente dissertação a incoerência nestes dados, mas tendo em consideração que a descarga de fundo

se localiza à cota 612 m, supõem-se que as cotas da tabeladas correspondam a uma situação sem qualquer assoreamento e, como referido, foram os valores adotados para o perfil longitudinal.

Refere-se que na Fig. 39 estão assinalados a laranja os pontos correspondentes aos perfis VN1, VN6 e VN22, que são os perfis mais próximos das estações de amostragem 1.1, 2 e 4, respetivamente.

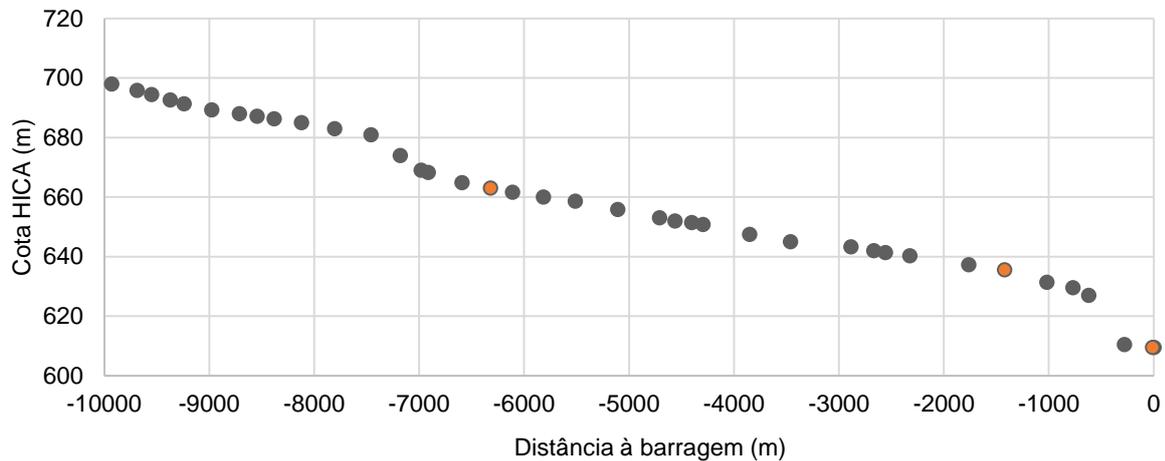


Fig. 39 – Perfil longitudinal para o eixo principal da albufeira de Venda Nova em 1985

Na Fig. 40 encontram-se a representação gráfica das cotas de talvegue de 16 perfis transversais na ribeira de Amiar para 1985 (não se encontram representados os perfis PA, PB e PC por se localizarem numa ramificação) (ver Fig. 26), estando marcado a preto o ponto correspondente à estação de amostragem 3 (perfil B4). Para as estimativas de assoreamentos para 1984 e 1990, assim como para os levantamentos de 2001 e 2002, não existem dados para todos os perfis que foram levantados em 1985, apresentando-se os dados disponíveis. Refere-se que na Fig. 40 não se encontram representadas as cotas de talvegue em 2001, uma vez que a máxima diferença verificada quando comparativamente com os dados de 2002 corresponde a 53 cm para o perfil B6, evitando-se assim sobrecarregar o gráfico com mais informação.

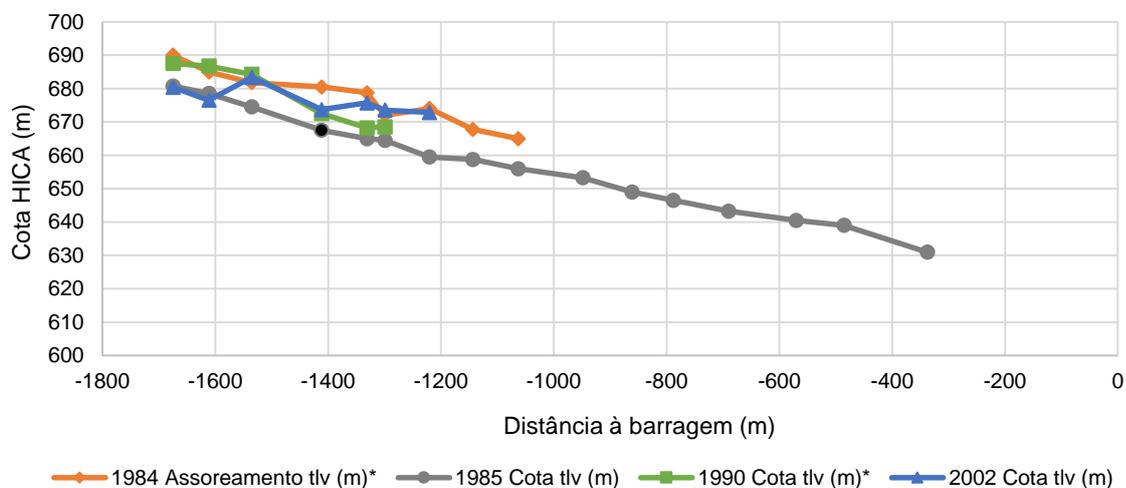


Fig. 40 – Perfil longitudinal para o eixo da ribeira de Amiar na albufeira de Venda Nova

Analisando a Fig. 40 constata-se que o assoreamento de 1984, sobretudo pelo curto espaço temporal em que ocorreu (1977 a 1984), levou globalmente às maiores acumulações de sedimentos na ribeira de Amiar com a maior espessura de sedimentos acumulados desde o leito original (cota de 1985 depois do desassoreamento) de cerca de 16 m na zona correspondente ao perfil B7. A menor espessura verificada ocorreu para o perfil B2 com cerca de 7,50 m de depósitos sedimentares. Segundo a estimativa de assoreamento em 1990, a maior espessura de sedimentos ocorria para o perfil B3 com 11,50 m. Já para os anos de 2001 e 2002, verificou-se a maior espessura de sedimentos na zona correspondente ao perfil B7 com cerca de 18 m, sendo este o valor mais elevado obtido em todas as comparações efetuadas com as cotas de 1985. Para o perfil B4, verificou-se a maior espessura de sedimentos em 1984 com cerca de 13,50 m, ao passo que em 1990 previa-se 5,50 m e em 2001 e 2002 cerca de 6,50 m. Assim, denota-se que a distribuição espacial de sedimentos acumulados no fundo da albufeira na zona da ribeira de Amiar não será uniforme, havendo uma evolução ao longo do tempo. Isto ocorrerá devido à variação da intensidade da produção de sedimentos e também à capacidade de transporte destes pela ribeira.

Numa estimativa que deve ser vista com as respetivas limitações que tem, prevê-se que entre 1985 e 2002 entre os perfis B1 e B7 e entre PB e PC tenham-se acumulado cerca de 118.013 m³ de sedimentos no fundo da albufeira. Neste valor foi obtido por determinação da área inundada para cada perfil para os dois anos por cálculo numérico seguindo a regra dos trapézios, procedendo-se de seguida à diferença entre a área em 2002 e em 1985 para todos os perfis e terminando-se com o cálculo do volume de sedimentos obtido por aplicação da regra dos trapézios entre os vários perfis, uma vez conhecida a distância aproximada entre estes. Apesar deste valor ser significativamente inferior ao obtido em 1984 em que se removeram no desassoreamento cerca de 300.000 m³ de sedimentos, importa ter em atenção que a área considerada é diferente, pois em 1984 o volume de sedimentos removido estava depositado ao longo do braço da ribeira de Amiar e chegou inclusive à descarga de fundo, enquanto que esta estimativa vai só até à zona do perfil B7, que se encontra a 1221 m da barragem. Tendo em consideração estas limitações, o assoreamento específico nesta zona da ribeira foi de 6942 m³/ano em média ao longo de 17 anos (1985 a 2002), e contribuiu com uma perda de capacidade total de armazenamento da albufeira de 0,125% (0,0073%/ano) e, caso se considerasse que todo o volume perdido está incluído no volume morto da albufeira, uma perda de 8% do volume morto (0,5%/ano).

Uma vez que a Mina da Borralha encerrou em 1986, seria previsível que a acumulação de sedimentos na zona da ribeira de Amiar diminuísse, no entanto, tal como se abordou em 5.2.4, existem ainda acumulações de resíduos da Mina da Borralha que aparentam continuar a alimentar a ribeira com sedimentos e que apresentam contaminações em alguns metais como o cobre, mercúrio e arsénio.

Por este motivo, e por se desconhecer a atual situação da ribeira de Amiar, uma vez que já passaram mais de 10 anos desde o último levantamento, volta-se a reforçar a importância de se proceder a um novo levantamento de toda a albufeira. Paralelamente, seria aconselhável que tivesse prosseguimento uma reabilitação e/ou estabilização dos taludes dos depósitos de resíduos da Mina da Borralha, uma vez que isto poderá resolver grande parte do problema sem ter de se recorrer a medidas mais dispendiosas de proteção e operacionais, tais como algumas das descritas em 4.2.

Finalmente, apresentam-se seguidamente os perfis transversais que se obteve por representação das cotas do fundo da albufeira para 1985 nos pontos de maior interesse, que correspondem às zonas em que se efetuaram as amostragens de sedimentos superficiais do fundo da albufeira e de água para avaliação da sua qualidade.

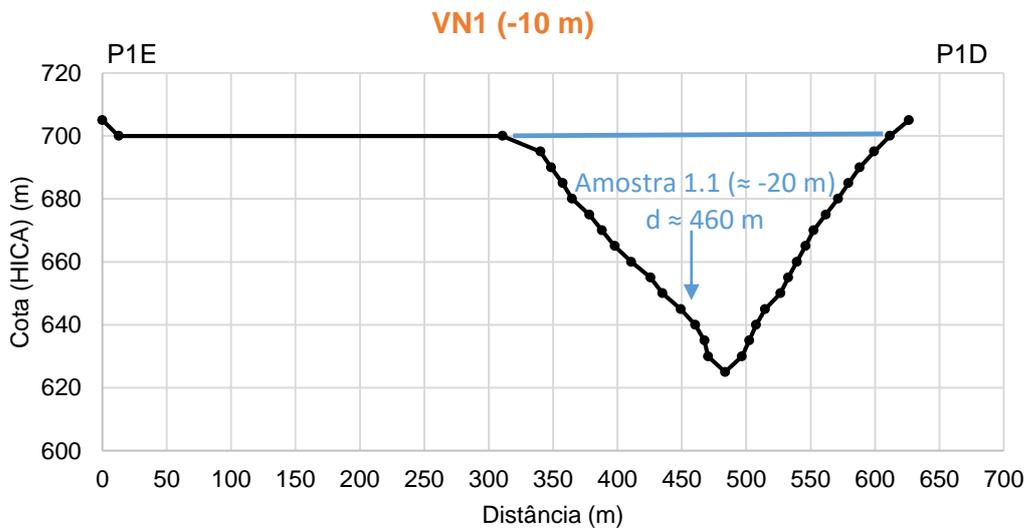


Fig. 41 – Perfil transversal na zona da estação de amostragem 1.1

Na Fig. 41 encontra-se representado o perfil VN1 do eixo principal da albufeira, a 10 m da barragem de Venda Nova. Destaca-se que nesta zona a variação da cota do fundo da albufeira ao longo do perfil é brusca e, portanto, torna-se complicado que, com o uso de uma draga *Petite Ponar* para recolha de sedimentos superficiais do leito, a amostragem seja feita no local que se pretende. A localização da estação de amostragem 1.1, a 20 m da barragem, faria prever pelo referido perfil que os sedimentos seriam recolhidos a uma cota entre os 640 e 645 m, tendo-se efetivamente realizado a recolha à cota 644 m. No entanto, as recolhas efetuadas para as mesmas coordenadas em julho e setembro de 2014 ocorreram à cota 624 m e em agosto à cota 615 m, o que demonstra a dificuldade em usar a draga para coordenadas fixas nesta zona. Infere-se então que, mesmo com acumulação de mais sedimentos entre 2014 e 2016, a amostragem no presente ano terá ocorrido uns metros em direção à margem esquerda relativamente às amostragens de 2014. Como já referido anteriormente existe uma incoerência entre as cotas de talvegue para os perfis VN1 e VN2 e as cotas de talvegue tabeladas que foram usadas para o perfil longitudinal, colocando-se a hipótese de que estes perfis transversais podem eventualmente corresponder a uma situação de assoreamento, nomeadamente a de 1984, sendo que é uma questão que não foi possível esclarecer no decorrer da dissertação.

Presente na Fig. 42 encontra-se o perfil transversal VN6, a 1419 m da barragem, na zona central da albufeira e correspondente à zona da estação de amostragem 2. De acordo com as coordenadas desta estação previa-se que a recolha de sedimentos de fundo ocorresse para a cota 637 m, até porque as recolhas de amostras de água em 2014 indicavam em média que a superfície dos sedimentos estaria à cota 636 m. No entanto, a amostragem foi realizada à cota 647. Pensa-se que tal terá ocorrido porque, tendo sido feita a recolha nesta estação da parte da tarde em que já se verificava alguma agitação da superfície da água, o local da recolha tenha sido a vários metros do local indicado pelas coordenadas geográficas da estação de monitorização de água 2. De acordo, com as observações feitas no dia da recolha, a amostragem terá ocorrido na margem esquerda.

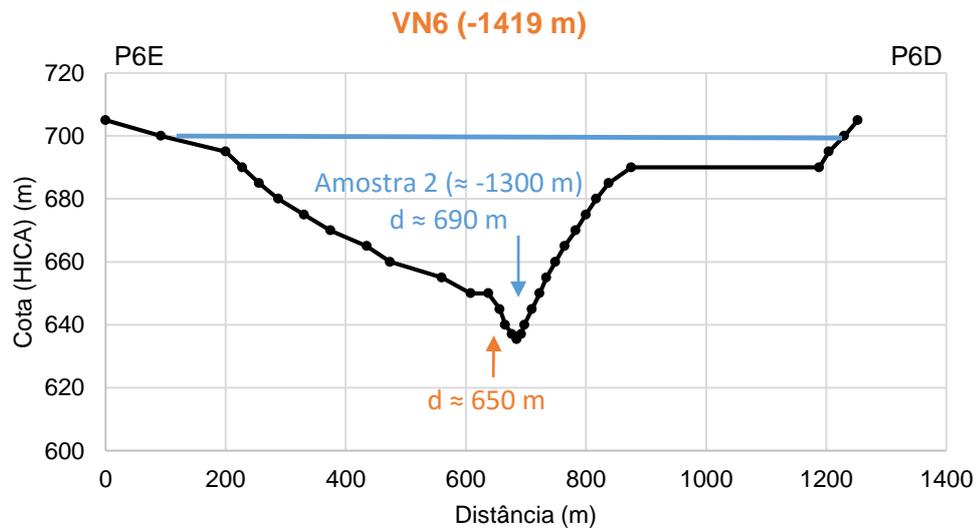


Fig. 42 – Perfil transversal na zona da estação de amostragem 2

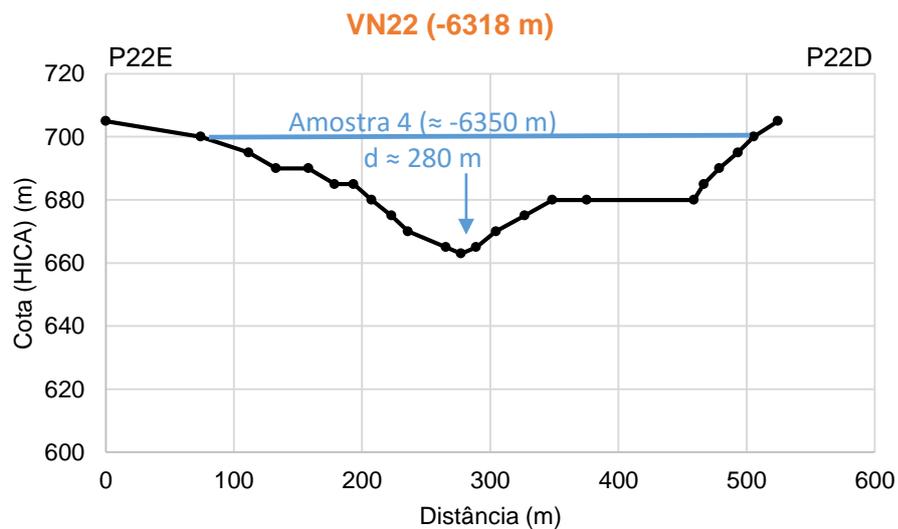


Fig. 43 – Perfil transversal da zona da estação de amostragem 4

Na Fig. 43 consta o perfil transversal VN22, a 6318 m da barragem, correspondente à zona da estação de amostragem 4, na região mais a montante da albufeira. De acordo com a morfologia do fundo da albufeira nesta zona e com base na localização de amostragem, os sedimentos recolhidos estariam a uma cota entre 663 e 665 m em 1985, tendo-se feito a sua recolha à cota aproximada de 664 m em 2016.

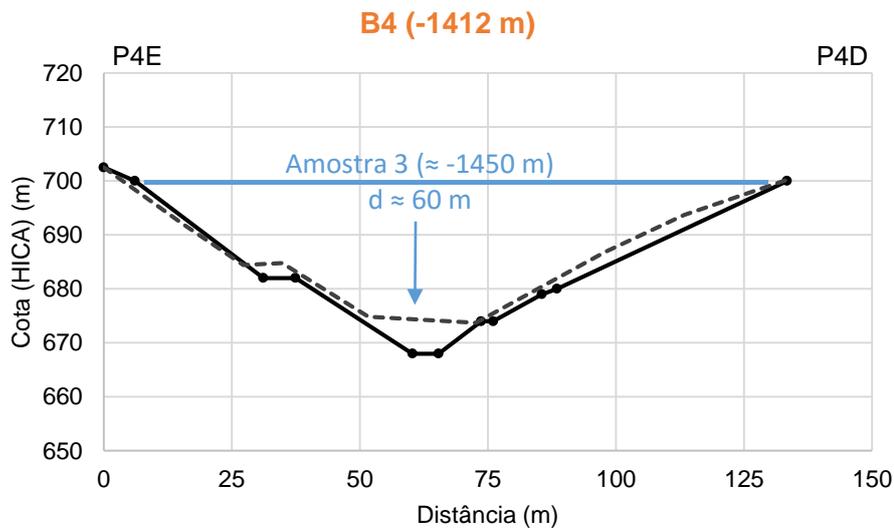


Fig. 44 – Perfil transversal da zona da estação de amostragem 3 (ribeira de Amiar)

Na Fig. 44 estão representados os perfis transversais B4 do eixo da ribeira de Amiar, a 1412 m da barragem, para 1985 e a tracejado para 2002. De acordo com as coordenadas do ponto de amostragem, previa-se que a recolha de sedimentos ocorresse a uma cota entre 673 e 675 m, de acordo com os dados de 2002, tendo-se efetivamente recolhido sedimentos à cota 674 m para o presente estudo, sendo que em 2014 as recolhas das amostras de água em profundidade indicavam em média que os sedimentos estariam à cota 673 m. Neste ponto, o leito rochoso da ribeira, que se assume corresponder à situação em 1985, está à cota 668.

Assim, constata-se que, embora em algumas estações de amostragem os sedimentos tenham sido recolhidos a uma cota próxima da prevista e até semelhante à verificada em 1985 ou 2002, não se pode basear neste tipo de informação para estudar as variações morfológicas no fundo da albufeira decorrentes da erosão e/ou acumulação de sedimentos porque a draga não tem um peso suficiente para descer verticalmente no ponto desejado sem se desviar, especialmente se houver alguma agitação da água, devido à incerteza do sistema de GPS utilizado e mesmo pela movimentação do barco usado durante a amostragem. Apesar disto, os dados obtidos dão a indicação que a situação poderá ter-se estabilizado na ribeira de Amiar na zona analisada. Sendo a zona da albufeira da ribeira de Amiar e a zona junto à barragem as mais problemáticas em termos de acumulação de depósitos sedimentares, esta informação deve ser corretamente confirmada através de um levantamento batimétrico, para além de que se deve ser o cuidado de analisar se, mesmo que não esteja a ocorrer uma variação acentuada na morfologia do fundo do braço da ribeira de Amiar, não estará a ocorrer um aumento significativo dos depósitos de sedimentos junto ao descarregador de fundo por arrastamento dos sedimentos de montante.

5.4.2. ANÁLISE DA QUALIDADE DOS SEDIMENTOS

Por observação das amostras de sedimentos (Fig. 45, Fig. 46, Fig. 47 e Fig. 48), após secas em estufa a temperaturas compreendidas entre os 35 e os 40 °C, constatou-se que os sedimentos depositados na zona da estação 1.1 e 2 apresentam-se como aqueles com maiores semelhanças em termos de aparência e cor. Já os sedimentos da estação 3 e da estação 4 apresentam uma cor mais escura, mas distinguem-se facilmente pela existência em abundância de restos de vegetação na amostra da ribeira de Amiar, tal como já se tinha verificado em campo (Anexo V), e ainda por a amostra da estação 4 possuir partículas aparentemente mais grosseiras (Fig. 48). Em termos de odor não se verificou qualquer particularidade nas quatro amostras de sedimentos, destacando-se, no entanto a deteção de algum odor a lodo durante o trabalho em campo de amostragem.



Fig. 45 – Amostra de sedimentos da estação 1.1 (20 m da barragem)



Fig. 46 – Amostra de sedimentos da estação 2 (centro da albufeira)



Fig. 47 – Amostra de sedimentos da estação 3 antes e após remoção de alguma vegetação (ribeira de Amiar)



Fig. 48 – Amostra de sedimentos da estação 4 (zona de montante da albufeira)

Na Tabela 11 constam os resultados do ensaio de granulometria. Por análise destes resultados foi possível comprovar as observações acima descritas de que as amostras de sedimentos das estações 1.1 e 2 são as mais semelhantes em termos físicos. A estação 1.1, como seria de esperar pela distribuição que se verifica em teoria numa albufeira, foi a que apresentou uma maior percentagem de silte e areia muito fina ($< 63 \mu\text{m}$), sendo que se denota que as principais diferenças de distribuição granulométrica das partículas relativamente à estação 2 ocorrem para as frações mais finas analisadas, nomeadamente as frações inferiores a $250 \mu\text{m}$, com a estação 1.1 a apresentar maior percentagem destas em detrimento da fração superior a 2 mm.

Por sua vez, a estação 4 apresenta uma percentagem da fração superior a 2 mm significativamente inferior às estações 1.1 e 2, assim como uma percentagem da fração de 63 μm próxima da verificada na estação 1.1, ao contrário do que se previa. No entanto, por observação da Fig. 48, constata-se que embora a percentagem de sedimentos com dimensões superiores a 2 mm seja menor para esta amostra, a fração em causa é mais grosseira do que a observada para as estações 1.1 e 2. A elevada deposição na zona da estação 4 das frações inferiores a 250 μm (51,8% da amostra), que chega a ser superior à verificada em todas as outras estações, incluindo a estação 1.1 (20,0%) e 3 (46,6%), pode indicar que nesta zona da albufeira a capacidade de transporte fluvial dos sedimentos seja inferior. Apesar desta possibilidade, o facto de os sedimentos da estação 4 apresentarem uma cor diferente dos sedimentos das estações 1.1 e 2, leva a inferir que os sedimentos terão uma origem geológica distinta dos existentes na zona mais a jusante da albufeira. A cor mais clara dos sedimentos em 1.1 e 2 pode indicar a deposição de sedimentos com origem na erosão dos afloramentos de aplitos e pegmatitos, cuja incidência nas margens da albufeira é superior mais para jusante, assim como ser indicativo da natureza geológica da zona envolvente à albufeira, em que predominam granitos porfíroides essencialmente biotíticos nas zonas mais a montante da albufeira (a norte de Pondras) e do braço da ribeira de Amiar, ao passo que nas restantes zonas predominam xistos pelíticos, quartzíticos e rochas calcossilicatadas e de liditos (ver 5.2.3.3).

Tabela 11 – Profundidade e cota da colheita e resultados dos ensaios de granulometria

	Estação 1.1.	Estação 2	Estação 3	Estação 4
Profundidade de colheita (m)	56	52	25	35
Cota da superfície dos sedimentos (m)	643	647	674	664
Granulometria:				
Superior a 2 mm (%)	53,4	66,8	12,5	23,7
Inferior a 2 mm (%)	46,6	33,2	87,5	76,3
1 a 2 mm (%)	14,2	15,7	9,5	11,7
500 a 1000 μm (%)	7,9	8,0	28,0	5,9
250 a 500 μm (%)	4,5	3,9	3,5	6,9
125 a 250 μm (%)	3,6	0,2	16,0	21,7
63 a 125 μm (%)	4,0	2,4	21,2	19,6
Inferior a 63 μm (%)	12,4	3,0	9,4	10,5

Finalmente, a estação 3 (ribeira de Amiar) é a que apresenta a menor percentagem de sedimentos da fração superior a 2 mm, o que poderá ser consequência da menor capacidade de transporte de sedimentos pela ribeira de Amiar em comparação com o rio Rabagão, mas também do transporte do produto da erosão dos depósitos sedimentares das zonas de resíduos do Couto Minério da Borralha. Denota-se que para as frações inferiores a 250 μm a amostra apresenta valores semelhantes aos verificados para a estação 4, o que suporta a influência da natureza geológica da zona envolvente à albufeira na distribuição da granulometria dos sedimentos acumulados na albufeira.

Assim, globalmente, verifica-se uma elevada dispersão das granulometrias analisadas, pelo que se pode inferir que algumas granulometrias de sedimentos mais grosseiros sofrem pouco transporte, depositando-se na zona em que são geradas. O facto de as características geológicas da zona envolvente à albufeira variarem poderá ser um importante fator para que a distribuição granulométrica na albufeira não seja uniforme, já que os dados obtidos parecem indicar uma correlação entre estes.

Na Tabela 12 apresentam-se os resultados obtidos para o teor em metais na fração inferior a 63 µm dos sedimentos. Os metais maioritários presentes nas amostras recolhidas são o alumínio, cobre, ferro e manganês, destacando-se que o alumínio é um elemento de referência uma vez que não é afetado pelos processos biológicos e diagenéticos (mudanças nas condições de pressão, temperatura, pH, entre outros, após a deposição dos sedimentos).

Tabela 12 – Teor em metais na fração inferior a 63 µm dos sedimentos em maio de 2016

Fração < 63 µm (base seca a 105°C)	Estação 1.1.	Estação 2	Estação 3	Estação 4
Alumínio (mg/kg)	92000	93000	77000	69000
Arsénio (mg/kg)	74	218	38	31
Cádmio (mg/kg)	2,1	2,6	0,94	0,76
Chumbo (mg/kg)	99	106	43	23
Cobre (mg/kg)	892	1162	412	84
Crómio Total (mg/kg)	47	44	43	39
Estanho (mg/kg)	15	< 8,2	13	< 7,7
Ferro (mg/kg)	50000 (5,0%)	85000 (8,5%)	34000 (3,4%)	32000 (3,2%)
Manganês (mg/kg)	680	1140	530	400
Mercúrio (mg/kg)	0,54	0,69	< 0,38	0,53
Níquel (mg/kg)	27	27	19	23
Zinco (mg/kg)	207	230	137	138
Algumas características da água perto da zona de contacto água-sedimento:				
Temperatura (°C)	8,9	8,9	10,1	9,5
OD (mg/L)	7,4	8,0	7,4	7,9
SST (mg/L)	< 5,0	< 5,0	< 5,0	< 5,0

Comparando-se os resultados obtidos para as quatro estações de amostragem com os valores de referência das Normas de Ontário (*Guideline for use at contaminated sites in Ontario, 1997*), genericamente mais exigentes, que constam no Anexo I, pode-se averiguar que:

- O teor em arsénio ultrapassa para todas as estações o nível de efeitos menores das Normas de Ontário, sendo que apenas na estação 4 não é ultrapassado o nível de efeitos severos. Os sedimentos da estação 2 apresentaram um valor muito elevado de arsénio, sendo que deve ser

investigada a causa deste resultado. Embora Ribeiro (2010) tenha detetado uma contaminação de arsénio (83 mg/kg) na lagoa de decantação nas escombrelas da Mina da Borralha, a concentração de arsénio na água e nos sedimentos na ribeira de Amiar e na Mina da Borralha poderá não explicar a elevada concentração existente nos sedimentos na estação 2, pelo que será possível que exista outra fonte de entrada desta substância na albufeira, mas que não foi identificada nesta dissertação.

- Similarmente ao arsénio, as concentrações de cobre, a substância mais estudada previamente a esta dissertação para a albufeira de Venda Nova, são superiores ao nível de efeitos menores para todas as estações, com somente a estação 4 a apresentar uma concentração inferior à do nível de efeitos severos.
- O teor em ferro é superior ao nível de efeitos menores para todas as estações, sendo que na estação 1 e 2 é superior ao nível de efeitos severos.
- A concentração em manganês dos sedimentos ultrapassa o nível de efeitos menores para as estações 1, 2 e 3, sendo que na estação 2 é ultrapassado o nível de efeitos severos. A estação 4 apresenta um teor abaixo do nível de efeitos menores.
- Os teores em cádmio, crómio, mercúrio, níquel e zinco ultrapassam para todas as estações o nível de efeitos menores das Normas de Ontário, mas não o nível de efeitos severos.
- O teor em chumbo é apenas inferior ao nível de efeitos menores para a estação 4, estando abaixo do nível de efeitos severos para todas as restantes estações.
- As Normas de Ontário não estipulam valores de referência para o alumínio ou para o estanho.

Assim, conclui-se que as principais contaminações de metais associadas aos sedimentos dos depósitos do fundo da albufeira de Venda Nova são de arsénio, cobre, ferro e manganês.

Relativamente à distribuição espacial dos metais pelas quatro estações, apurou-se que os sedimentos superficiais acumulados na zona da estação de monitorização 2 são aqueles que apresentam o maior teor em todos os metais, com exceção do crómio e estanho que apresentam valores superiores na estação 1.1. Por outro lado, como seria previsível pela distância à Mina da Borralha, os sedimentos da estação 4 são aqueles que exibem as menores concentrações de metais sendo, no entanto, observadas concentrações ligeiramente inferiores dos metais níquel e zinco na estação 3, onde a concentração de mercúrio é notoriamente a inferior comparativamente com todas as estações.

Era expectável que as concentrações obtidas para os metais analisados nos sedimentos da estação 1.1 estivessem compreendidas entre as obtidas para as estações 2 e 3, já que a zona da barragem recebe sedimentos e afluência de água simultaneamente da ribeira de Amiar e do rio Rabagão. Verificou-se essa situação, no entanto, constatou-se que as concentrações dos metais na estação 2 são muito superiores aos verificados na estação 3, com exceção do crómio e estanho. Uma vez que a Mina da Borralha será a principal origem dos metais que entram na albufeira, pela ribeira de Amiar, o que é comprovado pelos resultados obtidos para a estação 4 e pelas análises de água da estação 3, estes dados levam à dedução de que os metais são transportados dissolvidos na água e pelos sedimentos em suspensão no sentido da estação 2. A intermédia concentração dos metais na estação 1.1 poderá ser então resultado da realização de descargas de água na barragem e pelo funcionamento nessa zona de uma tomada de água do circuito hidráulico de Venda Nova/Vila Nova, que levam para jusante alguma da carga poluente.

Já no estudo de Vale et al. (1980) em que se estudou a distribuição da concentração de cobre nos sedimentos de fundo da albufeira de Venda Nova recolhidos em 1979 em 15 estações, tinha-se constatado alguns dos valores mais elevados deste metal para a zona central da albufeira, com o ponto mais perto da zona de amostragem da estação 2 a apresentar uma concentração de 1405 mg/kg. No referido trabalho foi

feita uma divisão da albufeira em função da qualidade dos sedimentos quanto ao cobre, que se apresenta na Fig. 49. Constatam-se que todos os valores obtidos para as estações 1.1 e 2 estão dentro da gama de concentrações de cobre para essa zona em 1979, ao passo que os dados para as estações 3 e 4 se encontram abaixo do previsto, com a estação 3 a apresentar uma concentração inferior a 500 mg/kg e a estação 4 uma concentração inferior a 100 mg/kg. Já as concentrações em ferro, zinco e manganês aparentam ter aumentado na albufeira relativamente a 1979, com exceção do manganês para a estação 3.

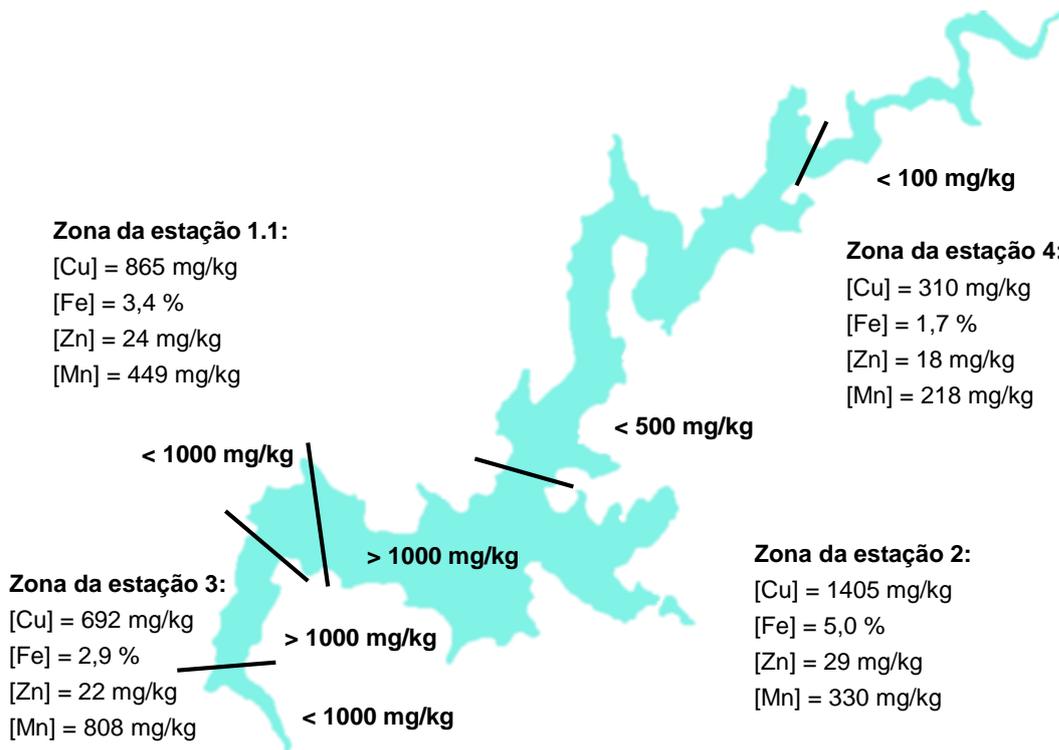


Fig. 49 – Distribuição de cobre total nos sedimentos da albufeira de Venda Nova em 1979 (Vale et al., 1980)

Uma vez que os dados de 1979 datam a um período em que a Mina da Borralha era ainda explorada, tendo encerrado apenas em 1986, seria previsível que as concentrações de metais tivessem diminuído na albufeira, já que os sedimentos que foram recolhidos em 2016 são superficiais e, portanto, reflexo da qualidade dos sedimentos que estão a ser depositados. Isto é suportado pelo facto de que a zona da ribeira de Amiar, assim como a zona da albufeira junto à barragem, foram alvo de um desassoreamento em 1984, tendo sido removido praticamente todo o material aí acumulado, pelo que o material recolhido é necessariamente posterior a 1984 para a estação 1.1 e 3. No entanto, continuam a existir elevados teores de metais distribuídos pela albufeira, pelo que se reforça a ideia já apresentada, nesta dissertação, de que a Mina da Borralha continua a ter uma forte influência na quantidade e qualidade dos sedimentos que dão entrada na albufeira, assim como na qualidade da água.

Finalmente, os resultados obtidos para a ribeira de Amiar serão reflexo de vários fatores. A aparente menor concentração dos metais nesta zona comparativamente às estações 1.1 e 2, como consta na Tabela 12, poderá ser efeito da acumulação preferencial dos metais numa zona mais a jusante da ribeira como a Fig. 49 explicita. Para além disso, esta é a zona em que se verifica uma menor profundidade da coluna

de água sendo que tal permitirá a existência de uma comunidade de seres vivos distintos de outras zonas da albufeira, o que é apoiado pela retirada de uma elevada quantidade de restos de vegetação aquando da recolha da amostra de sedimentos na estação 3. Como foi referido em 5.2.3.5, em 1980 identificaram-se espécies de algas que são capazes de diminuir a toxicidade do meio ao produzirem substâncias orgânicas que atuam como quelantes e ao fixarem iões metálicos. Assim, caso esta comunidade ainda esteja presente é possível que seja um fator contributivo para a diminuição da concentração dos metais nos sedimentos e na água. A natureza geológica distinta dos sedimentos desta zona relativamente às zonas 1.1 e 2, como foi previamente abordado, é reforçada pelo teor em alumínio dos sedimentos nestas estações, e será um fator que poderá igualmente influenciar a qualidade dos sedimentos quanto aos contaminantes em estudo.

Tabela 13 – Concentração em metais dos sedimentos de fundo da estação 1.1 em 2014 e 2016 (Rosa & Pádua, 2014)

Estação 1.1	31 maio 2016 (< 63 µm)	8 julho 2014 (fração global)	19 agosto 2014 (fração global)	16 setembro 2014 (fração global)
Cota de recolha (m)	643	624	615	624
Alumínio (mg/kg)	92000	-	-	-
Arsénio (mg/kg)	74	72	69	66
Cádmio (mg/kg)	2,1	2,2	1,5	1,5
Chumbo (mg/kg)	99	128	99	88
Cobre (mg/kg)	892	996	898	836
Crómio Total (mg/kg)	47	41	38	36
Estanho (mg/kg)	15	21	22	29
Ferro (mg/kg)	50000	52000	42000	38000
Manganês (mg/kg)	680	460	770	730
Mercúrio (mg/kg)	0,54	-	-	-
Níquel (mg/kg)	27	16	19	16
Zinco (mg/kg)	207	260	190	190
Algumas características da água na zona de contacto água-sedimento:				
Temperatura (°C)	8,9	7,4	9,0	9,4
OD (mg/L)	7,4	5,4	2,2	0,84
SST (mg/L)	< 5,0	66	354	1564

Na Tabela 13 constam os resultados da concentração em metais obtidos para a estação 1.1 nas três campanhas de amostragem de 2014, efetuadas nos meses de julho, agosto e setembro, e os resultados obtidos em maio de 2016. Primeiramente importa referir que as análises em 2014 foram realizadas com a globalidade da amostra enquanto em 2016 foi analisada apenas a fração inferior a 63 µm para os metais e a fração inferior a 2 mm para os compostos orgânicos e nutrientes. Assumindo-se que não ocorreram

alterações significativas na qualidade de sedimentos que se encontram depositados, no período de 2 anos que existe entre as amostragens, infere-se que a análise da fração de 63 μm para as substâncias metálicas é suficiente e adequada, uma vez que os resultados obtidos se encontram próximos daqueles obtidos em 2014, sobretudo para o mês de julho. No entanto, quaisquer ilações que se possam tirar da comparação destes dados devem ter sempre em consideração esta limitação.

O facto de as recolhas de sedimentos terem sido realizadas a cotas diferentes para a estação 1.1 não se prevê que seja um fator que influencie fortemente os resultados de acordo com os dados obtidos, o que permite que a qualidade possa ser interpretada como referente à zona em causa e não apenas ao ponto em particular de amostragem, com uma aparente homogeneidade na qualidade dos sedimentos superficiais depositados na margem esquerda do perfil VN1.

Analisando os dados da Tabela 13 para 2014, verifica-se que existe alguma variação sazonal da qualidade dos sedimentos na albufeira, com os resultados a melhorarem globalmente de julho para agosto e para setembro, com exceção do estanho, cuja concentração aumenta ligeiramente, e do manganês e níquel, cujas concentrações mais elevadas ocorreram em agosto. A diminuição da concentração de oxigénio dissolvido da água em contacto com o sedimento de julho para setembro estará relacionada com a melhoria da qualidade dos sedimentos nesse período, uma vez que os metais são desmobilizados dos sedimentos para água em condições redutoras, comprovado pelo aumento da concentração de todos os metais na forma dissolvida e total na água de julho para setembro. Note-se que a diferença de teor em SST de 2014 para 2016 é explicada por a colheita das amostras de água ter sido realizada mais próxima da camada de sedimentos acumulados em 2014.

Em maio de 2016, as concentrações de metais obtidas apresentam genericamente semelhanças com as de julho de 2014, com os metais chumbo, cobre, manganês e zinco a aproximarem-se mais dos valores obtidos em agosto. Assim, poderão não ter ocorrido alterações significativas na qualidade dos sedimentos que estão a ser depositados na albufeira ou então não se verificou um aumento dos depósitos sedimentares nesta zona e não se deram alterações significativas na qualidade dos sedimentos já depositados na superfície da camada destes.

Como descrito na metodologia de trabalho em 5.3.3, pretendeu-se estudar também alguns parâmetros orgânicos e de nutrientes para os sedimentos, nomeadamente TOC, fósforo total, azoto Kjeldahl, azoto amoniacal, PAH, PCB e TPH. No entanto, como alguns destes parâmetros não são analisados na EDP Labelec mas sim num laboratório externo, não foi possível obter esses dados em tempo útil para a sua inclusão na presente dissertação. Os resultados do TOC seriam bastante relevantes, pois o teor em matéria orgânica pode atuar como um fator de diluição de contaminações por metais (Frémion *et al.*, 2016) e, como tal, auxiliaria na compreensão dos resultados obtidos para as concentrações de metais.

Tabela 14 – Teor em orgânicos e nutrientes na fração inferior a 2 mm dos sedimentos em maio de 2016

Fração < 2 mm (base seca a 105°C)	Estação 1.1.	Estação 2	Estação 3	Estação 4
Azoto amoniacal (mg/kg NH ₄)	135	555	43	128
Fósforo total (mg/kg PO ₄)	4800	4400	3100	3100

Na Tabela 14 apresentam-se os dados que foram fornecidos atempadamente. Segundo as Normas de Ontário, verifica-se que o nível de efeitos severos de 2000 mg/kg para o fósforo total é ultrapassado em

todas as estações. O azoto amoniacal é visto como um parâmetro adicional que não deve ultrapassar os 100 mg/kg sendo, no entanto, que tal acontece para todas as estações menos para a estação 3. O azoto amoniacal pode dar entrada na albufeira pelo o uso de fertilizantes que podem lixiviar para a albufeira, tal como o fósforo, e ainda pela decomposição bacteriana.

5.4.3. ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA

Nas Fig. 50, Fig. 52, Fig. 54 e Fig. 56 constam os perfis de temperatura da água para as várias estações de amostragem, enquanto nas Fig. 51, Fig. 53, Fig. 55 e Fig. 57 constam os perfis de oxigénio dissolvido, ambos obtidos por leitura direta em campo com uma sonda eletroquímica mergulhada em profundidade ao longo da coluna de água. Constata-se por análise dos perfis de temperatura que este parâmetro decresce com a profundidade sobretudo ao longo dos primeiros 20 m, com descidas dos 15-17 °C aos 9-10°C, sinal de estratificação térmica na albufeira. Na zona de contacto dos sedimentos de fundo verificam-se desta forma temperaturas entre os 8,9 e os 10,1 °C, com as estações 3 e 4 com temperaturas mais altas, numa diferença de 1°C para as estações 1.1 e 2, devido à menor profundidade a que se encontra o fundo da albufeira na zona da ribeira de Amiar e na zona de montante da albufeira. Em termos de oxigénio dissolvido, verificam-se variações na concentração até cerca da profundidade de Secchi, relacionadas com a atividade da zona eufótica, sendo que depois a concentração estabiliza para profundidades inferiores, averiguando-se ainda uma ligeira descida da concentração na zona de contacto da água com os sedimentos de fundo.

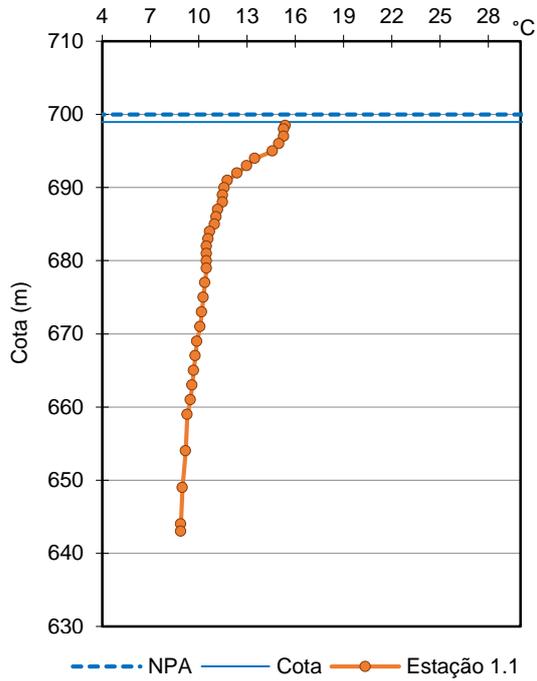


Fig. 50 – Perfil de temperatura da estação 1.1

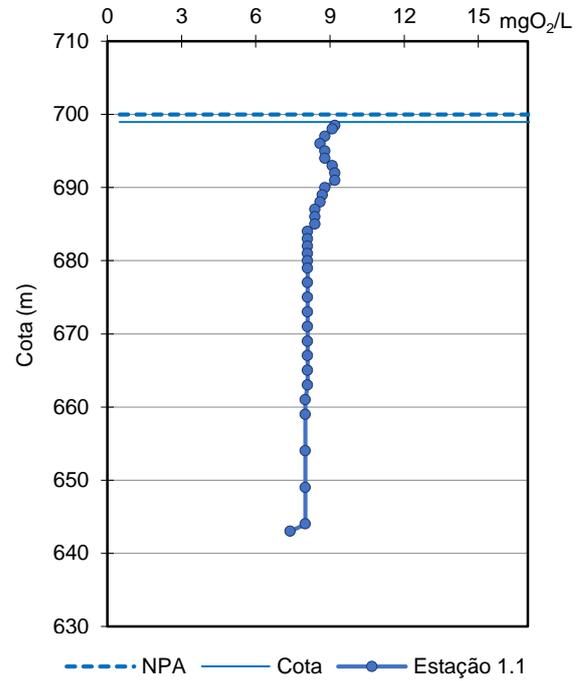


Fig. 51 – Perfil de oxigênio dissolvido da estação 1.1

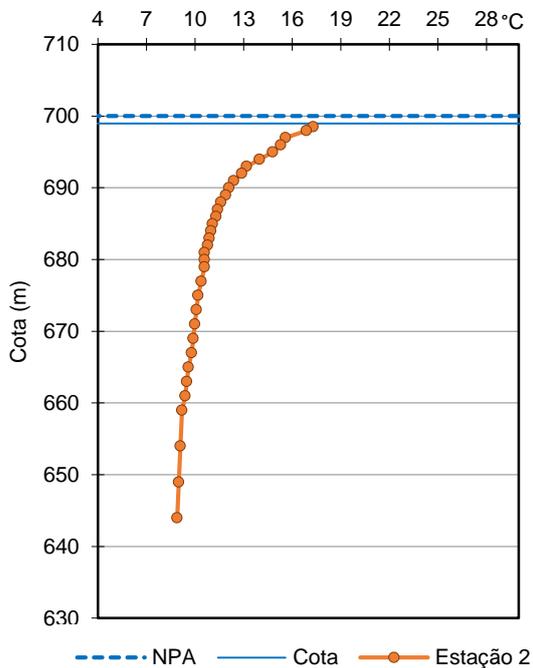


Fig. 52 – Perfil de temperatura da estação 2

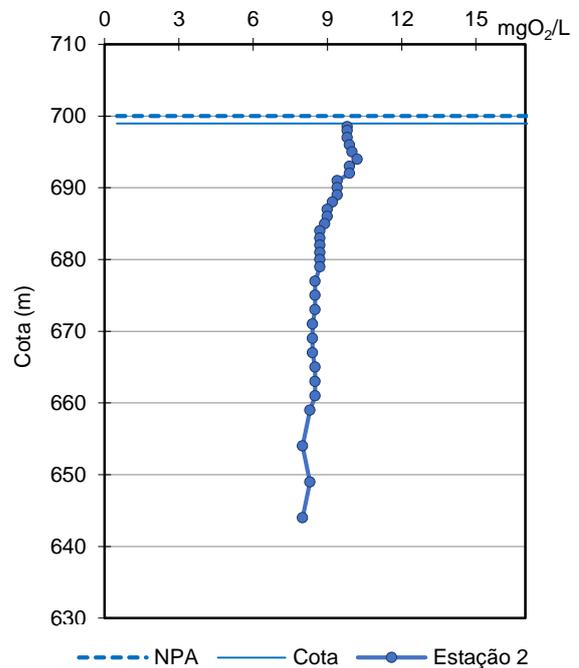


Fig. 53 – Perfil de oxigênio dissolvido da estação 2

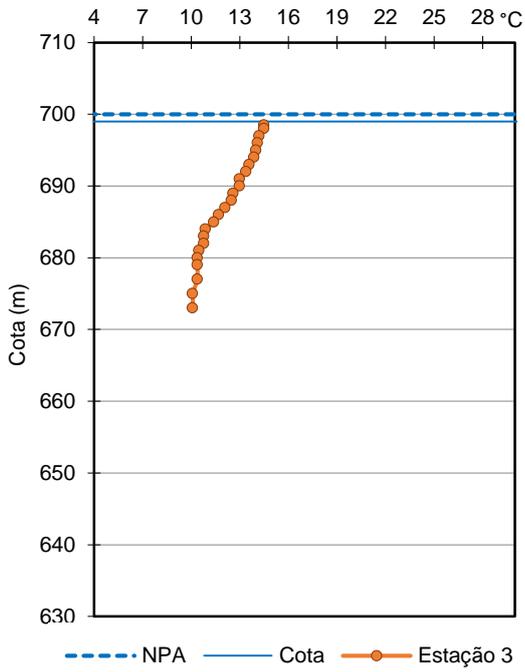


Fig. 54 – Perfil de temperatura da estação 3

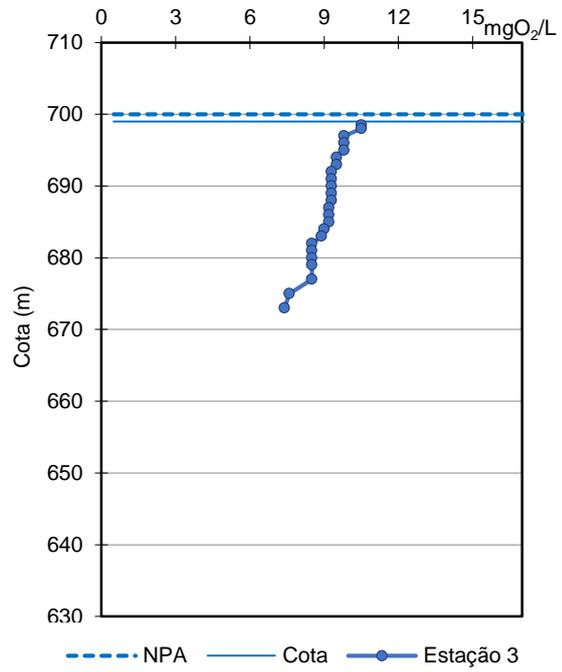


Fig. 55 – Perfil de oxigênio dissolvido da estação 3

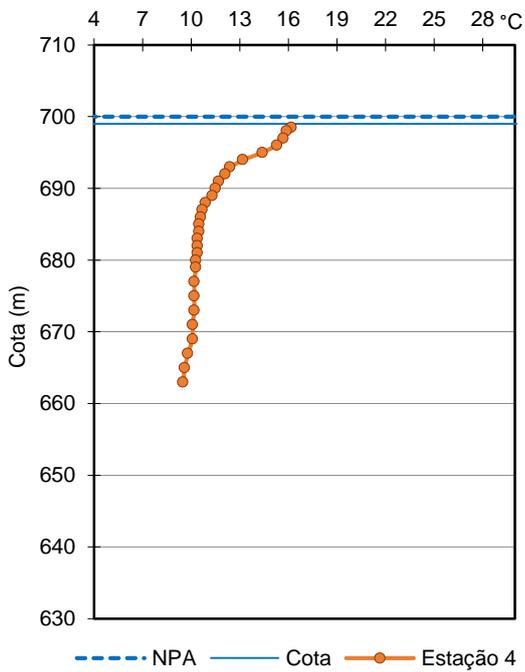


Fig. 56 – Perfil de temperatura da estação 4

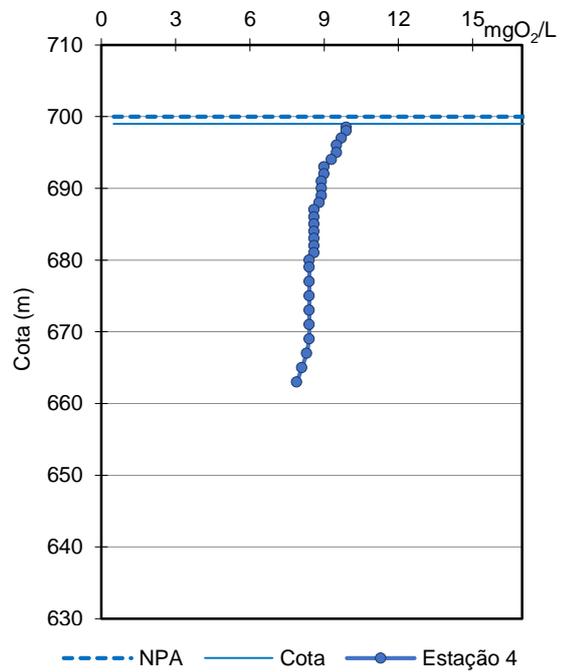


Fig. 57 – Perfil de oxigênio dissolvido da estação 4

Nas Tabela 15 e Tabela 16 apresentam-se os resultados obtidos para os vários parâmetros analisados para as amostras integradas de água e em profundidade na zona de contacto da água com os sedimentos. À semelhança do que ocorreu com as análises dos parâmetros orgânicos e de nutrientes dos sedimentos, não foi possível obter em tempo útil alguns dos parâmetros analisados, devido à sua análise num laboratório externo. Os parâmetros em falta são alguns dos orgânicos, nomeadamente os PAH, PCB e TPH.

Tabela 15 – Parâmetros gerais e concentração em orgânicos e nutrientes nas amostras de água integradas e em profundidade

Amostras de água – Gerais, Orgânicos e nutrientes	Estação 1.1.		Estação 2		Estação 3		Estação 4	
	Integ.	Prof.	Integ.	Prof.	Integ.	Prof.	Integ.	Prof.
Profundidade de Secchi (m)	5,6	-	5,3	-	5,6	-	6,5	-
Profundidade da colheita (m)	14,0	55,0	13,3	51,0	14,0	24,0	16,3	34,0
Cota da colheita (m)	685	644	686	648	685	675	683	665
pH campo (escala Sorensen)	6,6 (14,8°C)	6,6 (13,9°C)	6,6 (14,9°C)	6,6 (14,3°C)	6,6 (14,5°C)	6,6 (14,8°C)	6,6 (15,0°C)	6,6 (14,6°C)
Alcalinidade TA Campo (mg/L CaCO ₃)	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5
Alcalinidade TAC Campo (mg/L CaCO ₃)	5,0	5,0	5,3	5,0	4,8	6,5	5,5	5,3
Dureza (mg/L CaCO ₃)	5,0	3,6	3,7	3,8	4,2	3,9	4,0	3,8
Sólidos Suspensos 103-105°C (mg/L)	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0
Turvação (UNT)	0,7	0,9	0,6	0,6	0,9	1,1	0,8	0,8
TOC (mg/L C)	1,2	1,3	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4
Cheiro (-)	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
Cor (-)	não visível	não visível	não visível	não visível	não visível	não visível amarelada	não visível	não visível
Azoto amoniacal (mg/l NH ₄)	<0,05	0,06	<0,05	0,05	<0,05	0,11	0,05	0,05
Azoto Kjeldahl (mg/l N)	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3
Azoto total (mg/l N)	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3
Nitrito (mg/l NO ₂)	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010
Nitrato (mg/l NO ₃)	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4
Fosforo total (PO ₄) (mg/l PO ₄)	0,019	0,038	0,017	0,023	0,021	0,027	0,024	0,025

Tabela 16 – Concentração de metais nas amostras de água integradas e em profundidade

Amostras de água – Metais	Estação 1.1.		Estação 2		Estação 3		Estação 4	
	Integ.	Prof.	Integ.	Prof.	Integ.	Prof.	Integ.	Prof.
Alumínio dissolvido ($\mu\text{g/l}$)	19	18	24	34	42	15	45	56
Alumínio total ($\mu\text{g/l}$)	40	162	33	42	69	31	47	56
Arsénio dissolvido ($\mu\text{g/l}$)	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3
Arsénio total ($\mu\text{g/l}$)	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3
Cádmio dissolvido ($\mu\text{g/l}$)	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20
Cádmio total ($\mu\text{g/l}$)	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20
Chumbo dissolvido ($\mu\text{g/l}$)	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4
Chumbo total ($\mu\text{g/l}$)	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4
Cobre dissolvido ($\mu\text{g/l}$)	4	<4	8	<4	16	<4	<4	<4
Cobre total ($\mu\text{g/l}$)	9	6	8	<4	18	4	<4	<4
Crómio dissolvido ($\mu\text{g/l}$)	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Crómio total ($\mu\text{g/l}$)	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Estanho dissolvido ($\mu\text{g/l}$)	<6	<6	<6	<6	<6	<6	<6	<6
Estanho total ($\mu\text{g/l}$)	<6	<6	<6	<6	<6	<6	<6	<6
Ferro dissolvido ($\mu\text{g/l}$)	20	19	12	18	24	129	14	18
Ferro total ($\mu\text{g/l}$)	42	158	40	71	68	340	44	61
Manganês dissolvido ($\mu\text{g/l}$)	4	5	5	5	8	27	4	4
Manganês total ($\mu\text{g/l}$)	7	11	7	10	10	32	6	8
Mercúrio dissolvido ($\mu\text{g/l}$)	<0,30	<0,30	<0,30	<0,30	<0,30	<0,30	<0,30	<0,30
Mercúrio total ($\mu\text{g/l}$)	<0,30	<0,30	<0,30	<0,30	4,9	0,31	<0,30	0,30
Níquel dissolvido ($\mu\text{g/l}$)	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4
Níquel total ($\mu\text{g/l}$)	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4
Zinco dissolvido ($\mu\text{g/l}$)	2	2	5	2	7	2	9	7
Zinco total ($\mu\text{g/l}$)	5	4	17	2	7	18	9	13

Da Tabela 15 destaca-se a deteção da cor amarelada para a amostra de água em profundidade na zona da ribeira de Amiar, onde se verifica ainda a maior concentração nas amostras de água de azoto amoniacal e a maior turvação. Apesar disto os VMA dos objetivos ambientais para o pH (5,0 a 9,0), azoto amoniacal (1 mg/L), azoto Kjeldhal (2 mg/L) e fósforo total (1 mg/L) são cumpridos para todas as amostras.

Por análise da Tabela 16, verifica-se que as concentrações dos metais arsénio, cádmio, chumbo, crómio, estanho e níquel em todas as amostras de água são inferiores aos limites de quantificação do método, sendo estes limites inferiores aos Valores Máximos Admissíveis (VMA) do Anexo XXI, relativo aos objetivos ambientais de qualidade mínima para as águas superficiais, do DL n.º 236/98, para o arsénio, cádmio, chumbo, crómio e níquel.

Por outro lado, detetaram-se os metais ferro, manganês e zinco em todas as amostras, sendo o teor em zinco inferior ao VMA dos objetivos ambientais para todas as estações, com as amostras integrada da estação 2 e em profundidade para a estação 3 e 4 a apresentarem os valores mais elevados de zinco total. As maiores concentrações de zinco total nas amostras integrada da estação 2 e em profundidade para a estação 3 aparentam ser devido ao zinco em suspensão, ao passo que para a estação 4 em profundidade será devido em igual medida ao zinco em suspensão e dissolvido na água. As concentrações em ferro e manganês são superiores para as amostras em profundidade, verificando-se a maior concentração de ferro e manganês para a estação 3, como seria previsível devido às aflúências da ribeira de Amiar com proveniência da Mina da Borralha, o que explica a cor amarelada verificada na água em profundidade desta estação. A estação 1.1 possivelmente recebe também parte desta carga poluente visto que apresenta uma concentração de ferro em suspensão superior ao que seria de prever pelas concentrações verificadas na estação 2 e 4. A estação 2 apresenta teores de ferro total e manganês total superiores aos da estação 4, o que poderá ser igualmente devido ao transporte dos metais em suspensão para esta zona da albufeira com proveniência da Borralha.

O cobre foi detetado, essencialmente na forma dissolvida, nas amostras integradas da estação 1.1, 2 e 3, sendo que em profundidade estará presente sobretudo em suspensão. A maior concentração de cobre total verifica-se para a amostra integrada na estação 3. A estação 4 será aquela com menores teores de cobre, devido à sua distância à Mina da Borralha. Comparando as concentrações com o VMA de 0,1 mg/L dos objetivos ambientais, constata-se que todas as amostras cumprem este valor.

Finalmente, foram detetadas concentrações de mercúrio na estação 3 mais elevadas para a amostra integrada do que para a em profundidade. O VMA de 0,001 mg/L dos objetivos ambientais é ultrapassado na amostra integrada, mas não em profundidade.

Como já referido em 5.4.2, analisando os dados das campanhas de julho, agosto e setembro de 2014 para a estação 1.1 em profundidade, verificou-se que a qualidade da água piora de julho para agosto e para setembro, o que acontecerá devido à desmobilização dos metais dos sedimentos para a água como resultado da diminuição da concentração de oxigénio dissolvido na água durante esses meses. Destaca-se as elevadas concentrações totais de arsénio total (0,46 mg/L), chumbo total (0,080 mg/L), cobre total (1,4 mg/L), crómio total (0,070 mg/L) e zinco total (0,54 mg/L) que foram obtidas em setembro de 2014 nesta estação em profundidade (Rosa & Pádua, 2014).

5.5. CONCLUSÕES

Este estudo de sedimentação em albufeiras abordou a evolução da sedimentação na albufeira de Venda Nova como um ponto de partida para se identificarem dificuldades na aplicação de um plano de monitorização da sedimentação em albufeiras e também para estudar a atual situação em termos de sedimentos acumulados, a sua qualidade e os efeitos que podem eventualmente ter.

Em termos do estudo da quantidade de sedimentos acumulados e como estes se distribuem pela albufeira foram sentidas diversas dificuldades. Tratando-se de uma albufeira cuja barragem foi concluída em 1951, tornou-se complicado ter acesso a documentos da topografia da albufeira à data da entrada em funcionamento, com a identificação de apenas alguns desenhos incompletos do projeto, mas que não abrangem toda a albufeira. Com as cartas topográficas mais antigas da zona a já representarem a albufeira, também não foi possível obter dessa forma os dados pretendidos. A ortorretificação das 34 fotografias aéreas existentes do voo realizado em 1949 pelos Serviços Cartográficos do Exército poderá permitir vir a estimar a situação inicial da topografia da área submersa da albufeira de Venda Nova, mas a obtenção de levantamento inicial das albufeiras portuguesas mais antigas apresenta-se como complicado e alguns casos até poderá nem ser possível de obter.

Apesar desta dificuldade em obter um levantamento inicial da albufeira, devido ao assoreamento que ocorreu em 1984 foi realizado um levantamento batimétrico da albufeira em 1985 e vários levantamentos da zona mais problemática em termos de acumulação de sedimentos, a ribeira de Amiar. Alguma informação a que se teve acesso consistiu em desenhos, alguns dos quais que não tinham as cotas listadas, pelo que se demonstrou ser trabalhoso e com limitações de rigor ao organizar a informação disponível para formato digital. Para além disso, encontram-se algumas discrepâncias em alguns dados, sendo complicado perceber qual será a informação mais correta.

Com os dados mais recentes de 2004 apenas para a zona da ribeira de Amiar, foi necessário trabalhar com o levantamento de 1985 para o eixo principal da albufeira para o trabalho prático que se pretendia para esta dissertação. Não se pode, portanto, concluir sobre a evolução a quantidade de sedimentos acumulados ao longo de toda a albufeira, sendo necessário proceder a um novo levantamento batimétrico e compara-lo com os existentes para poder estudar a sedimentação em Venda Nova neste sentido.

Em termos de avaliação da qualidade dos sedimentos com aplicação parcial da metodologia de monitorização que foi proposta nesta dissertação, foi possível ter uma ideia da qualidade dos sedimentos que se encontram acumulados à superfície da camada de sedimentos depositados no fundo da albufeira. Com uma recolha de amostras em quatro estações distribuídas em zonas estratégicas em albufeira, foi possível ter uma imagem de como será a distribuição granulométrica dos sedimentos, mas também de alguns contaminantes que têm associados. Sendo a importante origem de contaminações metálicas na proximidade da albufeira a inativa Mina da Borralha, seria de prever que com a proximidade à Mina as concentrações em contaminantes aumentassem. No entanto, existirão vários fatores que interferem com a qualidade dos sedimentos e com a sua acumulação, não se verificando essa situação com a exceção da estação mais a montante da albufeira, que efetivamente apresenta uma melhor qualidade. Pela comparação com os valores de referência das Normas de Ontário percebe-se que a qualidade dos sedimentos continua má, apesar da Mina da Borralha estar inativa desde 1986, pelo que se infere que esta continue a ter uma forte influência na qualidade dos sedimentos da albufeira, não tendo sido feito um correto tratamento e eliminação dos resíduos das escombrelas quando deixou de ser explorada. As contaminações mais relevantes identificadas nos sedimentos são de arsénio, cobre, ferro e manganês, sendo que a qualidade é menor para a estação de monitorização da zona central da albufeira.

Uma vez que a qualidade dos sedimentos genericamente aparenta melhorar de julho para setembro ao passo que inversamente se verifica o contrário para a água, leva a inferir que ocorrerá uma desmobilização dos metais dos sedimentos para a água, sendo as condições de oxigenação relevantes para a ocorrência deste fenómeno. As análises das amostras de água em maio de 2016 indicam a presença dos metais ferro, manganês e zinco em todas as amostras, ocorrendo também mercúrio na estação 3 e cobre nas estações 1.1, 2 e 3. Em termos de distribuição espacial pela albufeira das contaminações metálicas, verifica-se que a estação 3 aparenta ser aquela em que existe maior contaminação por metais na forma dissolvida e em suspensão, comprovando a proveniência desta carga poluente da Mina da Borralha.

5.6. TRABALHO FUTURO

Por forma a validar algumas interpretações apresentadas na presente dissertação, mas também com a finalidade de obter alguns novos dados relevantes sugere-se:

- Proceder a um levantamento batimétrico para o eixo principal da albufeira e para o eixo da ribeira de Amiar com comparação com os levantamentos anteriores, nomeadamente o de 1985 e o de 2002;
- Proceder a mais recolhas idênticas às realizadas em 2014 e 2016 de amostras de sedimentos superficiais, sendo justificável a criação de uma nova estação de monitorização a jusante da estação 3 no braço da ribeira de Amiar para substituição desta, caso se conclua que efetivamente a qualidade dos sedimentos é pior nessa região;
- Fazer recolhas estratégicas de sedimentos e água na área envolvente à albufeira e amostragem de *background*;
- Fazer a recolha de amostras verticais de sedimentos (*cores*) em zonas estrategicamente escolhidas de acordo com os dados do levantamento batimétrico e comparar os resultados da análise da sua qualidade com os dados históricos da qualidade da água;
- Estudar os fenómenos de transporte dos contaminantes da ribeira de Amiar para a zona central da albufeira;
- Proceder a um reconhecimento das espécies de bentónicos e de fitoplâncton na albufeira, sobretudo na zona da ribeira de Amiar;
- Analisar os efeitos da libertação de caudais na barragem na qualidade da água da albufeira, mas também a jusante da barragem;
- Estudar uma eventual aplicação de novas medidas de minimização da erosão e transporte dos sedimentos da Mina da Borralha para a albufeira e do uso do descarregador de fundo para a descarga de sedimentos para jusante.

6

CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

6.1. CONCLUSÕES

Foi possível estabelecer uma metodologia a adotar com base nos melhores métodos conhecidos para avaliar os efeitos da sedimentação nas albufeiras portuguesas. A metodologia proposta pretende avaliar a quantidade de sedimentos acumulados em albufeira, a qualidade dos sedimentos e relacionar esta avaliação com a qualidade da água e alterações no ecossistema. No entanto, conclui-se que o trabalho a realizar no sentido de avaliar os efeitos da sedimentação sobre os seres vivos tenha de ser visto como exploratório por ainda ser necessário o desenvolvimento de novos métodos e a seleção de novos organismos para estes estudos. Da aplicação, ainda que parcial, desta metodologia ao caso de estudo da albufeira de Venda Nova, foi possível detetar algumas dificuldades tais como a inexistência de um levantamento batimétrico inicial da albufeira, a complexidade de realizar uma avaliação histórica da qualidade dos sedimentos com a recolha de *cores* e a pouca exata recolha de sedimentos nas coordenadas geográficas pretendidas na albufeira com uma draga. Apesar disto, foi possível tirar algumas ilações sobre a situação atual de sedimentação e dos seus efeitos na albufeira de Venda Nova e que abre espaço para serem realizados mais estudos sobre este assunto.

A aplicação de medidas de proteção e operacionais que visem a mitigação e/ou redução dos impactes da acumulação de sedimentos deve estudada para cada albufeira após compreensão do fenómeno de sedimentação na albufeira em causa, existindo uma série de medidas que têm vindo a ser estudadas e aplicadas noutros países. Em Portugal, algumas das medidas serão de difícil aplicação enquanto outras como as descargas de fundo e bacias de armazenamento a montante se afiguram como possibilidades. Uma eventual implementação de um plano de gestão de sedimentos será previsivelmente lenta para as albufeiras portuguesas, com vários desafios que terão de ser solucionados por conjugação de diferentes medidas.

6.2. PROSSEGUIMENTO DE ESTUDOS

Para além das propostas referentes ao caso particular da albufeira de Venda Nova em 5.6, sugere-se:

- Avaliar possíveis alterações no potencial de geração dos aproveitamentos hidroelétricos devido à sedimentação;
- Fazer um estudo comparativo da quantidade de sedimentos acumulados e a sua qualidade em várias albufeiras;
- Recolher amostras de sedimentos de *background* para cada albufeira para a qual se estude a sedimentação, de forma criar uma base de comparação com os dados obtidos nas campanhas de monitorização;
- Estudar novas formas de monitorizar os efeitos da sedimentação sobre os seres vivos que habitam na albufeira;
- Analisar a viabilidade de criação de um plano de gestão de sedimentos das albufeiras para cada região hidrográfica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Afshar, S., Shamsai, A., & Saghafian, B. (2016). Dam sediment tracking using spectrometry and Landsat 8 satellite image, Taleghan Basin, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(2), 104. <http://doi.org/10.1007/s10661-015-5052-y>
- Alemayehu, D., McAlister, J., & Fox, W. (2014). Sediment core sampling and analysis of Kaw lake. *American Journal of Environmental Sciences*, 10(5), 458–468. <http://doi.org/10.3844/ajessp.2014.458.468>
- Álvares, M. T., Fernandes, S., Mariano, A. C., & Pimenta, M. T. (2000). Monitorização Batimétrica para Gestão de Albufeiras: Estudo Piloto. *Ix Silubesa*, (1), 8.
- Álvares, M. T., Fernandes, S., Mariano, A. C., & Veríssimo, M. R. (2001). *Plano de Trabalhos para Execução de Levantamentos Batimétricos nas Albufeiras da Rede Sedimentológica*.
- Álvares, M. T. P., & Pimenta, M. T. (1998). Erosão hídrica e transporte sólido em pequenas bacias hidrográficas. *IV Congresso Da Água (Lisboa: APRH)*, 19.
- Alves, E. C. T. L. (2008). *Sedimentação em Albufeiras Por Correntes de Turbidez*. Universidade Técnica de Lisboa.
- APA, & ARH. (2012). *Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Cávado, Ave e Leça (RH2)*.
- Araújo, A., Hernandez, R., Fonseca, R., & Matos, J. (2014). Avaliação da taxa de sedimentação na Barragem do Poilão (Ilha de Santiago, Cabo Verde). *Comunicações Geológicas*, 101, 597–600.
- Baoligao, B., Xu, F., Chen, X., Wang, X., & Chen, W. (2016). Acute impacts of reservoir sediment flushing on fishes in the Yellow River. *Journal of Hydro-Environment Research*. <http://doi.org/10.1016/j.jher.2015.11.003>
- Berteaud, P., & Roche, P.-A. Decree 08/09/2006 (2006). Paris.
- Bhakta, B. (Michigan S. U. (2012). Inland lake habitats critical to maintaining healthy lake ecosystems. Consultado em http://msue.anr.msu.edu/news/inland_lake_habitats_critical_to_maintaining_healthy_lake_ecosystems
- Boes, R. M., Auel, C., Haggmann, M., & Albayrak, I. (2014). Sediment bypass tunnels to mitigate reservoir sedimentation and restore sediment continuity. *International River Flow Conference - Lausanne*, 221–228.
- Cardoso, J. C. (1986). *Estudo do assoreamento da albufeira da Venda Nova*. Lisboa: Ministério das obras públicas, transportes e comunicações.
- Carvalho, N. O., Filizola Júnior, N. P., Santos, P. M. ., & Lima, J. E. F. W. (2000). Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios. Brasília: ANEEL.
- Castillo, L., Carrillo, J., & Álvarez, M. (2015). Complementary Methods for Determining the Sedimentation and Flushing in a Reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(11). [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001050](http://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001050)
- CCME. (2001). Canadian Environmental Quality Guidelines. Consultado a 20 de fevereiro de 2016 em http://www.ccme.ca/en/resources/canadian_environmental_quality_guidelines/
- Chinita, A. T., Mendonça, A., Miguel, M. B., Ramos, A. (2010). *Aproveitamento Hidroelétrico de Foz*

Tua: Relatório de conformidade ambiental do projeto de execução (RECAPE) (Vol. II - Relat).

- Costa, A. L. R. da. (2004). *O assoreamento das albufeiras das barragens hidroelétricas e a “erosão” das praias*. Universidade do Minho.
- Dhivert, E., Grosbois, C., Courtin-Nomade, A., Bourrain, X., & Desmet, M. (2016). Dynamics of metallic contaminants at a basin scale — Spatial and temporal reconstruction from four sediment cores (Loire fluvial system, France). *Science of The Total Environment*, 541, 1504–1515. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.146>
- Filipe, M. J. do C. (2013). *A fotogrametria aérea como ferramenta na restituição de paisagens submersas por albufeiras - O caso da barragem de Venda Nova*. Universidade de Lisboa.
- Foley, M. M., Duda, J. J., Beirne, M. M., Paradis, R., Ritchie, A., & Warrick, J. A. (2015). Rapid water quality change in the Elwha River estuary complex during dam removal. *Limnology and Oceanography*, 60(5), 1719–1732. <http://doi.org/10.1002/lno.10129>
- Fontana, L., & Bicudo, D. de C. (2009). Diatomáceas (Bacillariophyceae) de sedimentos superficiais dos reservatórios em cascata do Rio Paranapanema (SP/PR, Brasil): Coscinodiscophyceae e Fragilariophyceae. *Hoehnea*, 36(3), 375–386.
- Freire, P. M. S. (2007). *Sedimentação em albufeiras por correntes de turbidez*.
- Frémion, F., Bordas, F., Mourier, B., Lenain, J.-F., Kestens, T., & Courtin-Nomade, A. (2016). Influence of dams on sediment continuity: A study case of a natural metallic contamination. *Science of The Total Environment*, 547, 282–294. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.023>
- Fukuda, T., Yamashita, K., Osada, K., & Fukuoka, S. (2012). Study on Flushing Mechanism of Dam Reservoir Sedimentation and Recovery of Riffle-Pool in Downstream Reach by a Flushing Bypass Tunnel. *Internacional Symposium on Dams for a Changing World*.
- Greve, A. I., Spahr, N. E., Metre, P. C. Van, & Wilson, J. T. (2001). *Identification of Water-Quality Trends Using Sediment Cores from Dillon Reservoir, Summit County, Colorado*. Consultado em http://pubs.er.usgs.gov/thumbnails/usgs_thumb.jpg http://co.water.usgs.gov/nawqa/ucol/html/wrir_01-4022.html
- Guideline for use at contaminated sites in Ontario*. (1997). Ontário.
- Hager, D. L. V. W. H. (1998). *Reservoir Sedimentation. Dam Hydraulics*. Wiley.
- Haifang, Y., Changxing, S., Wenwei, S., Jianbin, B., & Hui, Y. (2016). Changes and influencing factors of sediment load in the Xiliugou basin of the upper Yellow River, China. *Catena*, 142(2003), 1–10. <http://doi.org/10.1016/j.catena.2016.02.007>
- Heath, J., Enos, C., Latipow, T., Herren, L. D., & Dyer, A. S. (1995). *Compilation of Sediment & Soil Standards, Criteria & Guidelines February 1995*, (February).
- Hosseinjanzadeh, H., Hosseini, K., Kaveh, K., & Mousavi, S. F. (2015). New proposed method for prediction of reservoir sedimentation distribution. *International Journal of Sediment Research*, 30(3), 235–240. <http://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2014.11.001>
- ICNF. (2015). *Plano Anual de Exploração (PAE) e Condições de Candidatura ao Exercício da Caça em ZCM (CCEC): ZCM 3089 (2015/2016)*. Montalegre.
- Issa, I. E., Al-Ansari, N., Sherwany, G., & Knutsson, S. (2015). Evaluation and modification of some empirical and semi-empirical approaches for prediction of area-storage capacity curves in

- reservoirs of dams. *International Journal of Sediment Research*, 1–9. <http://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2015.12.001>
- Juracek, K. E. (2015). The Aging of America's Reservoirs: In-Reservoir and Downstream Physical Changes and Habitat Implications. *Journal of the American Water Resources Association*, 51(1). <http://doi.org/10.1111/jawr.12238>
- Kasich, J., Taylor, M., & Nally, S. J. (2012). *Sediment Sampling Guide and Methodologies*. Ohio.
- Khakzad, H., & Ivanovich Elfimov, V. (2015). A Review of Environmental Characteristics and Effects of Dez Dam Flushing Operation on Downstream. *Environmental Practice*, 17(03), 211–232. <http://doi.org/10.1017/S1466046615000198>
- Khatsuria, R. M. (2012). Desilting basins: Are they indispensable? Consultado em <https://hydrotopics.wordpress.com/2012/05/23/desilting-basins-are-they-indispensable-2/>
- LacCore. (2011). Coring Devices. Consultado em <http://lrc.geo.umn.edu/laccore/devices.html>
- Lameiro, L., & Taveira-Pinto, F. (2009). Avaliação da sedimentação em albufeiras e técnicas de transposição e reutilização dos sedimentos. *Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos E Ambiente*, 11.
- Langland, M. J. (2015). *Sediment Transport and Capacity Change in Three Reservoirs, Lower Susquehanna River Basin, Pennsylvania and Maryland, 1900-2012*. U.S. Geological Survey Open-File Report 2014–1235.
- Lintern, A., Leahy, P. J., Zawadzki, A., Gadd, P., Heijnis, H., Jacobsen, G., ... McCarthy, D. T. (2016). Sediment cores as archives of historical changes in floodplain lake hydrology. *Science of the Total Environment*, 544, 1008–1019. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.153>
- Liu, Q., Liu, S., Zhao, H., Deng, L., Wang, C., Zhao, Q., & Dong, S. (2015). The phosphorus speciations in the sediments up- and down-stream of cascade dams along the middle Lancang River. *Chemosphere*, 120, 653–659. <http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.10.012>
- Liu, W., Wang, Y., He, W., Qin, N., Kong, X., He, Q., ... Xu, F. (2016). Aquatic biota as potential biological indicators of the contamination, bioaccumulation and health risks caused by organochlorine pesticides in a large, shallow Chinese lake (Lake Chaohu). *Ecological Indicators*, 60(May 2009), 335–345.
- López, P., López-Tarazón, J. A., Casas-Ruiz, J. P., Pompeo, M., Ordoñez, J., & Muñoz, I. (2016). Sediment size distribution and composition in a reservoir affected by severe water level fluctuations. *Science of the Total Environment*, 540, 158–167. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.033>
- Loureiro, A., Ferrand de Almeida, N. Carretero, M. A., & Paulo, O. S. (2008). *Atlas dos Anfíbios e Répteis de Portugal*. (ICNF, Ed.) (1ª edição). Lisboa.
- Mariano, A. C., Álvares, M. T., Pimenta, M. T., Veríssimo, M. R., & Fernandes, S. (2002). *Monitorização batimétrica de albufeiras: albufeira de Campilhas*.
- Mau, D. P. (2001). *Sediment Deposition and Trends and Transport of Phosphorus and Other Chemical Constituents, Cheney Reservoir Watershed, South - Central Kansas*.
- Meile, T., Bretz, N.-V., Imboden, B., & Boillat, J.-L. (2014). Reservoir sedimentation management at Gebidem Dam (Switzerland). *International River Flow Conference - Lausanne*, 245–255.

- Mulu, A., & Dwarakish, G. S. (2015). Different Approach for Using Trap Efficiency for Estimation of Reservoir Sedimentation. An Overview. *Aquatic Procedia*, 4(Icwrcoe), 847–852. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.106>
- Nakajima, H., Otsubo, Y., & Omoto, Y. (2015). Abrasion and corrective measures of a sediment bypass system at Asahi Dam. In *First International Workshop on Sediment Bypass Tunnels* (pp. 21–32).
- Noble, P. J., Ball, G. I., Zimmerman, S. H., Maloney, J., Smith, S. B., Kent, G., ... Driscoll, N. (2016). Holocene paleoclimate history of Fallen Leaf Lake, CA., from geochemistry and sedimentology of well-dated sediment cores. *Quaternary Science Reviews*, 131, 193–210. <http://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.10.037>
- Nunes, P. (2010). *Proposta de reabilitação de locais de armazenamento de resíduos mineiros da antiga mina da Borralha*. Universidade do Porto.
- Ortt, R. A., Kerhin, R. T., Wells, D., & Cornwell, J. (2000). *Bathymetric Survey and Sedimentation Analysis of Loch Raven And Prettyboy Reservoirs*. Baltimore.
- Pearson, A. J., & Pizzuto, J. (2015). Bedload transport over run-of-river dams, Delaware, U.S.A. *Geomorphology*, 248, 382–395. <http://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.07.025>
- Persaud, D., Jaagumagi, R., & Hayton, A. (1993). *Guidelines for the protection and management of aquatic sediment quality in Ontario*. Ontario.
- Pessoa, A. P. L. (2011). *Estudo da Remobilização de Metais de Sedimentos Contaminados na Bacia Hidrográfica do Rio Minho*. Universidade do Porto.
- Poleto, C. (2014). *Sedimentologia Fluvial: Estudos e Técnicas (Volume 1)*. Porto Alegre: ABRH.
- Popp, A., & Hoagland, K. D. (1995). Changes in benthic community composition in response to reservoir aging. *Hydrobiologia*, 306(2), 159–171. <http://doi.org/10.1007/BF00016832>
- PROCESL. (2009). *Venda Nova III - Reforço de Potência do Aproveitamento de Venda Nova: estudo de impacte ambiental (resumo não técnico)*.
- Ribeiro, J. I. V. (2010). *Levantamento do estado de contaminação de solos e águas superficiais da antiga Mina da Borralha*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Ribeiro, F., Beldade, R., Dix, M., & Bochechas, J. (2007). Carta Piscícola Nacional (versão 01/2007). Direção Geral dos Recursos Florestais-Fluviatilis, Lda.
- Rosa, C., & Pádua, J. (2014). *Nota técnica sobre a análise de metais no sedimento recolhido na albufeira de Venda Nova*.
- Sáñez, J., Froehner, S., & Falcão, F. (2013). Use of biomarkers indices in a sediment core to evaluate potential pollution sources in a subtropical reservoir in Brazil. *Chemie Der Erde - Geochemistry*, 73(4), 555–563. <http://doi.org/10.1016/j.chemer.2013.07.005>
- Scheuerlein, H. (1991). Sediment sluicing in mountain reservoirs. In *Fluvial Hydraulics of Mountain Regions* (pp. 223–234). Springer-Verlag.
- Schneider, J., Badura, H., Troy, W., & Knoblauch, H. (2007). Determination of parameters for venting turbidity currents through a reservoir. *IAHR Congress*.
- Simpson, S. L., Batley, G. E., Chariton, A. A., Stauber, J. L., King, C. K., Chapman, J. C., ... Maher, W. A. (2005). *Handbook for Sediment Quality Assessment*. CSIRO. Bangor, NSW: Centre for

Environmental Contaminants Research.

- Straub, T. D., Roseboom, D. P., & Dennis, P. G. (2006). *Sediment Coring and Sedimentation Analysis on Rasmussen Lake in Ethel's Woods Forest Preserve near Old Mill Creek, Illinois in 2005*. USGS.
- Tang, Q., Bao, Y., He, X., Fu, B., Collins, A. L., & Zhang, X. (2016). Flow regulation manipulates contemporary seasonal sedimentary dynamics in the reservoir fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China. *Science of The Total Environment*, 548–549(9), 410–420. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.158>
- U.S. EPA. (1993). Guidelines for Deriving Site-Specific Sediment Quality Criteria for the Protection of Benthic Organisms.
- UNESCO. (1985). *Methods of Computing Sedimentation in Lakes and Reservoirs*. Paris.
- Vale, C., Carvalhal, V., Stoker, Z., Oliveira, M. do R. L. de, & Monteiro, M. T. (1980). *Estudos relativos à albufeira de Venda Nova*.
- Veiga da Cunha, L. (1974). *Sedimentos, degradação do ambiente e qualidade da água*. Lisboa.
- VROM. Circular on target values and intervention values for soil remediation, Netherlands Government Gazette 1–12 (2000).
- Wohl, E. (2015). Legacy effects on sediments in river corridors. *Earth-Science Reviews*, 147, 30–53. <http://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.05.001>
- Wojtkowska, M., Bogacki, J., & Witeska, A. (2016). Assessment of the hazard posed by metal forms in water and sediments. *Science of the Total Environment*, 552, 387–392. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.073>
- Yang, C. T. (1996). Reservoir Sedimentation. In *Sediment Transport: Theory and Practise* (pp. 267–314). McGraw-Hill Internacional Editions.
- Yigzaw, W., & Hossain, F. (2016). Land Use and Land Cover Impact on Probable Maximum Flood and Sedimentation for Artificial Reservoirs: Case Study in the Western United States. *Journal of Hydraulic Engineering*, 21(2), 1–15. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001287](http://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001287)
- Zheng, S., Wu, B., Thorne, C. R., & Tan, G. (2015). Case Study of Variation of Sedimentation in the Yellow and Wei Rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(3), 05014009. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000980](http://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000980)
- Zimmerman, M. J., & Breault, R. F. (2003). *Sediment Quantity and Quality in Three Impoundments in Massachusetts*.

ANEXOS

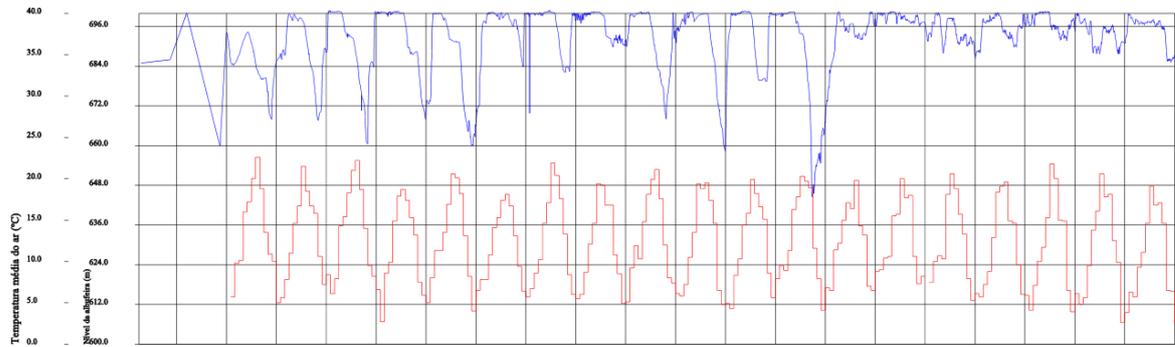
ANEXO I: VALORES DE REFERÊNCIA INTERNACIONAIS PARA A QUALIDADE DOS SEDIMENTOS

Parâmetro	Unidade	Ontário		Canadá		US-EPA Guidelines			Países Baixos			França	
		N. EM	N. ES	ISQG	PEL	LI	LS	NBC	Target	Intervention	N1	N2	
TOC	%	1	10										
Al	mg/kg												
As	mg/kg	6	33	5,900	17,000	3	8	29	29	55	25	50	
Ba	mg/kg					20	60	160	160	625			
Cd	mg/kg	0,6	10	0,600	3,500		6	0,8	0,8	12	1,2	2,4	
Pb	mg/kg	31	250	35,000	91,300	40	60	85	85	530	100	200	
Co	mg/kg	50						9	9	240			
Cu	mg/kg	16	110	35,700	197,000	25	50	36	36	190	45	90	
Cr total	mg/kg	26	110	37,300	90,000	25	75	100	100	380	90	180	
Sb	mg/kg							3	3	15			
Sh	mg/kg												
Fe	% ou mg/kg	2%	4%			17000 mg/kg	25000 mg/kg						
Mn	mg/kg	460	1100			300	500						
Mo	mg/kg							0,5	3	200			
Hg	mg/kg	0,2	2	0,170	0,486	< 1,0	> 1,0	0,3	0,3	10	0,4	0,8	
Ni	mg/kg	16	75			20	50	35	35	210	37	74	
Ag	mg/kg	0,5											
Zn	mg/kg	120	820	123,000	315,000	90	200	140	140	720	276	552	
CQO	mg/kg					40000	80000						
Fósforo total	mg/kg	600	2000										
Azoto Kjeldahl total	mg/kg	550	4800			1000	2000						
Amónia	mg/kg	100				75	200						
Cianeto (livre)	mg/kg	0,1				0,10	0,25		1	20			
Óleo e gordura	% ou mg/kg	0,15%				1000	2000						
Soma de DDD, DDE e DDT (pesticidas)	mg/kg								0,01	4			
DDD (pesticida)	mg/kg	0,008	6	0,00354	0,00851								
DDE (pesticida)	mg/kg	0,005	19	0,00142	0,00675								
DDT (pesticida)	mg/kg	0,007	12	0,00119	0,00477								
Lindano (pesticida)	mg/kg			0,00094	0,00138				0,00005	(soma dos HCH)			
Toxafeno (pesticida)	mg/kg			0,0001									
BHC (inseticida)	mg/kg	0,003	12										
Clordano (inseticida)	mg/kg	0,007	6	0,0045	0,00887				0,00003	4			
Aldrina (inseticida)	mg/kg	0,002	8						0,00006				
Dieldrina (inseticida)	mg/kg	0,002	91	0,00285	0,00667				0,0005	4			
Endrina (inseticida)	mg/kg	0,003	130	0,00267	0,0624				0,00004				
Mirex (inseticida)	mg/kg	0,007	130										

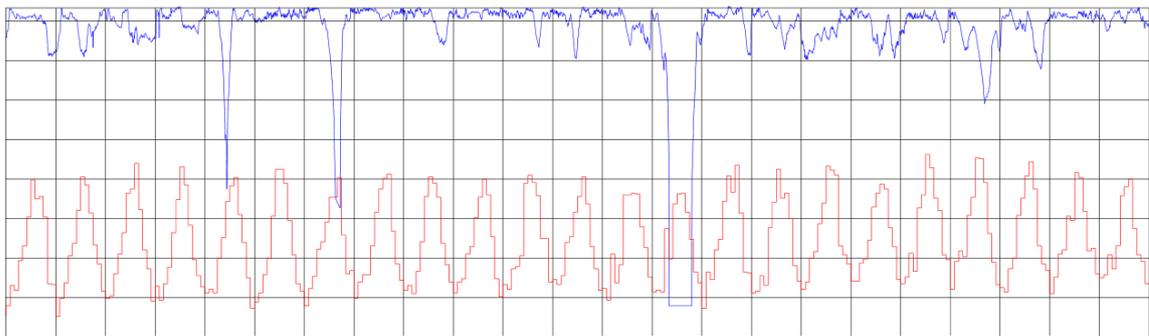
Parâmetro	Unidade	Ontário		Canadá		US-EPA Guidelines		Países Baixos			França	
		N. EM	N. ES	ISQG	PEL	LI	LS	NBC	Target	Intervention	N1	N2
Heptacloro epóxido (biocida)	mg/kg	0,005	5	0,0006	0,00274				0,0000002	4		
Nonifenol e etoxilatos	mg/kg			1,400								
PCB (total)	mg/kg	0,07	530	0,0341	0,277			0,02 (soma de 7)	1 (soma de 7)			
PCB 28	mg/kg										0,005	0,010
PCB 52	mg/kg										0,005	0,010
PCB 101	mg/kg										0,010	0,020
PCB 118	mg/kg										0,010	0,020
PCB 138	mg/kg										0,020	0,040
PCB 153	mg/kg										0,020	0,040
PCB 180	mg/kg										0,010	0,020
TBT	mg/kg										0,1	0,4
HCB	mg/kg	0,02	24									
PAH (10 compostos)	mg/kg											
PAH total (16 compostos)	mg/kg	4	10000						1	40		
Acenafeno (PAH)	mg/kg			0,00671	0,0889						0,015	0,260
Acenafileno (PAH)	mg/kg			0,00587	0,128						0,040	0,340
Antraceno (PAH)	mg/kg	0,220	370	0,0469	0,245						0,085	0,590
Benzo(a)antraceno (PAH)	mg/kg	0,320	1480	0,0317	0,385						0,260	0,930
Dibenzo(a,h)antraceno (PAH)	mg/kg	0,060	130	0,00622	0,135						0,060	0,160
Fenantreno (PAH)	mg/kg	0,560	950	0,0419	0,515						0,240	0,870
Benzo(a)fenantreno (Criseno) (PAH)	mg/kg	0,340	460	0,0571	0,862						0,380	1,590
Fluoranteno (PAH)	mg/kg	0,750	1020	0,111	2,355						0,600	2,850
Benzo(b)fluoranteno (PAH)	mg/kg										0,400	0,900
Benzo(k)fluoranteno (PAH)	mg/kg	0,240	1340								0,200	0,400
Fluoreno (PAH)	mg/kg	0,190	160	0,0212	0,144						0,020	0,280
Naftaleno (PAH)	mg/kg			0,0346	0,391						0,160	1,130
2-Metilnaftaleno (PAH)	mg/kg			0,0202	0,201							
Pireno (PAH)	mg/kg	0,490	850	0,053	0,875						0,500	1,500
Benzo(a)pireno (PAH)	mg/kg	0,370	1440	0,0319	0,782						0,430	1,015
Indeno(1,2,3-cd)pireno (PAH)	mg/kg	0,200	320								1,700	5,650
Benzo(g,h,i)perileno (PAH)	mg/kg	0,170	320								1,700	5,650
PCDD	mg/kg			8,5E-07	2,15E-05							
PCDF	mg/kg			8,5E-07	2,15E-05							

Glossário: N. EM – Nível de efeitos menores; N. ES – Nível de efeitos severos; ISQG – *Interim Sediment Quality Guidelines*; PEL – *Probable Effect Level*; LI – Não poluída; LS – Fortemente Poluída; NBC – *National Background Concentration*

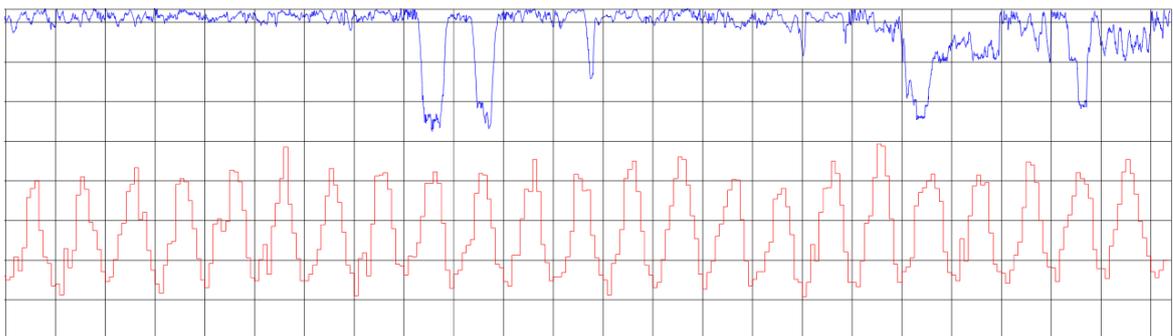
ANEXO II: GRÁFICO DO NÍVEL DA ALBUFEIRA (COTA HICA) E TEMPERATURA MÉDIA DO AR EM VENDA NOVA DE 1951 ATÉ 2016 (DEPARTAMENTO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS DA DIREÇÃO DE PRODUÇÃO HIDRÁULICA DA EDP – GESTÃO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA, S.A.)



Ano	1951	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971
-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

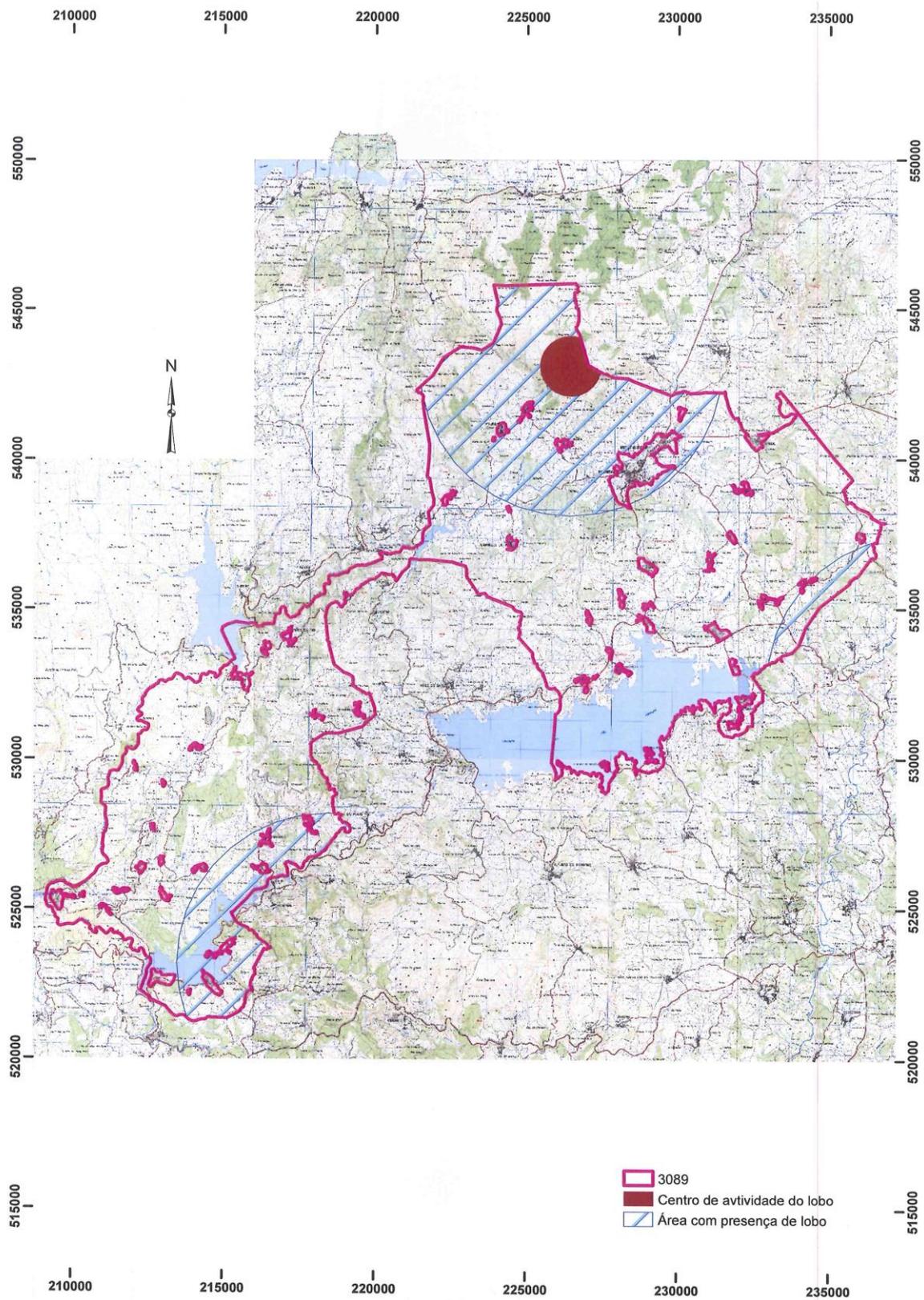


Ano	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993
-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

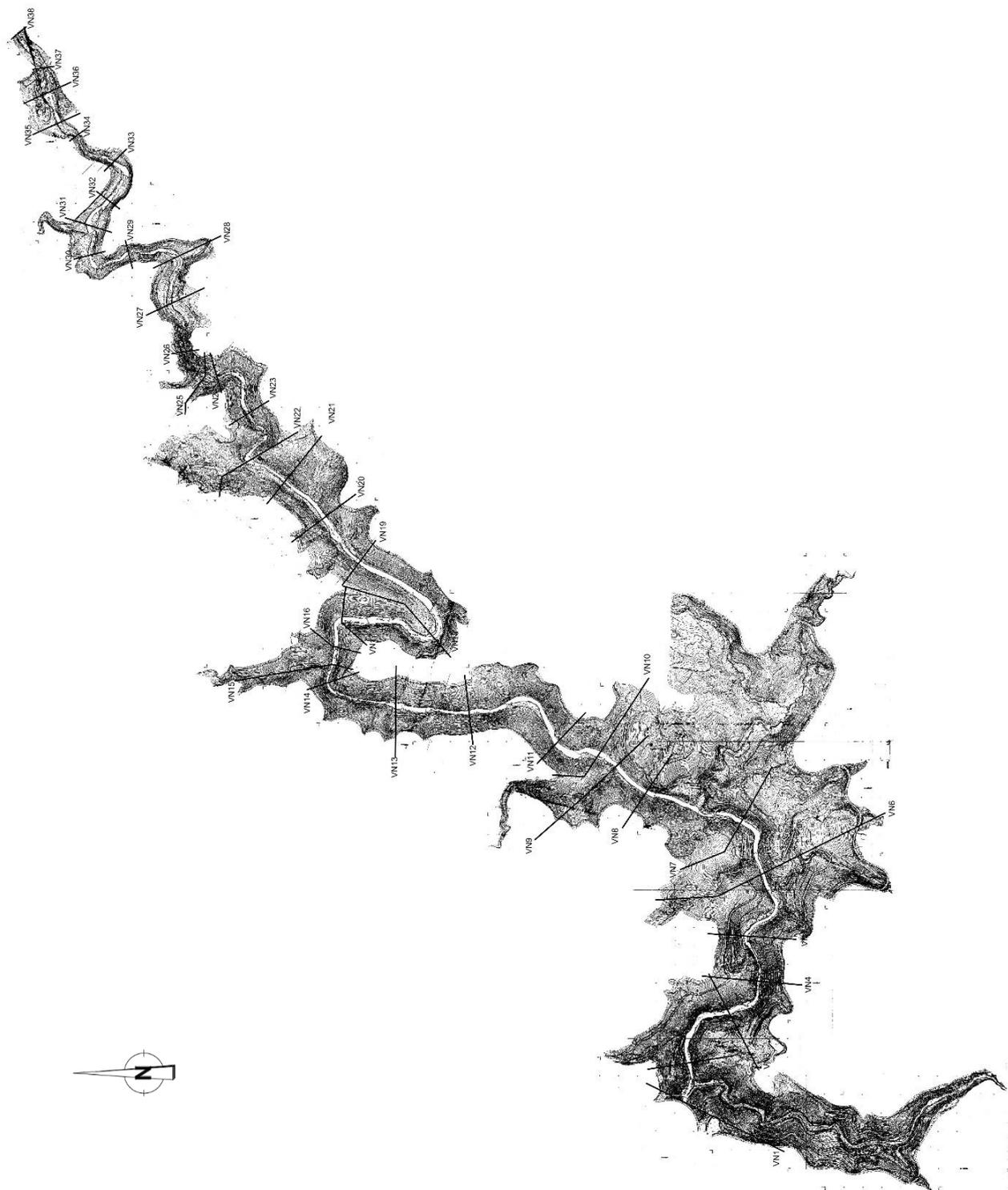


Ano	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

ANEXO III: ZONA DE CAÇA MUNICIPAL DE MONTALEGRE (PROC. Nº 3089 – ICNF 2015/2016)



ANEXO IV: LOCALIZAÇÃO DOS PERFIS TRANSVERSAIS DO EIXO PRINCIPAL DA ALBUFEIRA DE VENDA NOVA (DEB DA EDP – GESTÃO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA, S.A.)

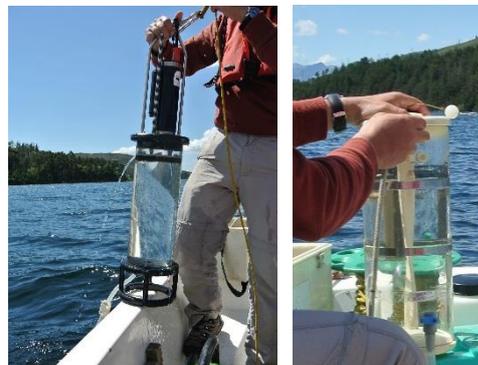


ANEXO V: FOTOGRAFIAS DOS LOCAIS DE AMOSTRAGEM E DAS RESPECTIVAS AMOSTRAS EM VENDA NOVA

Estação 1.1



Estação 2



Estação 3



Estação 4



ANEXO VI: MÉTODOS ANALÍTICOS PARA OS SEDIMENTOS E ÁGUA

Parâmetros para os sedimentos	Método de ensaio	Técnica analítica
Azoto Kjeldahl	EN 13342:2000 (em lamas)	---
Alumínio	PT MA923 (2015-10-01)	ICP-OES
Azoto amoniacal	ISO 7150-1:1984	EAM (dicloroisocianato)
Arsénio	PT MA919 (2014-12-15)	EAA (câmara de grafite)
Cádmio	PT MA919 (2014-12-15)	EAA (câmara de grafite)
Carbono orgânico total (TOC)	M.M. 8.6	Análise Elementar
Cheiro	NP 607:1967	Diluições
Chumbo	PT MA919 (2014-12-15)	EAA (câmara de grafite)
Cobre	PT MA923 (2015-10-01)	ICP-OES
Crómio	PT MA923 (2015-10-01)	ICP-OES
Digestão ácida amostras sólidas	---	Digestão em micro-ondas
Estanho	PT MA919 (2014-12-15)	EAA (câmara de grafite)
Ferro	PT MA923 (2015-10-01)	ICP-OES
Fósforo total	ASTM D4183	(digestão HCl), EAM (ácido ascórbico)
Análise granulométrica	ISO 1953:1994	Granulometria
Manganês	PT MA923 (2015-10-01)	ICP-OES
Mercúrio	PT MA908 (2011-07-15)	EAA (geração de hidretos)
Níquel	PT MA923 (2015-10-01)	ICP-OES
Nitrito	PT MA139 (2013-05-08)	EAM (naftiletenodiamina)
Nitrato	PT MA191 (2013-05-07)	Cromatografia Iónica
PAH	M.M.6.2.5. / M.M	GC-MS
PCB	M.M. 6.2.6	GC-MS
TPH	---	FTIR
Zinco	PT MA923 (2015-10-01)	ICP-OES

Parâmetros para água	Método de ensaio	Técnica analítica
Alumínio	PT MA919 (2014-12-15); PT MA144 (2013-04-30)/ PTMA923 (2015-10-01)	EAA (câmara de grafite) / ICP-OES
Alcalinidade TA (carbonatos)	PT MA102 (2013-04-29)	Potenciometria
Alcalinidade TAC	PT MA102 (2013-04-29)	Potenciometria
Arsénio	PT MA919 (2014-12-15); PT MA144 (2013-04-30)	EAA (câmara de grafite)
Azoto Kjeldahl	Cálculo	---
Azoto amoniacal	PT MA187 (2013-05-07)	EAM-fcs (azul de indofenol)
Azoto Total	EN 12260 :2003	Oxidação e deteção por luminescência
Cádmio	PT MA919 (2014-12-15); PT MA144 (2013-04-30)	EAA (câmara de grafite)
Carbono orgânico total (TOC)	SMEWW 5310-TOC-B (22nd Ed)	Combustão a alta temperatura
Chumbo	PT MA919 (2014-12-15); PT MA144 (2013-04-30)	EAA (câmara de grafite)
Cobre	PT MA144 (2013-04-30); PTMA923 (2015-10-01)	ICP-OES
Crómio	PT MA144 (2013-04-30); PTMA923 (2015-10-01)	ICP-OES
Digestão de águas	PT MA144 (2013-04-30)	Digestão em micro-ondas
Dureza	NP 424:1966	Complexometria
Estanho	PT MA919 (2014-12-15); PT MA144 (2013-04-30)	EAA (câmara de grafite)
Ferro	PT MA144 (2013-04-30); PTMA923 (2015-10-01)	ICP-OES
Fósforo total	PT MA185 (2013-05-06)	EAM-fcs, UV (azul de molibdénio)
Manganês	PT MA144 (2013-04-30); PTMA923 (2015-10-01)	ICP-OES
Mercúrio (geração hidretos)	PT MA908 (2011-07-15)	EAA (geração de hidretos)
Níquel	PT MA144 (2013-04-30); PTMA923 (2015-10-01)	ICP-OES
Nitrito	PT MA139 (2013-05-08)	EAM (naftiletlenodiamina)
Nitrato	PT MA191 (2013-05-07)	Cromatografia Iónica
PAH	M.M. 6.5.1.	(HPLC) inclui: Benzo(a)pireno, Benzo[b]fluoranteno, Benzo[k]fluoranteno, Benzo[ghi]perileno,

		Indeno [1,2,3-cd] pireno, Fluoranteno
PCB	---	GC-ECD
Perfil temperatura/oxigénio dissolvido	SMEWW 2550 B (22nd Ed) / EN ISO 5814:2012	Termometria / Sonda eletroquímica
pH	PT MA104 (2013-04-24)	Potenciometria
Sólidos suspensos totais 103-105 °C	PT MA135 (2013-05-10)	Gravimetria
TPH	M.M. 8.12	FTIR
Turvação	PT MA121 (2013-05-06)	Nefelometria
Zinco	PT MA144 (2013-04-30); PTMA923 (2015-10-01)	ICP-OES

Glossário

C.I. - Cromatografia Iónica

DOC - Carbono Orgânico Dissolvido

EAA - Espectrometria Absorção Atómica

EAM - Espectrometria Absorção Molecular

EAM-fcs - Espectrometria Absorção Molecular (fluxo contínuo segmentado)

FTIR - Espectroscopia de Infravermelhos por Transformada de Fourier

GC-ECD - Cromatografia gasosa - detetor de captura eletrónica

GC-MS - Cromatografia gasosa - espectrometria Massa

HPLC - Cromatografia Líquida de Alta Eficiência

ICP OES - Espectrometria de Emissão com Plasma indutivo acoplado

I.V. - Infravermelhos

PAH - Hidrocarbonetos Aromáticos Polinucleares Totais

TOC - Carbono Orgânico Total

SMEWW - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21st Edition