

**UNIVERSIDADE DE TRÁS-OS-MONTES E ALTO DOURO**



**Estudo Hidrológico da Albufeira do Alto Cávado -**

**– Sistema Cávado – Rabagão – Homem**

**Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil**

**Ana Isabel Príncipe Gonçalves**

Orientadora: Professora Doutora Ana Cristina Matos

Coorientadora: Professora Doutora Isabel Bentes

**Vila Real, Julho de 2016**

**UNIVERSIDADE DE TRÁS-OS-MONTES E ALTO DOURO**



**Estudo Hidrológico da Albufeira do Alto Cávado -**

**– Sistema Cávado – Rabagão – Homem**

**Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil**

**Ana Isabel Príncipe Gonçalves**

Orientadora: Professora Doutora Ana Cristina Matos

Coorientadora: Professora Doutora Isabel Bentes

**Vila Real, Julho de 2016**

Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Estudo Hidrológico da Albufeira do Alto Cávado -

– Sistema Cávado – Rabagão – Homem

Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil

Ana Isabel Príncipe Gonçalves

Orientadora: Professora Doutora Ana Cristina Matos

Coorientadora: Professora Doutora Isabel Bentes

Composição do Júri

Presidente: Doutora Ana Cristina Briga de Sá

Vogal: Doutora Cristina Maria Monteiro dos Santos

Vogal: Doutora Ana Cristina Ribeiro Afonso de Matos Coutinho

Vila Real, Julho de 2016

“Todo o esforço é recompensado, mais tarde ou mais cedo”

*Autor desconhecido*

## Agradecimentos

Um enorme agradecimento à mui nobre Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, pelos cinco anos de aprendizagem, pelos amigos e pelos excelentes professores que sempre me acompanharam.

Agradeço imenso às orientadoras, à Professora Doutora Ana Cristina Matos e à Professora Doutora Isabel Bentes, que aceitaram orientar a minha dissertação de mestrado, por todo o apoio que me deram ao longo deste ano, pela sua compreensão e atenção.

À Professora Doutora Ana Cristina Matos, que incansavelmente insistiu no início do ano letivo para que o protocolo com a EDP fosse aceite.

Ao Professor Doutor Ricardo Bento, que sempre mostrou disponibilidade para ajudar no que fosse necessário.

À Doutora Lurdes Medeiros da EDP, que fez tudo que estava ao seu alcance, para que o protocolo fosse aprovado, assim como ao Engenheiro Rui Gaspar que amavelmente disponibilizou o seu tempo para me apresentar à equipa do estaleiro em obra. Agradeço imenso ao Engenheiro Manuel Oliveira, pela sua preocupação e por todos os esclarecimentos e informações que me forneceu.

Um muito obrigada à equipa fantástica presente em estaleiro, pela paciência que tiveram comigo ao longo destes últimos seis meses. Ao Engenheiro Pedro Reis Silva, por todos os conhecimentos que me transmitiu, pelas ofertas de trabalho, pela paciência que teve em cada visita à obra e por todas as visitas que, atenciosamente, sempre me convidou a acompanhar. Ao Engenheiro Bruno Abreu que acompanhou à visita dos colegas de Engenharia Civil da UTAD ao estaleiro de obra do descarregador complementar da Barragem da Caniçada.

À Maria, que ao longo de cinco anos sempre me apoiou, ao João, ao Tiago, ao Vítor, ao Diogo, à Sara, à Telma, à Ana, à Marta e à Joana, pelos momentos de descontração e amizade que sempre demonstraram.

À minha família, principalmente à minha mãe, afilhada e aos meus queridos avós, pelo encorajamento e pela paciência que tiveram comigo.

Ao meu namorado, Diogo, que ao longo deste percurso esteve comigo nos momentos mais difíceis, que sempre esteve disponível para me ajudar e dar uma palavra de conforto.

Por fim, ao meu pai, que sempre me chamou à razão, transmitiu calma, incentivou, apoiou, ouviu todos os meus desabafos e pela paciência enorme demonstrada ao longo destes anos todos, perante as adversidades que nos têm surgido. Um muito obrigado por fazer de mim, aquilo que sou hoje.

## ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. BARRAGENS E HIDROELETRICIDADE.....	4
2.1 A evolução da hidroeletricidade até aos dias de hoje.....	4
2.1.1 Anos 30.....	7
2.1.2 Anos 40.....	8
2.1.3 Anos 50.....	8
2.1.4 Anos 60.....	9
2.1.5 Anos 70.....	10
2.1.6 Anos 80.....	11
2.1.7 Anos 90.....	12
2.1.8 Início século XXI.....	13
2.1.9 Barragens pelo Mundo.....	16
2.2 Constituição dos Aproveitamentos Hidroelétricos.....	18
2.2.1 Classificação das Barragens.....	23
2.3 Regulamentos e Normas.....	34
2.3.1 Regulamento de Segurança em Barragens (RSB).....	34
2.3.2 Normas de Projeto de Barragens.....	39
2.3.3 Normas de Observação e Inspeção de Barragens.....	41
2.3.4 Normas de Construção de Barragens.....	42
2.4 Órgãos de Segurança e Exploração.....	44
2.4.1 Descarregadores de Cheias.....	44

3. SISTEMA CÁVADO-RABAGÃO-HOMEM .....	52
3.1 Escalão Alto Rabagão .....	53
3.2 Escalão Venda Nova .....	55
3.3 Escalão de Paradela.....	57
3.4 Escalão de Salamonde.....	59
3.5 Escalão de Vilarinho das Furnas .....	61
3.6 Escalão de Caniçada.....	62
4. MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DOS CAUDAIS DE PONTA DE CHEIA.....	66
4.1 Determinação do tempo de concentração, $t_c$ .....	67
4.2 Métodos para a determinação do caudal de ponta de cheia .....	68
4.2.1 Métodos cinemáticos: Método de Snyder.....	68
4.2.2 Métodos estatísticos: Gumbel-Chow e Foster Hazen .....	70
4.2.3 Método Semi-empírico: Método de Giandotti.....	74
5. ESTUDO HIDROLÓGICO DO SISTEMA.....	76
5.1 Dados de Base .....	76
5.2 Determinação do Tempo de Concentração e dos Caudais de Ponta de Cheia para a bacia do Alto Cávado .....	78
5.2.1 Determinação do Tempo de Concentração .....	78
5.2.2 Determinação dos caudais de ponta de cheia .....	79
5.3 Avaliação da influência das descargas a montante no descarregador da Barragem de Caniçada .....	81
6. CONCLUSÕES E PERSPETIVAS DE TRABALHO FUTURO .....	87

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	89
ANEXOS .....	93
Anexo I - Tempo de Concentração .....	94
Anexo II - Caudal instantâneo máximo anual – Alto Cávado .....	95
Anexo III - Método de Foster-Hazen (Caudal máximo instantâneo).....	97
Anexo IV – Método de Giandotti.....	99
Anexo V - Método de Gumbel-Chow (Caudal máximo instantâneo).....	100

## Índice de Figuras

Figura 1: Emílio Biel, 1838 – 1915 (Fonte: Wikipedia, 2015).....	4
Figura 2: Central de Poço de Agueirinho (Fonte: Felix, N.,2010). ....	5
Figura 3: Central de Lindoso, 1923 (Fonte: REN, 2002). ....	6
Figura 4: Engenheiro Ezequiel Campos (Fonte: Politipédia, 2015). ....	6
Figura 5: Aproveitamento de Guilhofrei: Barragem e Central do Ermal (Fonte: APA, 2016).....	7
Figura 6: Barragem das Andorinhas (Fonte: APA, 2016). ....	8
Figura 7: Barragem de Cabril (Fonte: APA, 2016). ....	9
Figura 8: Barragem do Alto Rabagão (Fonte: APA, 2016). ....	10
Figura 9: Barragem da Régua (Fonte: APA, 2016). ....	11
Figura 10: Barragem de Crestuma-Lever (Fonte: APA, 2016). ....	11
Figura 11: Aproveitamento Alto Lindoso (Fonte: EDP- Declaração Ambiental 2013). .....	12
Figura 12: Barragem do Alqueva (Fonte: APA, 2016).....	14
Figura 13: Barragem Alto Lindoso (Fonte: APA, 2016).....	18
Figura 14: Central implementada junto ao corpo de barragem de Touvedo (Fonte: APA, 2016).....	19
Figura 15: Central afastada do corpo de barragem de Torrão (Fonte: APA,2016)....	20
Figura 16: Esquema Projeto Barragem de Salamonde II (Fonte: EDP, 2016). ....	21
Figura 17: Eclusa de Navegação, ao lado direito do corpo de barragem (Fonte: APA, 2016).....	21

Figura 18: Chaminé de Equilíbrio introduzida no reforço de potência Salomonde II (Fonte: EDP, 2016).....	22
Figura 19: Obra de derivação de caudal - Barragem de Pedrogão (Fonte: FLE, 2016). .....	23
Figura 20: Método construtivo convencional (Fonte: LNEC, 2016).....	25
Figura 21: Método do betão compactado com cilindro (Fonte: LNEC, 2016).....	25
Figura 22: Barragem de Carrapelo (Fonte: APA, 2016).....	26
Figura 23: Barragem El Atazar, Madrid (Fonte: Wikipedia, 2016).....	27
Figura 24: Barragem de Vilarinho das Furnas (Fonte: APA, 2016).....	27
Figura 25: Barragem Morrow Point, Colorado (Fonte: Wikipedia, 2016). ....	28
Figura 26: Barragem do Funcho (Fonte: APA, 2016). ....	28
Figura 27: Barragem de Hoover (EUA. 1936) (Fonte: Meliço, 2010). ....	29
Figura 28: Barragem de Pracana (Fonte: APA, 2016).....	29
Figura 29: Barragem de Penide e geometria esquemática (Fonte: APA, 2016). ....	30
Figura 30: Barragem de Prada (Fonte: APA, 2016). ....	31
Figura 31: Barragem de Alijó (Fonte: APA, 2016). ....	32
Figura 32: Barragem de Caia (Fonte: APA, 2016). ....	33
Figura 33: Barragem de Miranda do Douro (Fonte: APA, 2016).....	47
Figura 34: Barragem de Aqueira (Fonte: APA, 2016).....	47
Figura 35: Barragem de Torrão (Fonte: APA, 2016).....	47
Figura 36: Dissipação por blocos (Fonte: Figueiredo, N., 2010). ....	48
Figura 37: Perfil da barragem de Caniçada (Fonte: APA, 2016).....	48

Figura 38: Esquema de um descarregador em túnel (Fonte: Marques, A., 2012). ....	49
Figura 39: Descarregadores não convencionais (Fonte: Antunes, M., 2011).....	50
Figura 40: Descarregador de Fundo – Barragem de Ribeiradio Ermida (Fonte: COBA). .....	51
Figura 41: Bacia Hidrográfica da Região Norte (Fonte: PROT-Norte).....	52
Figura 42: Esquema Geral do Sistema Cávado-Rabagão-Homem (Fonte: EDP). ....	53
Figura 43: Barragem de Alto Cavado (Fonte: APA, 2016). ....	54
Figura 44: Esquema ilustrativo da Barragem do Alto Rabagão (Fonte: APA, 2016).	54
Figura 45: Barragem de Venda Nova (Fonte: APA, 2016). ....	55
Figura 46: Localização geográfica da central de Vila Nova (Fonte: GoogleMaps, 2016).....	56
Figura 47: Esquema ilustrativo da Central de Vila Nova (Fonte: EDP, 2013).....	56
Figura 48: Esquema ilustrativo central de Frades (Fonte: EDP, 2016). ....	57
Figura 49: Descarregadores de cheia primários (Fonte: EDP, 2016). ....	58
Figura 50: Descarregador de cheias complementar – Barragem de Paradela (Fonte: EDP, 2016). ....	59
Figura 51: Barragem de Salamonde (Fonte: EDP, 2016). ....	59
Figura 52: Planta e perfil longitudinal do circuito hidráulico de Salamonde (Fonte: EDP, 2016). ....	60
Figura 53: Barragem de Vilarinho das Furnas (Fonte: EDP, 2016). ....	61
Figura 54: Circuito hidráulico Vilarinho das Furnas (Fonte: EDP, 2013).....	61
Figura 55: Barragem de Caniçada (Fonte: EDP, 2013). ....	62
Figura 56: Descarregadores de cheia. ....	63

Figura 57: Açude. ....	63
Figura 58: Descarga de Fundo. ....	64
Figura 59: Circuito hidráulico (Fonte: EDP, 2016). ....	64
Figura 60: Descarregador de Cheia complementar – (a): vista em planta; (b): vista em corte (Fonte: EDP, 2016). ....	65
Figura 61: Bacia do Cávado (Fonte: EDP, 2016.) ....	76
Figura 62: Bacia hidrográfica do Cávado referente à seção da barragem de Caniçada (Fonte: EDP, 2016.) ....	77
Figura 63: Estação Hidrométrica do Alto Cávado (Fonte: SNIRH, 2016.) ....	77
Figura 64: Ligações internas entre aproveitamentos hidroelétricos (Fonte: EDP, 2016). ....	82

## Índice de Tabelas

Tabela 1: Classificação de barragens Fonte: DL 344/2007. ....	35
Tabela 2: Representantes da Comissão de Segurança de Barragens. ....	36
Tabela 3: Resumo das fases de projeto. ....	39
Tabela 4: Período de retorno da cheia de projeto, em anos. ....	46
Tabela 5: Método de Gumbel-Chow (Fonte: Ribeiro, A., 1987). ....	72
Tabela 6: Método de Foster-Hazen. ....	74
Tabela 7: Método de Foster-Hazen. Determinação do caudal de ponta. ....	74
Tabela 8: Parâmetros $\lambda$ da fórmula de Giandotti para o caudal máximo de cheia. ....	75
Tabela 9: Tempo de concentração da bacia. ....	78
Tabela 10: Comparação dos resultados obtidos pelos métodos. ....	79
Tabela 11: Caudais descarregados. (Fonte: SNIRH, 2016). ....	83
Tabela 12: Comparação de descargas efetuadas em Alto Cávado e Caniçada (Fonte: EDP, 2016.) ....	85

## **Índice de Gráficos**

Gráfico 1: Evolução da Potência Instalada em Portugal (Fonte: DGEG).....	14
Gráfico 2: Tipo de corpo de barragens a nível mundial (Fonte: ICOLD). ....	17
Gráfico 3: Diagrama unitário – Método de Snyder. ....	80

## Lista de Acrónimos

**AIA** – Avaliação de Impacte Ambiental

**APA** – Agência Portuguesa do Ambiente

**APRH** – Associação Portuguesa de Recursos Hídricos

**BCC** – Betão Compactado com Cilindro

**CSB** – Comissão de Segurança em Barragens

**DGEG** – Direção Geral de Energia e Geologia

**DIA** – Declaração de Impacte Ambiental

**EDP** – Eletricidade de Portugal

**EIA** – Estudo de Impacte Ambiental

**FLE** – Ferreira Lemos Engenharia

**ICOLD** – International Commission on Large Dams

**INAG** – Instituto da Água

**LNEC** – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

**PNBEPH** – Programa Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroelétrico

**REN** – Rede Energética Nacional

**SNIRH** – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos

**SNPC** – Serviço Nacional de Proteção Civil

## Resumo

Os aproveitamentos hidroelétricos são explorados e estudados desde o século XIX, no entanto uma vez que os critérios de dimensionamento têm mudado ao longo do tempo torna-se necessário verificar se os órgãos de segurança e exploração, nomeadamente os descarregadores de cheia, têm a capacidade de vazão necessária para os caudais de ponta de cheia, calculados a partir de dados atuais e registados durante a exploração da barragem.

Assim, o presente trabalho centra-se no estudo hidrológico da albufeira do Alto Cávado, particularmente no cálculo dos caudais de ponta de cheia através de métodos estatísticos cinemáticos e empíricos e a sua comparação com as descargas dos descarregadores de cheia. A albufeira do Alto Cávado é a que se situa mais a montante do sistema Cávado-Rabagão-Homem.

Para contextualizar o trabalho efetuou-se uma revisão histórica sobre a hidroeletricidade em Portugal, uma revisão bibliográfica sobre os órgãos constituintes das barragens e os tipos de barragens mais frequentes. Fez-se, igualmente, uma revisão da legislação em vigor em relação às barragens e aos órgãos de segurança e exploração.

Como referido, o estudo hidrológico desenvolvido, consiste na determinação do caudal de ponta de cheia, pela aplicação de diversos métodos tendo-se, posteriormente, efetuado a comparação entre os caudais obtidos e a capacidade de vazão dos descarregadores de cheias, tendo em conta a derivação de caudais entre albufeiras. Constatou-se que nestas condições os descarregadores de cheias têm capacidade de descarga suficiente para não pôr em risco a segurança da barragem.

Como a albufeira do Alto Cávado está inserida num sistema complexo em cascata, com reversibilidade, efetuaram-se comparações entre os caudais descarregados a montante do sistema com as descargas efetuadas a jusante, verificando-se como seria de esperar que as descargas efetuadas a montante têm influência nas descargas a jusante.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estudo hidrológico, Barragens, Descarregadores de cheias e Hidroeletricidade.

## Abstract

The hydroelectric power plants are explored and studied since XIX century, however once the sizing criteria have changed along the years it is necessary to verify that the security and exploitation parts mainly, the spillways have flow capacity to the full peak flow obtained from data during the dam exploitation.

So, this work focuses on the hydrological study of the Alto Cávado dam, particularly the calculation and comparison of the flow peak calculated through kinematics, empirical and statistical methods with the spillways discharges. The reservoir from the Alto Cávado dam is situated in the upstream part of Cávado-Rabagão-Homem system.

To contextualize the work was realized a historical review of hydroelectricity in Portugal, a literature review of the dams component and the most frequent types of dams. There was also a review the legislation about security and exploration of dams.

As referred, the hydrological study developed consists in determining the full peak flow by application of various methods having been subsequently made the comparison between flow calculated and the discharge capacity of the spillways having in the flow derivation between dams. It was found that in these conditions the discharge capacity is enough dams to endanger the dam safety.

The dam of Alto Cávado belongs to complex and cascading and so system affected by the discharges made upstream.

**KEYWORDS:** Hydrological study. Dams, Spillways and hydroelectricity.

# 1 Introdução

Há mais de uma centena de anos que Portugal recorre aos recursos hídricos existentes no país para a produção de energia elétrica através da construção e exploração de aproveitamentos hidroelétricos. Esta é considerada uma forma “limpa” de produção de eletricidade. O consumo de eletricidade tem crescido exponencialmente, devido ao aumento demográfico e à dependência tecnológica que exige o aumento contínuo da geração de energia elétrica, preferencialmente, a partir de recursos renováveis.

Em Portugal existem mais de 50 barragens, com a finalidade de produzir energia. Com aumento do número de aproveitamentos hidroelétricos e, de forma a rentabilizar a produção energética, têm-se criado sistemas de aproveitamentos hidroelétricos. Estes sistemas são caracterizados por existirem ligações entre vários aproveitamentos, através de túneis de derivação e restituição. Um dos sistemas mais complexos de Portugal, é o sistema Cávado-Rabagão-Homem (EDP, 2016). Este é constituído por uma cascata de aproveitamentos, num total de sete barragens e seis centrais de produção energética, com uma diferença de cotas de 740 m entre os valores extremos dos níveis de pleno armazenamento.

Grande parte destes aproveitamentos foram construídos, antes da publicação da legislação relativa à segurança das barragens e às normas de projeto, construção, observação e inspeção de barragens. Com a entrada em vigor desta legislação foi necessário verificar se as barragens, assim como os órgãos de segurança e exploração foram dimensionados de forma a respeitar a legislação. A zona geográfica, onde se insere este sistema é uma das áreas mais pluviosas do país, por este motivo, há que ter especial cuidado com os descarregadores de cheias das barragens e verificar, face aos conhecimentos atuais se têm a capacidade de vazão necessária para eventos de cheia excepcionais. Estes sistemas são muito difíceis de modelar, pois as albufeiras têm tuneis de derivação entre si e existem albufeiras no sistema com elevada capacidade de amortecimento de cheias, como é exemplo a albufeira do Alto Rabagão.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi realizar um estudo hidrológico referente à bacia da barragem do Alto Cávado, determinando caudais de ponta de cheia através de diversos métodos e efetuando a sua comparação com a capacidade de vazão dos seus descarregadores de cheia. Para além disso:

- Estudaram-se os aproveitamentos hidroelétricos e os seus órgãos;
- Analisou-se e compilou-se a legislação vigente para a construção e exploração dos aproveitamentos hidroelétricos;
- Estudou-se a influência das descargas efetuadas no sistema em cascata do Cávado-Rabagão-Homem.

O presente trabalho divide-se em seis capítulos que se passam, sucintamente, a descrever.

No Capítulo 1, faz-se uma breve introdução ao tema do trabalho e descrevem-se os objetivos.

No Capítulo 2, efetua-se uma descrição sobre as barragens construídas em Portugal continental, os órgãos que constituem os aproveitamentos hidroelétricos, a forma de classificação das barragem em função da sua altura, do tipo de materiais e estrutura que adotam. Ainda neste capítulo, apresenta-se a legislação em vigor sobre segurança, projeto, observações, inspeções e construção de barragens e por fim analisam-se os órgãos de segurança e exploração dos aproveitamentos hidroelétricos.

O Capítulo 3, descreve o sistema Cávado-Rabagão-Homem constituído por aproveitamentos hidroelétricos interligados entre si, do qual faz parte o caso de estudo que se refere à barragem do Alto Cávado.

No Capítulo 4, apresenta-se a metodologia seguida para efetuar o estudo hidrológico, referindo os métodos que foram utilizados para o cálculo dos caudais de ponta de cheia e os parâmetros necessários para a sua aplicação.

No Capítulo 5, apresentam-se os resultados obtidos pela aplicação da metodologia e efetuam-se as comparações entre os métodos cinemáticos, estatísticos e empíricos utilizados para a determinação do caudal de ponta de cheia. Com os resultados, efetua-se a comparação entre os caudais de ponta de cheia e a capacidade de vazão dos

descarregadores de cheia da barragem do Alto Cávado, por fim compara-se as descargas efetuadas na barragem mais a montante do sistema, com a barragem mais a jusante do mesmo.

No Capítulo 6 tecem-se as conclusões do trabalho e apontam-se alguns trabalhos que futuramente se poderão desenvolver.

## 2 Barragens e Hidroeletricidade

### 2.1 A evolução da hidroeletricidade até aos dias de hoje

Em meados do século XIX, começava-se a estudar a nível mundial as potencialidades da água para a produção de eletricidade.

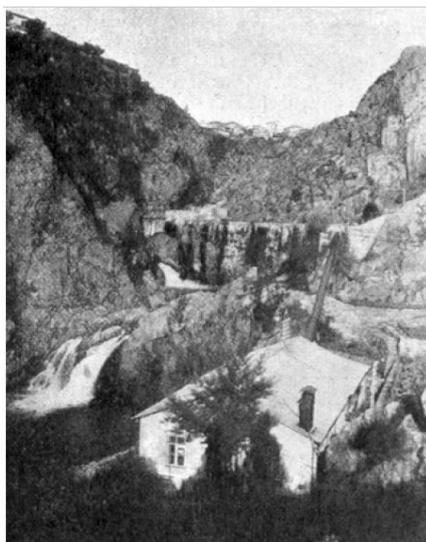
Em Portugal, no final do mesmo século, mais precisamente em 1890, Leopoldo Augusto das Neves, propõe à Câmara Municipal de Vila Real a iluminação elétrica desta cidade, através da produção de energia a partir de uma central hidroelétrica, localizada no Rio Corgo, junto ao poço do Agueirinho, que originou a Companhia Elétrica e Industrial de Vila Real (Félix, N., 2010).

Na altura, segundo outras fontes referem, a central hidroelétrica pertencia a um ilustre cidadão vilarealense, o Sr. Granjo. No entanto segundo a bibliografia, a construção desta central hidroelétrica, ficou a cargo de um cidadão alemão residente na cidade do Porto, Emílio Biel, 1838-1915, representante de uma empresa alemã, Schuckert de Nuremberga. Este, com a planta da cidade de Vila Real, realizou um estudo da rede de distribuição elétrica e em simultâneo, efetuou o levantamento e a requisição do material necessário para a construção deste empreendimento. Dada a falta de poder económico da antiga empresa para concluir o empreendimento, Emílio Biel (Figura 1) tomou o projeto como seu, tornando-se o responsável pela construção do que viria a ser o primeiro aproveitamento hidroelétrico de Portugal, inaugurado no dia 13 de Junho de 1894 (Félix, N., 2010).



*Figura 1: Emílio Biel, 1838 – 1915 (Fonte: Wikipedia, 2015).*

A antiga central hidroelétrica, de dimensões reduzidas, com uma potência de 120 kW denominada Central de Poço de Aqueirinho, Figura 2, canalizava as águas do Rio Corgo, um dos afluentes do Rio Douro, com um caudal de 645 litros/segundo, para uma turbina Knop, aproveitando uma queda de 25 metros. O ciclo produtivo era muito afetado pelo caudal reduzido do Rio Corgo em períodos de seca, o que provocava interrupções frequentes e periódicas na produção de energia.



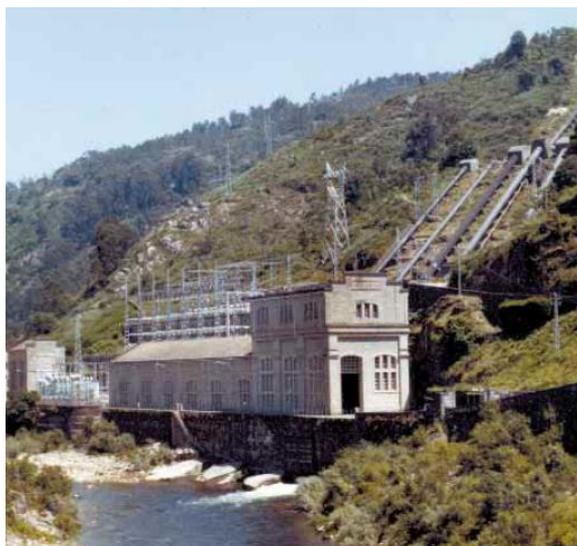
*Figura 2: Central de Poço de Aqueirinho (Fonte: Felix, N.,2010).*

A par da cidade de Vila Real, a cidade de Braga, também começava a apostar no fornecimento de eletricidade, aproveitando a água como fonte de produção. Foi no ano de 1895 ou 1896, que foi implementada a Central de Furada, no Rio Cávado, que aproveitava uma queda de 4 metros.

Ainda no século XIX, foram instalados aproveitamentos hidroelétricos, nos Açores (a pequena Central da Vila, em 1899, que iluminava Vila Franca do Campo, em S. Miguel) e na Guarda, também em 1899, a Central do Pateiro, aproveitando as águas do Rio Mondego, com uma queda de 45 metros.

No início do século XX, a exploração dos aproveitamentos hidroelétricos expandiu-se por todo o território nacional, constituindo um fator de desenvolvimento industrial. Para gerir a produção hidroelétrica eram constituídas companhias e empresas que geriam e exploravam os aproveitamentos hidroelétricos, como são exemplo a Empresa de Luz Elétrica da Guarda, Lda (1907), a Companhia Hidroelétrica do Varosa, criada no mesmo ano e a Hidroelétrica do Alto Alentejo (1925) (Rollo, M.).

Na iminência da 1ª Guerra Mundial (1914 – 1918) o desenvolvimento dos aproveitamentos hidroelétricos não abrandou no território nacional, mas dividia-se em duas produções distintas de energia: a Sul, prevalecia a produção de Termoelectricidade, promovida pelos belgas, que consistia na queima de carvão proveniente de Inglaterra; a Norte a Hidroelectricidade é que dominava a produção, promovida pelos espanhóis, como é exemplo o aproveitamento de Lindoso, em 1922, (Figura 3) que foi o maior na sua época, explorado pela Sociedade Eletro del Lima, que inicialmente abastecia a cidade de Braga e Porto e posteriormente de Coimbra.



*Figura 3: Central de Lindoso, 1923 (Fonte: REN, 2002).*

Nesta mesma altura, o pioneiro Engenheiro Ezequiel de Campos, 1874-1965, (Figura 4) foi um visionário das potencialidades dos aproveitamentos hidroelétricos. Realizou vários estudos que apontavam para o aproveitamento das quedas de água e dos rios nacionais, para produção de energia elétrica, em detrimento das centrais térmicas.



*Figura 4: Engenheiro Ezequiel Campos (Fonte: Politipédia, 2015).*

Em 1926, surge a Lei dos Aproveitamentos Hidráulicos, que pela primeira vez estabelece a noção de Rede Elétrica Nacional. Esta realça a importância dos aproveitamentos hidroelétricos, do aproveitamento da abundante energia hidráulica, da diminuição dos gastos com os combustíveis fósseis, da obtenção de energia barata para usos agrícolas, industriais e mineiros e eletrificação dos caminhos-de-ferro. Este documento serviu de impulso para os estudos da capacidade de produção dos rios e da viabilidade dos aproveitamentos (Carvalho, D., 2013).

### 2.1.1 Anos 30

Na década de 30 foram inauguradas cinco barragens, maioritariamente localizadas na bacia hidrográfica do Tejo. Apenas foi inaugurada uma barragem para aproveitamento hidroelétrico na zona norte do país, na bacia hidrográfica do Ave, a barragem de Guilhofrei ou Ermal em 1935, Figura 5, com uma estrutura em betão e com uma altura de 49 m acima do solo.



*Figura 5: Aproveitamento de Guilhofrei: Barragem e Central do Ermal (Fonte: APA, 2016).*

### 2.1.2 Anos 40

Nos anos 40 verificou-se um aumento do número de barragens inauguradas, num total de 8, um pouco espalhadas pela região norte e centro do país. O distrito de Aveiro recebeu o seu primeiro aproveitamento hidroelétrico, a Barragem de Burgães, inaugurada logo no início desta década. O distrito de Setúbal, Coimbra e Castelo Branco inauguraram 2 barragens cada, e por fim o distrito de Braga, que na bacia hidrográfica do Ave inaugurou a Barragem das Andorinhas (Figura 6), para fins de produção de energia elétrica, constituída por um corpo de betão em gravidade, com 25 metros de altura.



*Figura 6: Barragem das Andorinhas (Fonte: APA, 2016).*

### 2.1.3 Anos 50

A década de 50 foi considerada a década de ouro dos aproveitamentos hidroelétricos, foram inaugurados no período de 10 anos um total de 26 barragens espalhadas de Norte a Sul do país.

É de destacar a evolução da envergadura destas obras. Na década anterior a barragem mais alta tinha 76 metros de altura (Barragem de Santa Luzia, no distrito de Coimbra), mas nesta década atinge-se a centena de metros em altura do corpo da barragem, como é o caso da Barragem de Castelo de Bode, em Santarém, com 115 metros de betão na forma de gravidade com curvatura, da Barragem de Paradela em Vila Real, com 112 metros de altura em enrocamento com cortina a montante e da barragem de Cabril (Figura 7), sendo até aos dias de hoje a barragem mais alta de Portugal. Esta última, situa-se no distrito de Castelo Branco, inaugurada a 1954, com uma altura de 132 metros, construída em betão em forma de abóbada de dupla curvatura.

---



*Figura 7: Barragem de Cabril (Fonte: APA, 2016).*

#### 2.1.4 Anos 60

Nesta década verificou-se uma diminuição no número de barragens a construir, constatando-se um decréscimo para metade do número de barragens inauguradas. Contudo, é de salientar, o aproveitamento do Alto Rabagão, Figura 8, localizado no distrito de Vila Real, com uma altura de 94 metros em betão, uma vez que foi o primeiro aproveitamento com instalação de bombagem em Portugal.

A instalação de bombagem consiste na implementação de turbinas-bombas, que têm a capacidade dupla, de turbinar e bombar, caudal entre albufeiras. Quando se justifica, bomba-se água da albufeira a jusante para a albufeira a montante, para posteriormente turbinar e produzir energia.



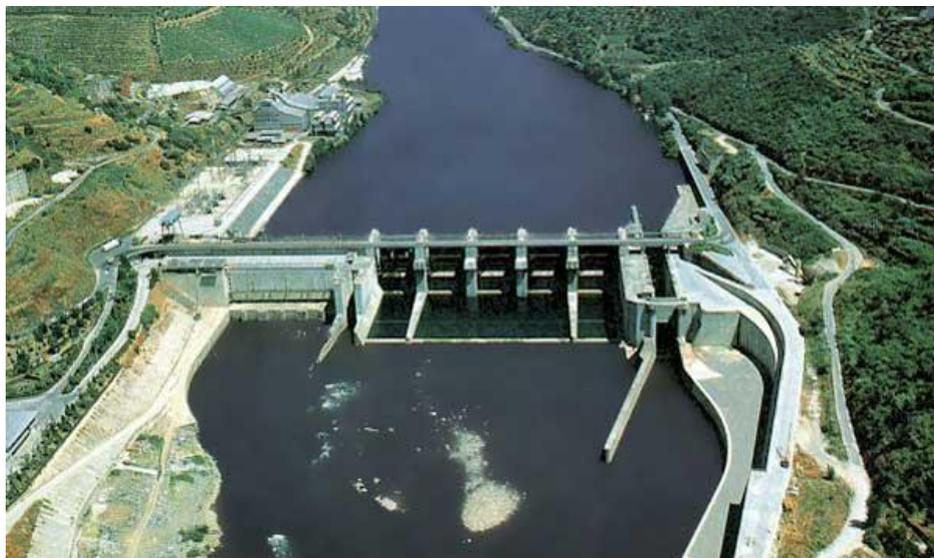
*Figura 8: Barragem do Alto Rabagão (Fonte: APA, 2016).*

#### 2.1.5 Anos 70

Nos anos 70, Portugal abranda o desenvolvimento industrial e verifica-se uma redução do número de aproveitamentos hidroelétricos implementados, apenas 6. Contudo registou-se nessa década, um total de 15 barragens construídas para fins de rega, abastecimento, defesa de cheias e navegação.

Com o fim da ditadura em 25 de Abril de 1974, dá-se a transformação do setor elétrico em Portugal, ocorrendo a nacionalização de várias empresas, que em 1976 se fundiram e criaram a empresa Eletricidade de Portugal (EDP).

Uma das barragens que entrou em funcionamento nesta década, concretamente no ano de 1973, foi a Barragem do Bagaúste, na Régua, Figura 9, localizada na bacia hidrográfica do Douro, com uma altura de 41 metros, destinada à produção de energia e à navegação.



*Figura 9: Barragem da Régua (Fonte: APA, 2016).*

#### 2.1.6 Anos 80

Nos anos 80 a produção hidroelétrica situava-se em um terço do consumo total da população portuguesa. Foram construídas 26 barragens, por todo o território continental, destacando-se as construções das barragens do Pocinho, Figura 10, no distrito da Guarda (1982) e Crestuma-Lever, no distrito do Porto (1985), que finalizaram o conjunto de empreendimentos no Rio Douro e permitiram a sua navegabilidade.



*Figura 10: Barragem de Crestuma-Lever (Fonte: APA, 2016).*

### 2.1.7 Anos 90

Na década de 90, foram inauguradas 45 barragens, sendo que apenas 11 se destinam à produção de energia elétrica, e 29 foram construídas exclusivamente para rega e abastecimento.

Esta década fica marcada pela inauguração de um dos maiores aproveitamentos hidroelétricos implementados em Portugal, o Aproveitamento do Alto Lindoso, Figura 11, em 1992, a poucas centenas de metros da fronteira entre Portugal e Espanha. Este empreendimento demorou 10 anos a ser construído, foi realizado com base no Convénio Luso-Espanhol, de 1960. Com a realização deste aproveitamento, o coroamento do corpo de barragem permitiu a ligação entre Arcos de Valdevez e Soajo, assim como a regulação do caudal do Rio Lima. Dado a falta de acessos a este local foi necessária a construção de obras acessórias, nomeadamente, 67 km de estrada, 4 pontes em Portugal e 7 pontes em Espanha.



*Figura 11: Aproveitamento Alto Lindoso (Fonte: EDP- Declaração Ambiental 2013).*

É o quinto aproveitamento português com maior capacidade de armazenamento, com aproximadamente 370 hm<sup>3</sup>, com a capacidade instalada de 630 MW.

A construção desta grandiosa barragem, implicou grandes volumes de escavação, detonagens e de betão, 200 000 m<sup>3</sup>, 600 000 m<sup>3</sup> e 300 000 m<sup>3</sup>, respetivamente.

Na altura da sua construção, tinha incorporada as maiores válvulas do mundo, nomeadamente, válvulas borboleta, que servem para regular o caudal turbinado pelo grupo. Esta obra custou, aproximadamente 800 milhões de euros, contudo supõe-se que até 2002, o valor produzido já ultrapassou o custo da obra. Este projeto de engenharia foi contemplado, em 1994, com o Prémio Internacional Puente de Alcântara.

No mesmo ano, foi inaugurado o aproveitamento hidroelétrico de Touvedo, situado a 17 km a jusante do aproveitamento descrito anteriormente, tendo como missão regular os elevados caudais turbinados no Lindoso.

É por esta altura, que começam a ser questionados os impactes ambientais que estas estruturas implicam. Estas preocupações são integradas na legislação nacional, tornando-se obrigatório o estudo do impacte ambiental para a aprovação destas obras (Moreira, R., 2009).

#### 2.1.8 Início século XXI

Com o início do novo século a construção de barragens decresceu significativamente, sendo inauguradas apenas 20, das quais 6 para a produção de eletricidade.

Esta década de 2000 a 2010, fica marcada pela inauguração da Barragem do Alqueva, Figura 12, uma barragem com uma longa história. Foram realizados vários estudos sobre os impactes ambientais que esta construção implicava. O corpo de barragem do Alqueva é construído em betão, com abóbada de dupla curvatura com 96 m de altura acima do solo. Após 10 anos de obras foi inaugurada em Maio de 2004. Este aproveitamento está situado na bacia hidrográfica do Rio Guadiana.



Figura 12: Barragem do Alqueva (Fonte: APA, 2016).

Nesta altura, o número de aproveitamentos hidroelétricos não cobria o consumo energético da população nacional (REN - Hidroeletricidade em Portugal). Após a década de 90, a potência instalada nas centrais térmicas, que produzem energia elétrica através da queima de combustíveis de fonte não renovável, superou a potência instalada em centrais de produção “limpa”. Contudo a aposta nas energias renováveis tem vindo a crescer, como se constata através do Gráfico 1. É no ano de 2010 que se verifica o maior crescimento deste setor.

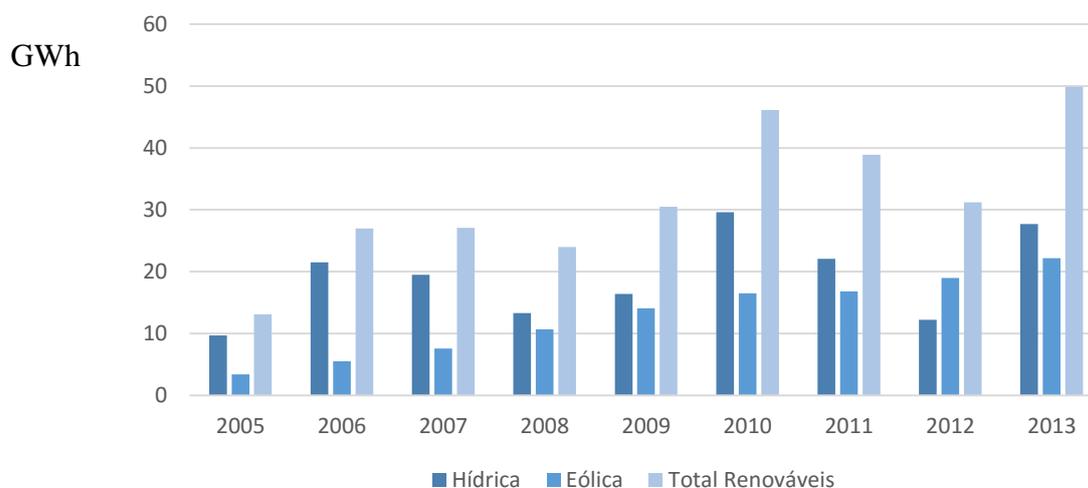


Gráfico 1: Evolução da Potência Instalada em Portugal (Fonte: DGEG).

No ano de 2007, foi elaborado, através do consórcio COBA e PROCESL, o Programa Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroelétrico (PNBEPH), que tinha como objetivo identificar e definir prioridades para realizar investimentos em aproveitamentos hidroelétricos entre 2007 e 2020. Este programa traçou como meta atingir uma capacidade hidroelétrica instalada, a nível nacional, superior a 7000 MW, em 2020. Os novos aproveitamentos hidroelétricos a implementar teriam de ter uma potência instalada na ordem dos 2000 MW, contribuindo desta forma para a redução do consumo dos combustíveis fósseis, o aumento do aproveitamento de fontes limpas e a redução da emissão de gases para a atmosfera. Estes princípios vão de encontro à política energética nacional e à política energética da União Europeia, que também impulsionou a elaboração deste Programa.

A elaboração dos estudos do PNBEPH foi assegurado por uma comissão de acompanhamento, integrada pela Rede Energética Nacional (REN), o INAG, Agência Portuguesa do Ambiente (APA), e pela Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG).

No âmbito dos estudos realizados foram elaborados, o Relatório de Fatores Críticos que definiu o âmbito da Avaliação Ambiental e selecionou a informação que deveria constar no Relatório Ambiental do PNBEPH, o Projeto do Programa, documento de base do PNBEPH, que tinha como objetivo selecionar os aproveitamentos hidroelétricos com capacidade para satisfazer as metas do PNBEPH e o Relatório Ambiental, onde se descreveram e avaliaram os impactes ambientais na concretização deste plano.

Numa primeira fase foram analisados 25 potenciais aproveitamentos hidroelétricos. Destes, face às opções estratégicas definidas para o Programa e da avaliação ambiental estratégica, selecionaram-se 10 aproveitamentos que deveriam ser construídos, dentro do período estipulado pelo programa, nomeadamente:

1. Aproveitamento Hidroelétrico de Foz Tua
2. Aproveitamento Hidroelétrico de Padroselos
3. Aproveitamento Hidroelétrico de Alto Tâmega (Vidago)
4. Aproveitamento Hidroelétrico de Daivões
5. Aproveitamento Hidroelétrico de Fridão
6. Aproveitamento Hidroelétrico de Gouvães
7. Aproveitamento Hidroelétrico Pinhosão

8. Aproveitamento Hidroelétrico Girabolhos
9. Aproveitamento Hidroelétrico de Almourol
10. Aproveitamento Hidroelétrico de Alvito

Desde a publicação deste programa, têm vindo a ser desenvolvidos os trabalhos para a construção destes aproveitamentos.

A EDP ganhou a concessão de três dos dez aproveitamentos, nomeadamente, Aproveitamento Hidroelétrico de Foz do Tua, Fridão e Alvito. Foi também construído um quarto aproveitamento, Aproveitamento Hidroelétrico do Baixo Sabor, que não estava incluído no PNBEPH, uma vez que a decisão da sua construção foi tomada antes do aparecimento do Programa. Este aproveitamento, já em funcionamento, vai aumentar a capacidade de armazenamento de água no Douro Nacional (EDP,2016).

A IBERDROLA ficou com a concessão de quatro aproveitamentos hidroelétricos, concretamente o Aproveitamento Hidroelétrico do Alto Tâmega, Daivões, Gouvães e Padroselos. Este último, pertencente à bacia do Tâmega teve a declaração de impacte ambiental desfavorável, devido à existência de uma espécie rara (mexilhão do Rio Norte), descoberta no Rio Beça, em Boticas. Os especialistas consideraram praticamente impossível, conciliar a sobrevivência da espécie com a construção da barragem, o que levou ao seu cancelamento, (Fonte: APRH, 2016).

No balanço realizado pela Associação Portuguesa de Recursos Hídricos, APRH, verificou-se que cinco das barragens indicadas no programa já estão em fase de licenciamento e/ou construção, como é o caso da barragem de Foz Tua, Alto Tâmega, Fridão, Gouvães e Daivões. Contudo, para a construção das barragens de Pinhosão e Almourol não surgiram interessados. A barragem de Girabolhos, concessionada à empresa Endesa Generación Portugal, encontra-se suspensa.

#### 2.1.9 Barragens pelo Mundo

Segundo a Comissão Internacional de Grandes Barragens, *International Commission on Large Dams, ICOLD*, há registo de barragens em 95 países. A ONU indica que no

globo existem 191 países, contudo só metade dos países exploram a água como fonte de energia que, infelizmente não é um recurso distribuído uniformemente pelo planeta.

A primeira barragem construída no mundo, foi na Península Ibérica, em Espanha, no ano de 130, denominada por barragem Proserpina.

Na ICOLD 2016, encontra-se um registo de 58 266 barragens em todo o mundo, sendo a China o país que se destaca com um elevado número de barragens construídas, que tem um registo de 23 842 barragens. No fundo da lista, com o menor número de barragens, está o Luxemburgo e a Letónia com apenas 3 aproveitamentos cada.

Predominam as barragens de terra, 63 %, que corresponde a 36 986 barragens registadas. Em segundo lugar, com apenas 13 % estão as barragens de encoramento, com uma percentagem muito próxima das barragens de gravidade, em betão, com 7 245 registos, informação que se pode confirmar no Gráfico 2.

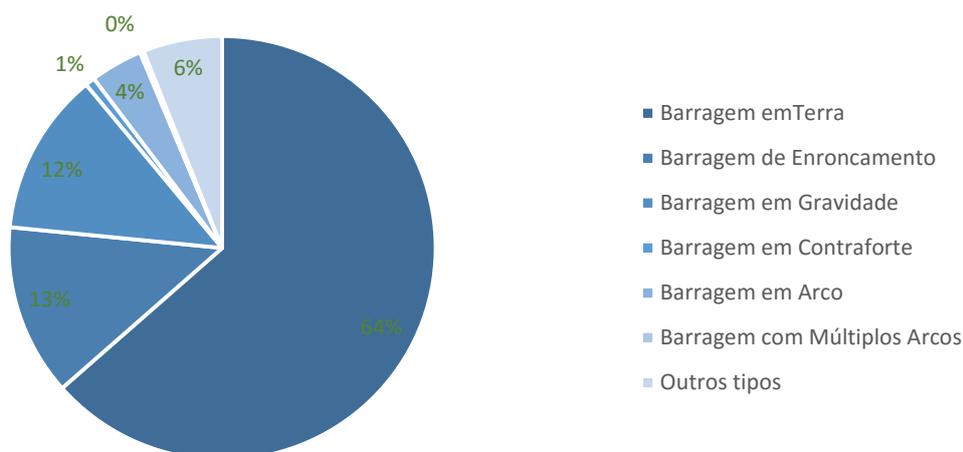


Gráfico 2: Tipo de corpo de barragens a nível mundial (Fonte: ICOLD).

A barragem de terra com maior altura no mundo, 335 metros, localiza-se no Taquistão e é a barragem de Rogun. Por sua vez a barragem com maior volume armazenado do mundo é a barragem Mirani, inaugurada no ano de 2007 no Paquistão.

## 2.2 Constituição dos Aproveitamentos Hidroelétricos

Os circuitos hidráulicos são constituídos por tomadas de água, centrais hidroelétricas, tuneis de restituição e chaminés de equilíbrio. Este conjunto de elementos aproveitam a energia mecânica, correspondente ao desnível entre a tomada de água e a restituição, que é encaminhada para os grupos de turbinas, onde é transformada em energia elétrica. A implementação deste sistema de produção energética, implica um processo construtivo grandioso.

A tomada de água destina-se à captação dos caudais acumulados na albufeira, geralmente controlados por comportas. Pode situar-se no corpo de barragem ou fora dele. O dimensionamento desta estrutura está relacionada com vários aspetos, nomeadamente, o caudal sólido acumulado, com o tipo de barragem e com as condições hidrológicas, topográficas, geológicas, sismológicas e geotécnicas do local. Para proteger esta estrutura à entrada de detritos, são introduzidas soluções para a proteção das entradas, recorrendo a grades ou grelhas (Pinheiro, A., 2006).

A título de exemplo, na barragem de Alto Lindoso (Figura 13) é possível visualizar as cabeças das tomadas de água. Neste aproveitamento as tomadas de água não estão incorporadas no corpo da barragem.



Cabeças de  
tomada de  
água

Figura 13: Barragem Alto Lindoso (Fonte: APA, 2016).

Uma central hidroelétrica, pode ser classificada em função da potência instalada, que está associada a aspetos físicos, nomeadamente a altura de queda de água e o caudal. Nos grandes aproveitamento hidroelétricos, a potência instalada é igual ou superior a 10 MW, os restantes aproveitamentos são classificadas como pequenos aproveitamentos hidroelétricos ou centrais mini-hídricas (Félix, P., 2011).

Ao processo de transformação de energia, estão associados vários componentes, nomeadamente a tomada de água que proporciona a derivação da água para o circuito hidráulico da central. Posteriormente, este vai derivar o caudal para as turbinas. As turbinas, efetuam o trabalho mecânico de rotação, recebendo deste modo a potência que irão transmitir ao grupo gerador. O grupo gerador por sua vez, transforma a energia em energia elétrica que será transformada para efetuar a ligação à rede. Após a passagem da água pelas turbinas, esta é restituída a jusante (IST, 2016).

A central hidroelétrica pode localizar-se no corpo da barragem, implantada à superfície (Figura 14) e/ou afastada do corpo da barragem à superfície ou subterrâneas (Figura 15).

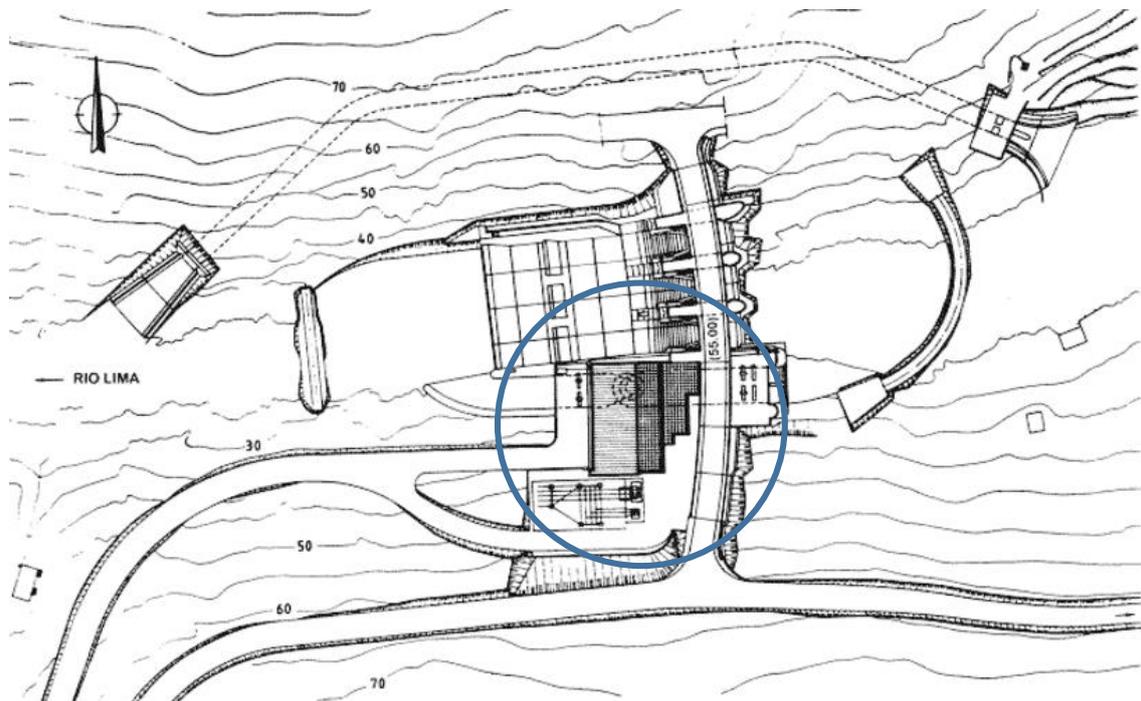


Figura 14: Central implementada junto ao corpo de barragem de Touvedo (Fonte: APA, 2016).

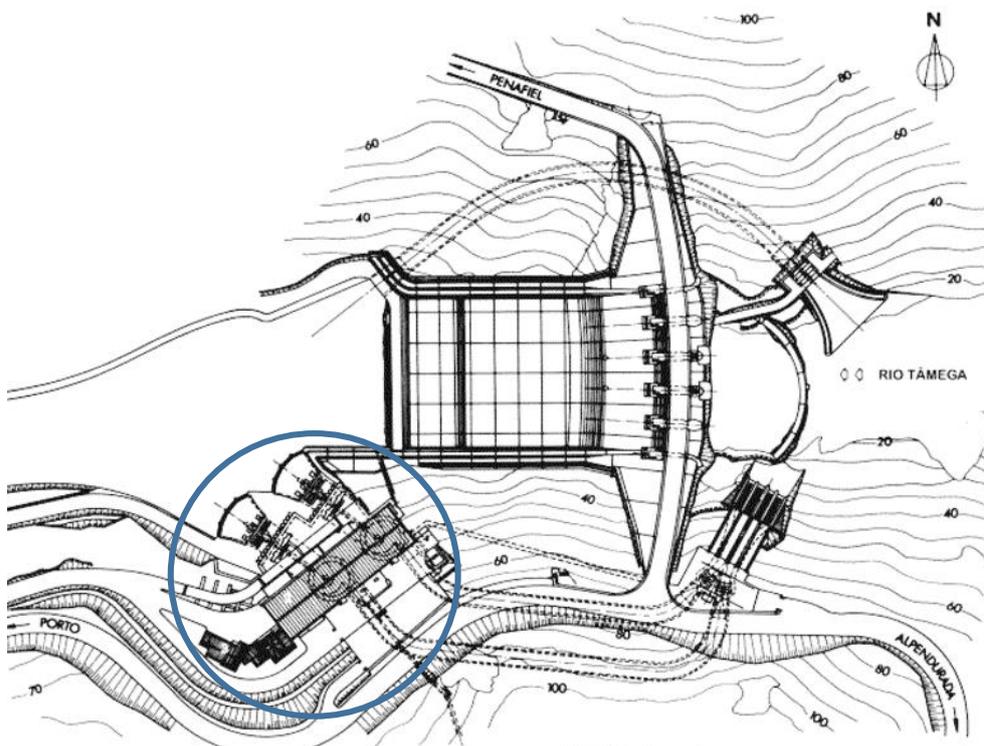


Figura 15: Central afastada do corpo de barragem de Torrão (Fonte: APA, 2016).

A produção de energia ocorre por transformação de energia potencial gravítica em energia elétrica final. A conversão de energia ocorre através do circuito hidráulico e de cada grupo de turbinas e geradores.

Algumas das barragens de Portugal, têm sido sujeitas a reforços de potência. Os reforços de potência têm vindo a ser aplicados com o objetivo de reforçar a produção energética em Portugal, dado que as solicitações energéticas são cada vez mais elevadas, evitando desta forma as dificuldades implícitas na construção de uma nova barragem.

O interesse na aplicação de reforço de potência, tem ganho importância devido ao aumento de produção de energia eólica, em que nas horas de menor consumo, o excesso de energia é utilizada para o funcionamento dos equipamentos dos sistemas reversíveis. São exemplo, de aplicação de reforço de potência a Barragem Picote, Bemposta, Alqueva, Venda Nova Paradela e de Salamonde, como se verifica na seguinte Figura 16, (EDP, 2016), no qual se prevê uma capacidade instalada de cerca de 3 500 MW.

Neste caso, e em muitas barragens, a água é restituída a outro aproveitamento hidroelétrico através de um túnel de restituição, bombado com a energia eólica em excesso, criando um sistema de complementaridade entre a energia hídrica e eólica.

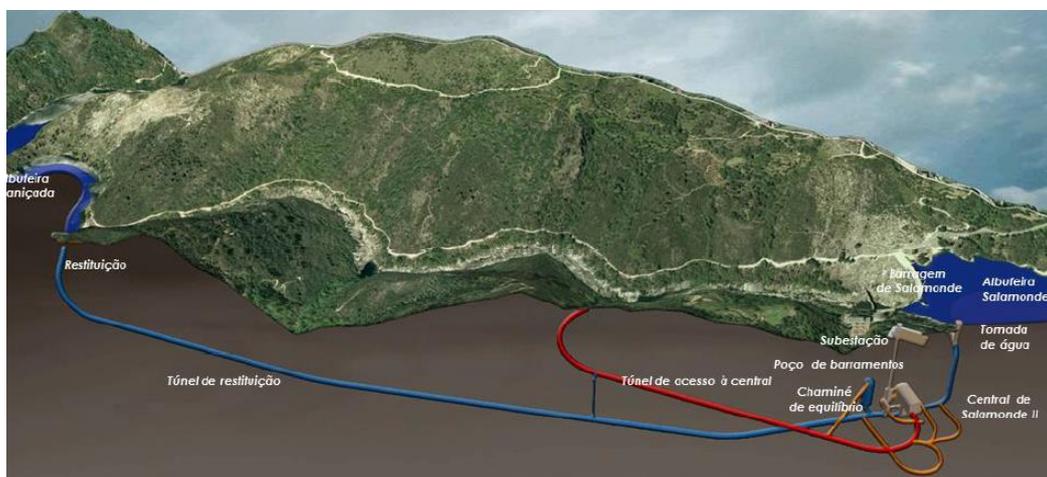


Figura 16: Esquema Projeto Barragem de Salamonde II (Fonte: EDP, 2016).

Os órgãos complementares, nomeadamente, a eclusa de navegação, elevadores de barcos e eclusa de peixes, são introduzidos, para diminuir os impactes provocados pelas barragens, por exemplo na barragem da Crestuma-Lever, em que se introduziu uma eclusa de navegação (Figura 17).



Figura 17: Eclusa de Navegação, ao lado direito do corpo de barragem (Fonte: APA, 2016).

As chaminés de equilíbrio, são órgãos fundamentais, que se instalam com o objetivo de proteger as condutas forçadas contra o choque hidráulico, Figura 18. O choque hidráulico ocorre quando se fecha uma válvula de retenção, a jusante. A camada de líquido imediatamente a jusante pára imediatamente, contudo as camadas vizinhas têm tendência a continuar com movimento e afastam-se da válvula. Este movimento de fluido vai-se propagando para as restantes camadas e gera-se deste modo uma onda de

depressão. Por isso, este dispositivo deve estar o mais a jusante possível, para reduzir a intensidade do choque hidráulico, no troço a montante da camara. A utilização de chaminés de equilíbrio está limitada pelas condições topográficas e é constituída por um reservatório em contato com a superfície livre (Lencastre, A., 2003).

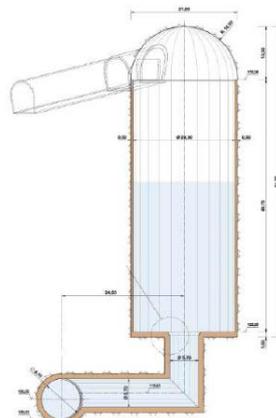
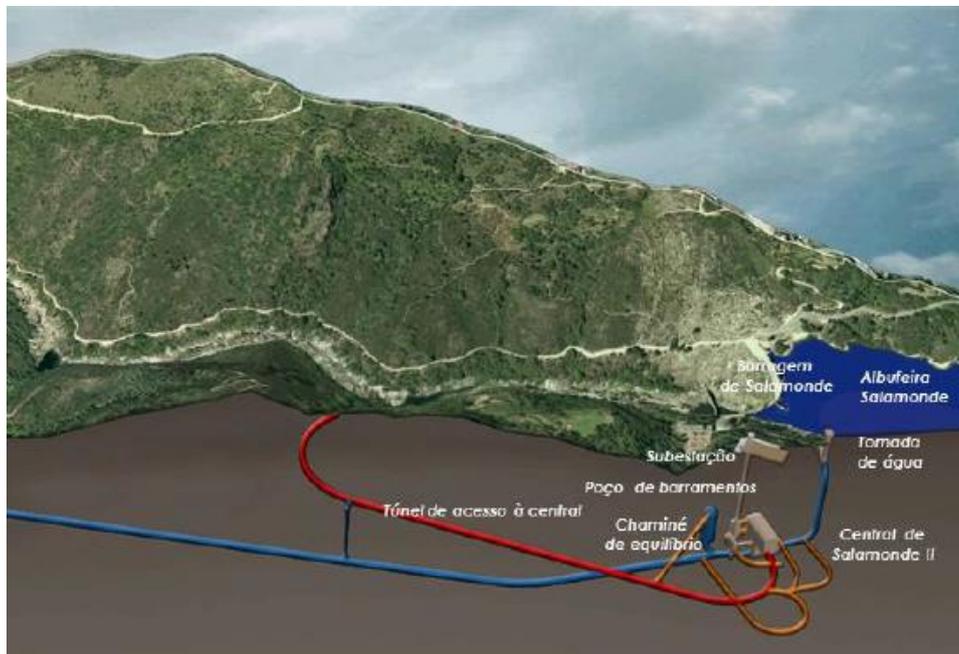


Figura 18: Chaminé de Equilíbrio introduzida no reforço de potência Salomonde II (Fonte: EDP, 2016).

A construção de uma barragem implica que o ambiente seja seco, durante grande parte do tempo da sua construção. Para criar o ambiente mais favorável, implementam-se obras de derivação provisória, que desviam o curso natural da água e as ensecadeiras, que servem de barreira para a entrada de água. A construção dos órgãos de desvio provisório implicam condicionalismos que estão associados as características hidrológicas do curso de água na secção da construção (Faria, N., 2013). Exemplo de uma obra de derivação,

foi aplicada na construção da barragem de Pedrogão (Figura19), construída pela empresa Ferreira Lemos Engenharia (FLE).



*Figura 19: Obra de derivação de caudal - Barragem de Pedrogão (Fonte: FLE, 2016).*

### 2.2.1 Classificação das Barragens

Em relação à finalidade a que se destinam as barragens, podem dividir-se em barragens para criação de albufeiras, derivação, detenção e para fins múltiplos. Uma barragem que seja construída para a criação de uma albufeira tem geralmente como objetivo permitir o armazenamento da água afluente em excesso em épocas húmidas para ser utilizada em períodos secos. As barragens de derivação são criadas para rega, consumo público e produção de energia elétrica em que a água é captada dos rios. No caso das barragens de detenção são criadas para dois objetivos: controlo de cheias, uma vez que estas estruturas criam reservatórios de grandes dimensões e têm a capacidade de regularizar o caudal, evitando a propagação de cheias a jusante e acumulação de material sólido, podem ser criadas para apenas um dos objetivos descritos ou para os dois em simultâneo. Quando se constrói uma barragem para múltiplos fins, esses são para rega, produção de energia, controlo de cheias, entre outros objetivos (Quintela, A., 1990).

As barragens podem ser classificadas de acordo com vários critérios entre os quais, a altura do corpo da barragem, o tipo de materiais e estrutura que se adopta (Quintela, 1990).

A classificação em pequenas ou grandes barragens é atribuída, em conformidade com os critérios da Comissão Internacional das Grandes Barragens, ICOLD, que define como grande barragem:

- Uma barragem com mais de 15 metros de altura, desde o início da fundação até ao coroamento;
- Uma barragem com altura entre 10 e 15 metros, desde que cumpra os seguintes requisitos:
  - O desenvolvimento do coroamento ser superior a 150 metros;
  - O volume armazenado ser maior ou igual a 100 000 de m<sup>3</sup>;
  - O caudal de ponta de cheia ser superior a 2000 m<sup>3</sup>/s;
  - Existirem problemas especiais na fundação;
  - A barragem ter origem em projeto não convencional.

Consideram as restantes barragens, como barragens de pequena dimensão.

As barragens classificam-se de acordo com o material e estrutura que se adopte na construção, como barragens de betão, aterro e mistas.

#### *2.2.1.1 Barragens de Betão*

As principais características das barragens de betão prendem-se com a sua dimensão e os materiais utilizados. Para o seu dimensionamento é necessário considerar as ações internas, ambientais e as que vão sendo criadas pelo desenvolvimento do processo construtivo, como a colocação dos materiais e equipamentos, a colocação do betão, o seu período de presa e arrefecimento, e as ações ocorridas durante a fase de exploração. Ainda na parte do cálculo da estrutura de betão, são considerados as pressões hidrostáticas no primeiro enchimento e na exploração da obra, as pressões hidrodinâmicas devido aos

descarregamentos e a ocorrência de sismos induzidos devido à acumulação de sedimentos na albufeira (Quintela, 1990).

As barragens de betão podem ser construídas pelo método convencional, Figura 20, ou pelo método de betão compactado com cilindro – BCC, Figura 21. Este método apresenta algumas vantagens em relação ao primeiro, como o elevado ritmo de construção, a redução do número de operários disponíveis na obra e a facilidade da circulação pedonal e dos equipamentos. Em contrapartida, exige uma melhor planificação dos trabalhos, uma vez que a execução deste tipo de obra condiciona a colocação de outros órgãos. Verifica-se também um difícil controlo da fissuração, por realização de betonagens em zonas frias ou segregação dos componentes de betão (Monteiro, G., 2007).



Figura 20: Método construtivo convencional (Fonte: LNEC, 2016).



Figura 21: Método do betão compactado com cilindro (Fonte: LNEC, 2016).

As barragens de betão podem ser classificadas de acordo com a sua estrutura, existindo as designadas barragens de gravidade, abóbada e com menos frequência as barragens em alvenaria.

As barragens de gravidade, podem ser maciças ou aligeiradas. São caracterizadas pela sua fácil construção, pela elevada compatibilidade com os vários tipos de descarregadores de cheia, pela facilidade de adaptação a qualquer tipo de vale e pelo facto do peso do corpo da barragem dar um contributo a nível de estabilidade estrutural. A maior desvantagem deste tipo de barragem é a elevada quantidade de betão utilizado, o que as torna bastante suscetíveis a sismos e a uma inadequação a solos rochosos. É o género mais abundante das barragens de betão, implementado preferencialmente em vales curtos. Exemplo deste tipo de barragem é a de Carrapelo, Figura 22, que entrou em funcionamento no ano de 1972, no distrito do Porto, em que o corpo de barragem tem uma altura de 57 metros.

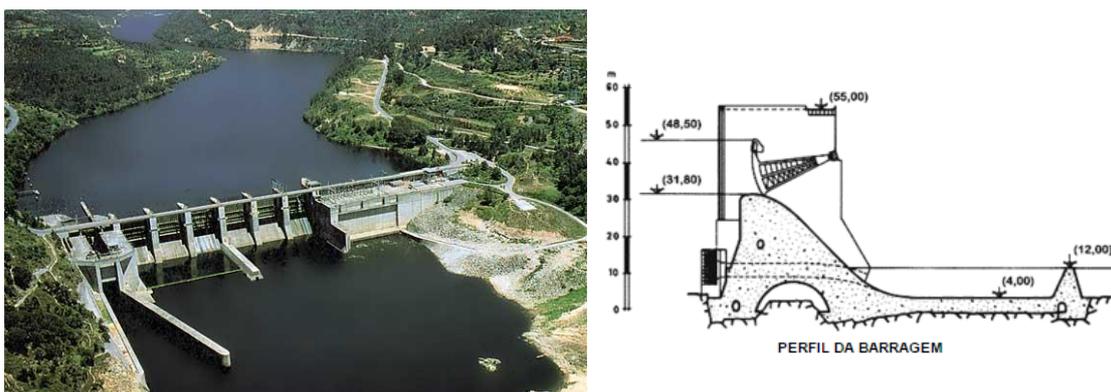


Figura 22: Barragem de Carrapelo (Fonte: APA, 2016).

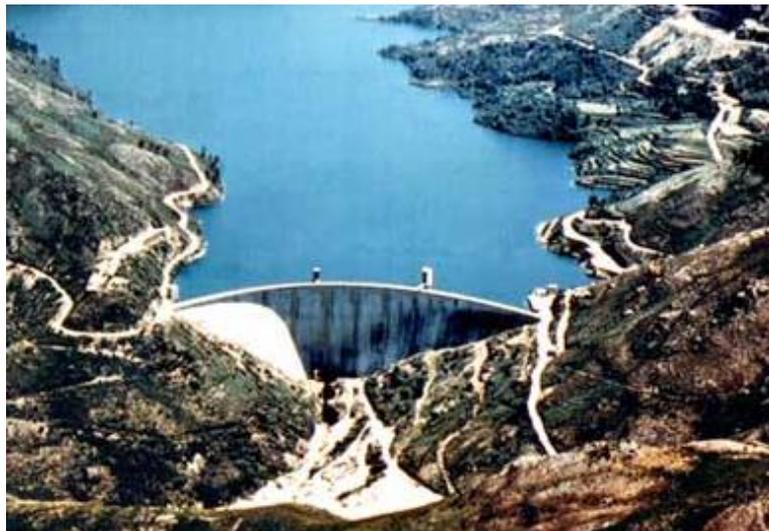
A forma das barragens de abóbada é determinante para resistir às ações da água. O seu funcionamento em arco, transfere os esforços para os apoios, o que requer maciços de elevada qualidade. A sua estreita largura reduz a utilização de betão, permitindo uma maior altura do corpo da barragem. É compatível com diversos órgãos de descarga, tem um bom comportamento em situações de galgamento e perante situações sísmicas. São atribuídas designações às barragens de abóbada em relação á sua curvatura:

- Abóbadas simples: apenas têm uma curvatura em planta, existem vários casos pelo mundo, como é exemplo a barragem de Atazar em Madrid, Figura 23, finalizada em 2014, com uma altura de 134 metros desde a fundação. Em Portugal, foi construída

no ano de 1972, a barragem de Vilarinho das Furnas, Figura 24, com 94 metros de altura.



*Figura 23: Barragem El Atazar, Madrid (Fonte: Wikipedia, 2016).*

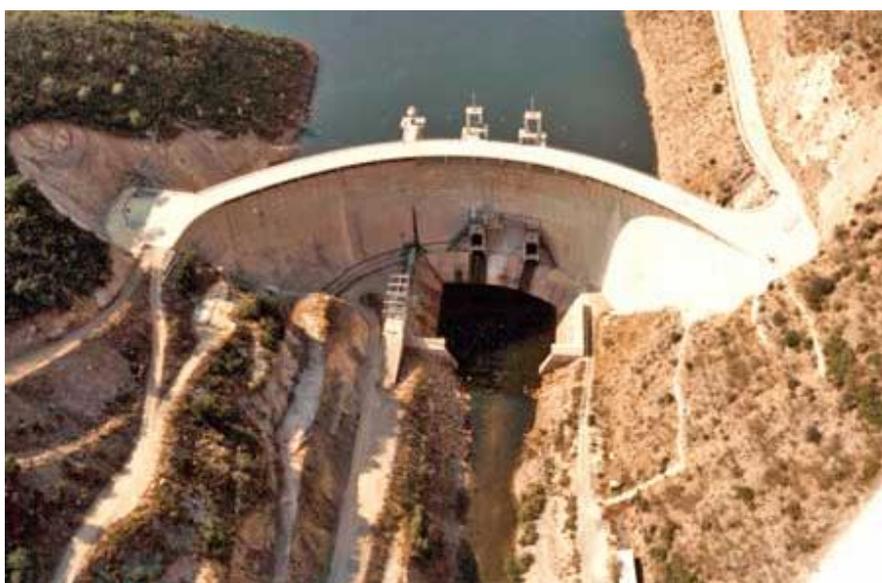


*Figura 24: Barragem de Vilarinho das Furnas (Fonte: APA, 2016).*

- Abóbadas de dupla curvatura: verifica-se quando admite curvamento em ambas as direções, horizontal e vertical. Estas requerem um estudo mais cuidadoso e uma execução da obra mais rigorosa. A barragem de Morrow Point, Figura 25, com uma altura total de 143 metros, no estado de Colorado, Estados Unidos da América, com data de abertura em 1968 é um exemplo deste tipo de barragem. Em Portugal, a Barragem do Funcho, em Faro, é de igual modo um exemplo deste tipo de barragem, Figura 26.



*Figura 25: Barragem Morrow Point, Colorado (Fonte: Wikipedia, 2016).*



*Figura 26: Barragem do Funcho (Fonte: APA, 2016).*

Como foi referido anteriormente, as barragens podem ser classificadas em gravidade ou abóbada. Contudo, existem obras em que são adotadas soluções construtivas em que se associam as duas tipologias, como é o exemplo das barragens de Arco-gravidade, uma solução adotada quando os vales são muito largos, em que é utilizado o perfil gravítico a jusante, com maior inclinação e uma curvatura em planta. Assim como as barragens em contrafortes. Existem apenas duas em Portugal, que apresentam uma estrutura contínua a

montante, que assegura a estanquidade, suportada a jusante por elementos descontínuos – contrafortes (Quintela, 1990).

A nível internacional, a barragem de Hoover (Figura 27) é considerada a primeira grande barragem em arco gravidade do mundo, construída entre a fronteira dos estados de Arizona e Nevada, com 221 metros de altura desde a fundação.



*Figura 27: Barragem de Hoover (EUA. 1936) (Fonte: Meliço, 2010).*

A nível nacional, no distrito de Santarém, a barragem de Pracana, é constituída por um corpo de barragem em contrafortes, com uma altura de 60 metros (Figura 28).



*Figura 28: Barragem de Pracana (Fonte: APA, 2016).*

As barragens de alvenaria são caracterizadas por corpos de barragens de menor dimensão, em que o peso próprio do corpo garante a estabilidade. Um exemplo, é a barragem de Penide, Figura 29, inaugurada no ano de 1951, na bacia hidrográfica do Rio Cávado.

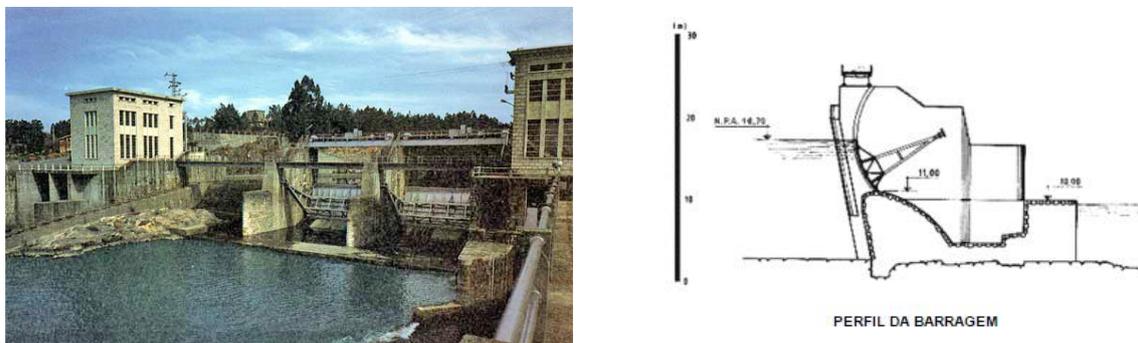


Figura 29: Barragem de Penide e geometria esquemática (Fonte: APA, 2016).

### 2.2.1.2 Barragens de Aterro

As barragens de Aterro podem ser constituídas por variados materiais, desde a pedra, o cascalho, a areia e a argila, sendo materiais abundantes na crosta terrestre. Para este tipo de obras são necessárias elevadas quantidades de material, não requerendo processos de transformação, embora seja necessário um maior controlo das características do material e da sua colocação em obra. São materiais que se adaptam facilmente às características do solo de fundação, admitem um bom comportamento quando sujeitos a situações de gelo/degelo, o que permite a implantação deste tipo de barragens em locais de elevada altitude. Os principais obstáculos neste tipo de obras são a impossibilidade do uso de comportas e não ser permitido a construção da descarga de fundo no corpo da barragem. A possibilidade de galgamento não se pode colocar, uma vez que poderia causar o colapso da obra por erosão, (Lança, 1997).

Este tipo de barragens podem possuir perfil zonado ou homogéneo:

- Os corpos de barragens constituídos por um único material, são designados por homogéneos, e garantem uma permeabilidade suficientemente reduzida para permitir níveis aceitáveis de percolação, no entanto, quando este fenómeno não é controlado recorre-se á introdução de drenos, que podem ser colocados de diferentes modos no perfil,

drenos em chaminé, na horizontal, combinados, ou no pé do talude. Geralmente, admitem inclinações distintas a montante e a jusante, Figura 30.

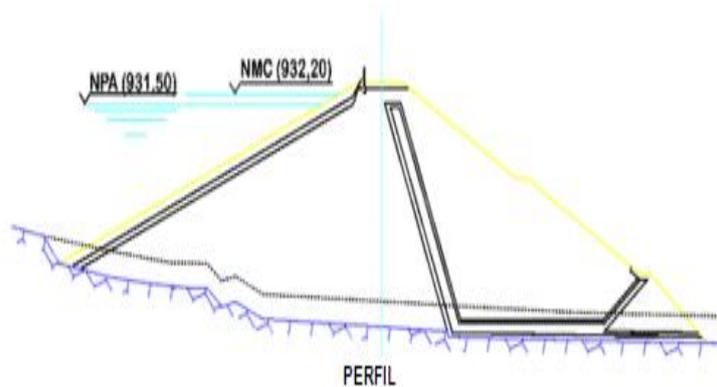


Figura 30: Barragem de Prada (Fonte: APA, 2016).

- Quando o corpo de barragem é composto por dois materiais distintos, classifica-se o perfil como zonado, Figura 31. Neste caso, o material com o coeficiente de permeabilidade mais reduzido é utilizado no interior do perfil e o segundo solo, mais permeável ou enrocamento, é utilizado nos taludes. É essencial a existência de um filtro para estabelecer a fronteira entre os materiais, de modo a evitar fenômenos de erosão no interior do talude, (Lança, 1997).

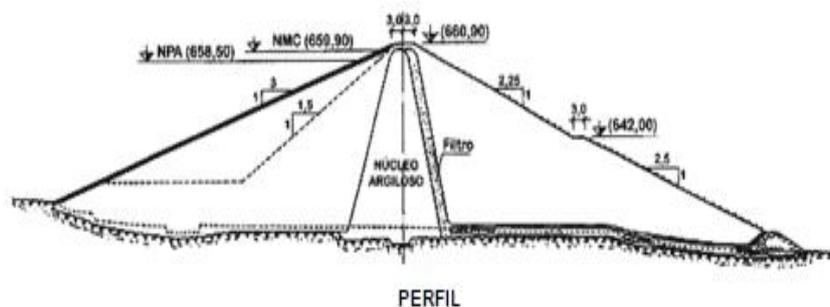


Figura 31: Barragem de Alijó (Fonte: APA, 2016).

### 2.2.1.3 Barragens Mistas

As barragens mistas são caracterizadas pela junção de betão e de enrocamento. Este tipo de obras é impulsionado pela topografia do local ou pela possibilidade de aproveitamento do material removido em aterros. Normalmente, estas barragens são constituídas por um perfil em betão, com estrutura em gravidade ou abóbada, nas zonas de vales e rios onde se encontram inseridas as estruturas descarregadoras, a parte restante do corpo de barragem é em enrocamento, (Monteiro, G., 2007). A barragem de Caia, Figura 32, é uma barragem mista localizada na bacia hidrográfica do Guadiana, com 55 metros de altura é constituída por uma parte em betão (contrafortes) e por outra parte em aterro.

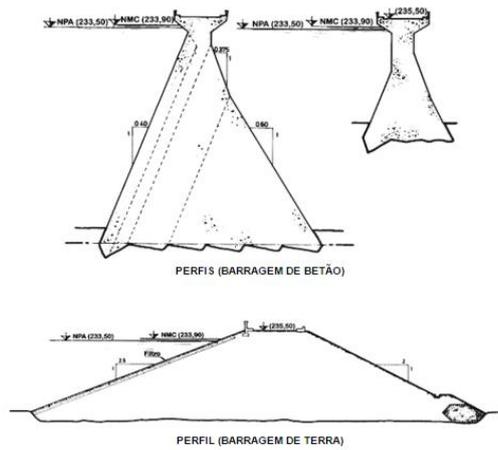


Figura 32: Barragem de Caia (Fonte: APA, 2016).

## 2.3 Regulamentos e Normas

### 2.3.1 Regulamento de Segurança em Barragens (RSB)

Em 1968 foi estabelecido o primeiro Regulamento de Pequenas Barragens de Terra, que posteriormente foi substituído, em 1993, pelo Regulamento de Pequenas Barragens. As questões de segurança em barragens de grande dimensão são estabelecidas, no Decreto-Lei nº 11/90 de 6 de janeiro. Para boa prática deste Regulamento de Segurança de Barragens, foram estabelecidas normas de projeto de barragens, normas de observação e inspeção de barragens, Portaria nºs 846/93 e 847/93 de 10 de Setembro, Portaria nº 246/98 de 21 de Abril, respetivamente.

Foi efetuada uma revisão aprofundada e detalhada aos Regulamento de Segurança de Barragens, em vigor desde 1990, pela Subcomissão de Regulamentos de Barragens. A Subcomissão é constituída: por o Conselho Superior de Obras Públicas e Transportes, a EDP – Eletricidade de Portugal, o Instituto da Água, o Instituto de Desenvolvimento Rural e Hidráulica, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil, o Serviço Nacional de Bombeiros e a Proteção Civil, a Universidade Nova de Lisboa, a Universidade do Porto e a Universidade Técnica de Lisboa. Esta revisão deu origem ao Decreto-Lei nº 344/2007 de 15 de Outubro, que revoga o anterior Decreto-Lei nº11/90, de 6 de Janeiro.

Este regulamento tem como objetivo implementar a segurança de barragens durante as fases de projeto, construção, primeiro enchimento, exploração e abandono, de acordo com o descrito no seu primeiro artigo. Aplica-se a barragens com altura superior a 15 metros, medidos desde a fundação até ao coroamento da barragem e abrange de igual modo barragens com capacidade superior a 100 000 m<sup>3</sup>. Este tipo de estrutura é também classificada em função dos danos potenciais a ela associados, atribuindo-se-lhes classes, de acordo com a ocupação humana de bens e ambiente, Tabela 1.

Tabela 1: Classificação de barragens Fonte: DL 344/2007.

Ocupação humana, bens e ambiente	
Classe I	Residentes nas imediações, em número igual ou superior a 25;
Classe II	Residentes nas imediações, em número inferior a 25 ou infra estruturas e instalações importantes ou bens ambientais de grande valor e dificilmente recuperáveis ou existência de instalações de produção e armazenamento de substancia perigosas;
Classe III	As restantes barragens.

As entidades envolvidas no controlo de segurança, em todas as fases de execução da barragem, desde a realização do projeto até a exploração, são da responsabilidade da Comissão de Segurança em Barragens (CSB), do Dono de Obra e da Administração Publica, nomeadamente, a Agência Portuguesa do Ambiente (APA), o Serviço Nacional de Proteção Civil (SNPC) e o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

A Autoridade Nacional de Segurança de Barragens, indicada no artigo 6.º, do regulamento atribui à APA a responsabilidade de promover e fiscalizar o cumprimento. Esta Autoridade foi o resultado da fusão de 9 organismos da Administração Pública, inclusive o Instituto da Água (INAG), antiga Autoridade Nacional, indicada no RSB. Em todas as etapas de realização da obra, nos termos do RSB, esta entidade é responsável por promover a intervenção do LNEC, por colaborar com o SPNC no planeamento e acompanhamento em situações de emergência, pela determinação para a realização de ensaios e estudos que garantam a qualidade da obra. Compete à Autoridade, intervir junto do dono de obra no caso de incumprimento do presente regulamento, podendo determinar o condicional desenvolvimento da obra ou mesmo levar à sua demolição.

Segundo este regulamento, (artigo 7º), o LNEC, criado no ano de 1946, sendo uma instituição pública de ciência e tecnologia, com o estatuto de Laboratório do Estado, terá intervenção em barragens de Classe I, competindo-lhe a revisão e o controlo dos planos de observação da barragem nas várias fases, especialmente na fase de construção e do primeiro enchimento, no caso de ser solicitado pelo dono de obra e com a aceitação por parte da Autoridade. O LNEC pode ainda realizar os planos de observação descritos anteriormente, assim como ensaios e estudos solicitados pela Autoridade.

O LNEC é ainda a entidade responsável pela compilação e armazenamento de dados, em modo informático, das várias barragens de modo a manter o conhecimento atualizado do seu comportamento. Também lhe é conferida a responsabilidade da monitorização e observação das barragens ao longo do tempo e de efetuar inspeções, caso se justifique.

O Sistema Nacional – Autoridade Nacional de Proteção Civil, constituído por várias forças de segurança e armadas, corpos de bombeiros, INEM, entre outros é responsável pela implementação de medidas de segurança e quando justificado pela prestação de serviços de resgate e de salvamento. Para barragens de Classe I, esta é a entidade responsável pela emissão de um parecer sobre o plano de emergência interno, nos aspetos que interferem com o plano externo e sistemas de alerta de aviso, assim como promover a sua elaboração para ser aprovado pela Comissão Nacional de Proteção Civil.

A CSB, é, segundo o artigo 9º do regulamento uma comissão presidida por um elemento designado pelo Governo com tutela sobre a APA, e constituída por vários elementos com conhecimento na área (Tabela 2).

*Tabela 2: Representantes da Comissão de Segurança de Barragens.*

Nº de representantes	Entidade
3	Autoridade Nacional de Segurança de Barragens
3	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
2	Autoridade Nacional da Proteção Civil
1	Autoridade Marítima Nacional
3	Professores Universitários de Engenharia Civil
1	Comissão Nacional Portuguesa de Grandes Barragens
1	Ordem dos Engenheiros
2	Grande concessionária de Aproveitamentos Hidroelétricos
1	Ministério da Agricultura e do Mar
1	Entidade Responsável pela Gestão do Alqueva
2	Associações de Agricultores
1	Produtores de Energias Renováveis
1	Associação Nacional de Municípios Portugueses

Compete á CSB pronunciar-se sobre os assuntos de segurança de barragens, analisar as situações e recomendar ao Governo e à Autoridade a adoção de medidas para salvaguardar a segurança de barragens.

O dono de obra, está presente em todas as fases, de projeto, de construção, do primeiro enchimento ou esvaziamento e na fase de exploração, e tem obrigações em todas as fases mencionadas. Este, é responsável pela elaboração do projeto, pela nomeação do diretor técnico, por manter o livro técnico atualizado, por assegurar, em todas as etapas, o cumprimento dos planos elaborados, por criar as condições necessárias para a interação entre todas as entidades envolvidas e por suportar as despesas originadas pelo controlo de segurança assim como da Administração Pública em função do tipo de barragem, dos danos potenciais associados e da dimensão da obra. As suas obrigações estão detalhadamente indicadas no artigo 10º, do regulamento.

Em caso de acidente, é nomeada pela Autoridade uma comissão de inquérito responsável pela identificação das causas e fatores que deram origem ao acidente. A compilação desta análise contribui para o processo de conhecimento para que não se verifique novamente a mesma situação ou semelhante.

O controlo de segurança é garantido com a realização de um projeto, composto por disposições de segurança, medidas preventivas para evitar acidentes e incidentes e pelo plano de observação. No projeto, devem estar incluídos os vários estudos e medidas de utilização para os materiais e equipamentos, os critérios de dimensionamento da barragem e dos órgãos de exploração e segurança, assim como a justificação das escolhas anteriormente mencionadas.

O plano de observação, visa o controlo das principais fases de obra, construção, primeiro enchimento, primeiro período de exploração e subsequente, estando nele contidas disposições de periodicidade das inspeções visuais, o tipo de inspeção a efetuar, os aspetos a ter em conta e a forma de apresentação dos resultados observados. A Autoridade é a responsável pelas inspeções realizadas, caso seja detetada alguma anomalia, esta entidade pode suspender os trabalhos e são reiniciados quando as condições forem repostas. Esta entidade é responsável pela comprovação da obra na fase final e autoriza o primeiro enchimento da barragem.

O primeiro enchimento é a fase mais crítica da vida da obra, tem um risco elevado envolvido, é fundamental a monitorização do comportamento do corpo da barragem, o estabelecimento da frequência de recolha de dados e sempre que se justifique, efetuar inspeções durante os patamares de enchimento e verificar a operacionalidade dos órgãos

de segurança e exploração. Nesta fase é necessário a presença da proteção civil no caso de se justificar a sua intervenção.

Com a análise do comportamento após o primeiro enchimento, e caso este esteja em conformidade com as normas e o regulamento, a Autoridade aprova a exploração do aproveitamento.

Na fase de controlo de segurança, durante a exploração, cabe ao dono de obra garantir o cumprimento das regras de exploração, assim como recolher informação do comportamento da barragem. Quando se encontra perante uma situação de esvaziamento rápido o dono de obra deve comunicar à Autoridade e realizar um relatório do comportamento da obra. Nesta fase, a Autoridade continua a realizar inspeções periódicas, com a presença do responsável pela exploração, com a colaboração do LNEC, em que os objetivos dessas visitas são a inspeção visual da obra, dando relevância à existência de fissuras, deslocamento, ressurgências e erosões.

É necessário também um controlo de segurança ambiental, em que é avaliada a qualidade da água, a alteração dos níveis freáticos e os aspetos ecológicos, de modo a minimizar os impactes ambientais.

No caso de abandono ou demolição, é comunicado à Autoridade e a execução dos trabalhos é realizado com a garantia das condições de segurança. Esta situação é acompanhada pelo projeto de abandono, onde é justificada a medida tomada, a descrição do processo de retirada do serviço e soluções para mitigar ou eliminar as consequências negativas do abandono do projeto.

### 2.3.2 Normas de Projeto de Barragens

As Normas de Projeto de Barragens, anexas à Portaria n.º 846/93, dão resposta às disposições legais, estabelecendo princípios e critérios gerais de projeto de barragens, numa perspetiva de garantir a máxima segurança em obra e a sua economia.

O objetivo das normas é garantir a execução correta do plano de segurança, são apresentadas as fases de projeto, conseqüentemente os respetivos conteúdos de cada fase, como apresentado na Tabela 3.

*Tabela 3: Resumo das fases de projeto.*

Fases de Projeto de uma Barragem (Algumas destas fases, podem ser supridas, por acordo entre o dono de obra e o autor do projeto)	
1º Programa de Base (Artigo 11.º)	Objetivo e apresentação esquemática da obra; Apresentação das soluções propostas de forma clara, comparação das soluções apresentadas.
2º Estudo Prévio (Artigo 12.º)	Constituído por peças escritas e desenhadas da solução adotada anteriormente, necessárias para o efeito de esclarecimento; Apresentação de um relatório de apreciação preliminar do impacte ambiental; Tomada de decisão.
3º Anteprojeto (Artigo 13.º)	Constituído por peças desenhadas e escritas; Apresentação da declaração de Impacte ambiental; Definição sumária dos critérios de dimensionamento, modo de construção da obra e do orçamento da mesma.
4º Projeto (Artigo 14.º)	Constituído por peças escritas e desenhadas; Elementos de resultados de estudos em laboratório e <i>in-situ</i> ; Definição final de dimensionamento; Proposta de estaleiro; Medições, orçamento final e caderno de encargos.
Iniciação da construção das obras	
5º Projeto de Execução (Artigo 15.º)	Informação preconizada da informação contida no projeto; Adaptação às condições reais que forem encontradas durante a construção.

Para a construção de uma barragem é necessário realizar estudos para recolher informações e fazer a caracterização do local de implementação da construção, assim como da sua envolvente. Para estes efeitos são realizados estudos hidrológicos, geológicos e hidrogeológicos, sismológicos e geotécnicos, através de ensaios com

amostras dos locais e/ou ensaios realizados no campo de trabalhos, de modo a verificar se o local tem as capacidades necessárias para garantir a segurança da estrutura, assim como garantir que o solo de fundação suporta a carga sobre ele aplicada.

A implementação de um aproveitamento hidroelétrico causa bastante impacto no ambiente na fase de construção, assim como na fase de exploração. Para minimizar este impacto é obrigatória a adoção de medidas de mitigação para que o impacto global seja diminuindo. A declaração de impacto ambiental (DIA): “*visa identificar, descrever e avaliar as alterações no ambiente provocadas direta ou indiretamente pela barragem, albufeira e obras anexas, a curto, médio e longo prazo, e apresentar medidas preconizadas para eliminar ou mitigar alterações adversas*” (APA,2016).

Até, á publicação das DIA, decorre o estudo de impacto ambiental (EIA), na identificação, caracterização, avaliação e hierarquização dos condicionantes dos impactes ambientais, do tipo biofísico e social, económico ou cultural. A EIA apoiado em guias e legislação, deve ser rigoroso e fundamentado, de modo a atribuir uma compreensão clara das implicações ambientais do projeto, para apoiar a decisão de seleção de alternativas. Este estudo é um documento que serve de orientação aos intervenientes no processo de avaliação de impactes ambientais (AIA), consultores, promotores e autoridades de AIA.

A AIA avalia os possíveis impactes provocados, direta e indiretamente, na execução de projetos e determina medidas para reduzir os impactes ou compensá-los. Após a execução do projeto a AIA, procede à verificação do cumprimento das medidas adotadas.

No dimensionamento de barragens é necessário considerar os diferentes cenários correntes e de rutura, a definição dos modelos de ações, como ações devido à construção, à água, ao gelo e ao caudal sólido, às ações sísmicas e térmicas ambientais e á verificação das condições de funcionalidade de segurança.

Os órgãos de segurança e exploração, como os descarregadores de cheia, descargas de fundo e meio fundo, tomadas de água e centrais e circuitos hidráulicos associados à barragem, devem ser acompanhados por uma devida justificação da solução adotada, dos critérios e modelos de dimensionamento e das soluções para obturações de emergência, reparações, manutenção e inspeção de rotina e quando necessário soluções para proteções e melhoramentos para a segurança dos órgãos descritos.

### 2.3.3 Normas de Observação e Inspeção de Barragens

Anexadas à Portaria 847/93, de 10 de Setembro, encontram-se as Normas de Observação e Inspeção de Barragens, com o objetivo de facilitar a aplicação do RSB, contendo diretivas para avaliar as condições de segurança estrutural e efetuar inspeções regulamentares e com periodicidade definida.

As atividades de inspeção e observação, são desenvolvidas pelo dono de obra, pela Autoridade e pelo LNEC. Esta última entidade é responsável pela execução do plano de observação, em concordância com o dono de obra. É realizado um plano de observação para cada fase de vida da barragem, desde a fase de projeto até ao abandono e demolição, em concordância com as normativas indicadas no RSB.

Nos planos de observação, devem constar as inspeções a realizar: inspeção visual de rotina, inspeção visual de especialidade e inspeção visual de carácter excecional. As inspeções de rotina, com periodicidade definida no plano, consistem na análise dos sinais ou evidências de deteriorização ou sintomas de envelhecimento, através de um conjunto de instrumentos e dispositivos, manuais ou automáticos, instalados para a medição das grandezas das ações. Nestas inspeções são recolhidos dados, sendo posteriormente analisados. As inspeções visuais de especialidade consistem na análise do comportamento da barragem, pelos agentes referenciados para o cargo, com periodicidade definida através da importância da obra, parâmetro que é definido de acordo com os critérios apresentados neste documento, adotados da Comissão Internacional das Grandes Barragens. Por fim as inspeções visuais de carácter excecional são da responsabilidade dos agentes mencionados anteriormente e do LNEC, em situações após a ocorrência de sismos importantes, grandes cheias, esvaziamentos totais ou outros abaixamentos significativos do nível da água.

Os planos de observação e inspeção, devem ter em atenção os principais locais e aspetos considerar para cada fase de vida, que possam pôr em causa a segurança da estrutura, assim como da envolvente. Caso seja detetada alguma anomalia, deve ser indicada de imediato à Autoridade e devem ser tomadas as medidas preconizadas.

#### 2.3.4 Normas de Construção de Barragens

A 21 de Abril de 1998, entraram em vigor as Normas de Construção de Barragens, dispostas pela Portaria nº246/98, onde se estabelecem os princípios gerais que devem orientar as atividades de construção de barragens, com base no projeto e ainda nas atividades de construção, relativas a reforço, demolição e abandono de barragens.

Antes do início dos trabalhos é necessário proceder à organização e garantir o controlo das atividades de construção. O diretor técnico, nomeado pelo dono de obra, é responsável pelas atividades de construção, pela coordenação e controlo de segurança no local de obra, assim como por manter atualizado o livro técnico da obra, onde são registadas as ocorrências com interesse do ponto de vista da segurança e elementos relativos à atividade de construção.

A fiscalização da obra, está a cargo da Autoridade e do dono de obra, que por sua vez elegem um corpo técnico responsável por averiguar se a construção da barragem está de acordo com o projeto e com o caderno de encargos, têm ainda de assegurar a coordenação e a segurança na execução dos trabalhos. Caso não se verifique a concordância, o corpo técnico de fiscalização tem o poder de suspender os trabalhos até que as correções devidas sejam feitas.

Para dar início à construção da barragem é necessário proceder ao plano de construção, constituído pelo projeto de execução, caderno de encargos e programa de trabalhos. O projeto de execução está apresentado na Portaria n.º 846/93, descrita anteriormente. O caderno de encargos inclui cláusulas técnicas e os desenhos necessários para garantir a qualidade na construção. Por fim, o programa de trabalhos destina-se a assegurar a coordenação eficaz da execução da obra, onde é apresentada a cronologia dos trabalhos, as implicações meteorológicas, a necessidade de instalação de laboratórios para controlo dos materiais e a concordância entre os trabalhos e a verificação da segurança da obra.

A implementação da obra, assim como a do estaleiro são responsabilidade do empreiteiro, do dono de obra e dos fornecedores. A localização deve atender à dimensão da obra e à acessibilidade ao exterior e às frentes de trabalho; deve minimizar o impacto provocado pela construção e permitir o abastecimento de água, potável e não potável, eletricidade e ar comprimido.

Nas Normas de Construção de Barragens, são enumerados os materiais, os equipamentos e medidas a tomar para os diferentes tipos de barragens em concordância com as normas e regulamentos, nomeadamente para, barragem de betão convencional e betão compactado com cilindro, barragens de alvenaria e barragens de aterro.

O betão utilizado nas barragens de betão convencional deve ser estudado com o objetivo de garantir as exigências da qualidade na construção, nomeadamente quanto à resistência mecânica e química, deformabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, características térmicas, dimensão máxima dos inertes e processo de colocação. É necessário preparar a superfície da fundação para a colocação do betão, caso esta esteja apta, deve proceder-se à colocação do betão no período de tempo mínimo possível. Com o início da betonagem sobre a fundação, o corpo da barragem começa a aumentar, através de sucessivas betonagens, com o auxílio de cofragens e as respetivas estruturas de montagem, em concordância com o idealizado no projeto. Nos períodos de baixa temperatura deve proteger-se a superfície da camada de betão com material isolante até a próxima betonagem ou no mínimo de uma semana. Nos períodos de chuva não deve ser realizada qualquer betonagem, uma vez que lhe está associado o risco de deslavo do betão.

O betão compactado com cilindro, é caracterizado como um betão seco que permite que a circulação do equipamento de transporte e compactação se processe sobre o betão fresco. Antes do início da construção da barragem deve executar-se um bloco experimental, não incorporado na barragem, para a realização de ensaios de modo a verificar se o betão confere as propriedades necessárias para posteriormente ser colocado no corpo da barragem. Uma vez que os equipamentos circulam sobre o betão é necessário fazer a limpeza dos rodados, para que não ocorra contaminação do betão. Assim como nas barragens de betão convencional, na ocorrência de eventos de precipitação suspendem-se os trabalhos de betonagem.

As barragens de alvenaria devem utilizar pedras que sejam compactas e resistentes, possuir textura uniforme, resistência mecânica adequada e apresentar uma superfície limpa e sem irregularidades, para facilitar a colocação em obra. As argamassas devem apresentar uma composição estudada laboratorialmente, de modo a garantir as propriedades esperadas. Na execução deste tipo de barragens, as pedras, devidamente limpas, são colocadas sobre uma camada pouco espessa de argamassa, que também se

---

aplica entre as pedras vizinhas. As superfícies devem manter-se húmidas durante os três dias que se seguem à sua execução. Quando se verifica um frio intenso, estes trabalhos são suspensos.

No caso das barragens de aterro, os solos devem ser devidamente estudados através de ensaios laboratoriais, e antes da colocação dos materiais em obra deve executar-se um aterro experimental em locais a aprovar pela fiscalização. Neste tipo de barragens recorre-se a implementação de filtros que devem possuir composição mineralógica com capacidade de resistência ao esmagamento. Com a devida preparação da fundação, procede-se a colocação do aterro, em que a colocação de cada camada tem de ser precedida pela aprovação das condições de compactação da camada anterior e inspeção prévia. A circulação dos equipamentos sobre o aterro tem de ser variado, para não criar zonas diferenciadas. O controlo de construção deve ser realizado através de ensaios de controlo de compactação, com frequência estipulada no projeto.

## **2.4 Órgãos de Segurança e Exploração**

Os órgãos de segurança e exploração são dimensionados para garantir a regularização do nível da água na albufeira, para condições normais de exploração e em situações de emergência. Também são utilizados como dispositivos de dissipação de energia e prevenção de possíveis erosões. Estas estruturas são, os descarregadores de cheia, as descargas de fundo e meio fundo e as bacias de dissipação.

Em determinados casos os descarregadores são controlados por comportas, estruturas geralmente metálicas que têm como finalidade controlar as descargas dos descarregadores e que permitem aumentar a capacidade de armazenamento da albufeira. Estão localizadas de forma que quando a abrem, a veia líquida sai a elevada velocidade (Santos, F., 2010).

### **2.4.1 Descarregadores de Cheias**

Os descarregadores de cheia são componentes de elevada importância por questões de segurança e por razões económicas. Segundo, Antunes 2011, a construção dos descarregadores de cheia correspondem entre 20% a 30% do custo total da obra. No caso

das Pequenas Barragens, com altura inferior a 15 metros, o custo da construção de descarregadores de cheia corresponde a 50% do valor total da obra.

A Portaria 846/93 – “ Normas de Projeto de Barragens”, Capítulo V, artigo 49º, refere que estes órgãos de segurança têm de assegurar a descarga de cheia de projeto, sem auxílio de órgãos, de modo a garantir a segurança da barragem, para não afetar as populações, as vias de comunicação e outras obras.

A escolha e conceção dos descarregadores de cheia é feita tendo em conta a fiabilidade da solução, o tipo de barragens, as condições topográficas do local de implementação, assim como das condições hidráulicas, caudais a descarregar, condicionalismos impostos a esses caudais e as condições de restituição a jusante.

Para o dimensionamento dos descarregadores de cheia, é fundamental conhecer a definição de cheia e associado período de retorno.

As cheias são caracterizadas como uma subida geralmente rápida do nível do curso de água. Têm impactos significativos nos sistemas económicos e sociais nas áreas afetadas. Podem distinguir-se as cheias progressivas e as rápidas (Ferreira, A., 2010).

As cheias progressivas verificam-se em bacias hidrográficas de grandes dimensões, devido a eventos de precipitação abundantes em que, a inundação vai sendo gradual. Estas cheias podem ser estimadas com base nas previsões meteorológicas da bacia hidrográfica ou das seções a montante.

As cheias repentinas, mais perigosas, são causadas devido a eventos de precipitação rápidos e fortes. Afeta principalmente bacias de pequena dimensão.

Para o estudo de cheia considera-se, o menor tempo de concentração, que se define como o tempo que a gota de água cinematicamente mais afastada, demora a chegar até à da secção de referência da bacia hidrográfica (Santos, F., 2010).

O período de retorno corresponde ao intervalo de tempo médio, associado à ocorrência de precipitação da intensidade média. Para o dimensionamento dos descarregadores de cheia, os critérios para a escolha do período de retorno estão definidos com base nas normas de projeto de barragem, artigo 6.º, ponto 3, alínea h), que remete para o anexo I. O período de retorno é escolhido com base nos seguintes critérios, Tabela 4.

---

Tabela 4: Período de retorno da cheia de projeto, em anos.

Barragem		Risco Potencial	
Betão	Aterro	Elevado	Significativo
$h \geq 100$	$h \geq 50$	10 000 a 5 000	5 000 a 1 000
$50 \leq h < 100$	$15 \leq h < 50$	5 000 a 1 000	1 000
$15 \leq h < 50$	$h < 15$	1 000	1 000
$h < 15$	-	1 000	500

Existem diversos tipos de descarregadores nomeadamente, os descarregadores de superfície, descarregadores em degraus e descargas de fundo e meio fundo, que se descrevem em seguida.

#### 2.4.1.1 Descarregadores de superfície

São tradicionalmente utilizados em barragens de betão, podendo no entanto ser empregues maioria dos corpos de barragem, exceto nas de aterro. A descarga pode ser realizada livremente ou controlada por comportas.

Os descarregadores de superfície são constituídos, em geral, por uma soleira sobre o corpo da barragem, seguidamente por um canal ou túnel, e por fim por uma bacia de dissipação. Estas servem para evitar a erosão do leito do rio dissipando a energia antes da devolução ao curso de água natural sendo, geralmente revestidas em betão, (Lencastre, 2001).

Com a construção da barragem, é criado um desnível entre as superfícies livres a montante e jusante. Quando se verifica a passagem da água de montante para jusante, existe uma elevada quantidade de energia. O excesso de energia dos escoamentos implica importantes flutuações a jusante, levando à ocorrência de alguns fenómenos indesejáveis, nomeadamente, cavitações, vibrações, escavações e erosões e ações hidrodinâmicas. Para minimizar estes fenómenos são aplicadas medidas para reduzir a energia do escoamento, assim como a adoção de órgãos para o efeito (Figueiredo, N., 2010). Os órgãos adotados para a dissipação de energia são selecionadas em função do tipo do aproveitamento hidroelétrico, dos valores dos caudais a descarregar e das características topográficas e geológicas do local de implementação. Enumeram-se, em seguida as estruturas de dissipação de energia mais frequentes.

- Dissipação por Salto Ski: o jato é projetado por ação de um trampolim contruído na extremidade do descarregador, Figura 33. Utilizam-se quando o nível da água a jusante é mais baixa e não existe colchão de amortecimento. Em alguns casos podem ser adicionados arejadores, no canal de escoamento, para diminuir a velocidade.



Figura 33: Barragem de Miranda do Douro (Fonte: APA, 2016).

- Dissipação por jatos cruzados: a perda de energia dá-se pelo cruzamento de jatos no ar, embatendo um no outro e provocando uma grande perda de energia, Figura 34.



Figura 34: Barragem de Agueira (Fonte: APA, 2016).

- Dissipação por ressalto hidráulico: no escoamento ocorre o fenómeno de ressalto hidráulico, quando a queda de água é alta. O ressalto hidráulico dá-se com a passagem repentina do escoamento em regime rápido para regime lento. Verifica-se uma elevada turbulência, no comprimento do ressalto. Geralmente, é necessário proteger o trecho do rio, como por exemplo com um colchão de água, Figura 35.



Figura 35: Barragem de Torrão (Fonte: APA, 2016).

- Dissipação por macro rugosidades: é construída uma rampa onde são dispostos blocos, para que escoamento ao embater nestas estruturas perca energia, Figura 36. Este tipo de estruturas são essencialmente utilizadas em canais, com pequenos caudais e em regiões onde não se forma gelo.



Figura 36: Dissipação por blocos (Fonte: Figueiredo, N., 2010).

Outra estrutura de dissipação de energia são as bacias de dissipação por rolo, “*roller bucket*”. Neste caso a energia dissipa-se por ressalto submerso e aplica-se em situações que o nível da água a jusante é consideravelmente maior que o nível de uma bacia de dissipação (Lencastre, A., ).

Nos descarregadores em queda livre, a dissipação de energia é feita diretamente no leito do rio. A água proveniente do descarregador de cheia, em forma de jato, causa grandes erosões, devido à sua elevada energia. Para reduzir esse efeito é criado, em alguns casos, um colchão de água ou uma bacia de receção revestida a betão. A barragem de Caniçada foi dimensionada em 1955 com este tipo de descarregador (Figura 37).

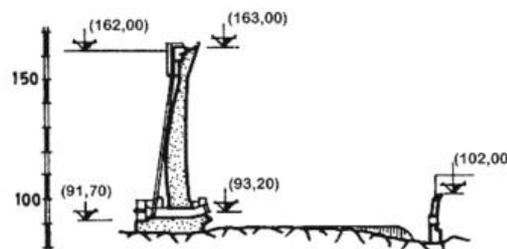


Figura 37: Perfil da barragem de Caniçada (Fonte: APA, 2016).

As barragens de aterro estão sujeitas a assentamentos diferenciais, próprios deste tipo de estrutura, podendo dar origem a fissuras, a deformações e à erosão do material que

constitui a barragem, pelo que não suportam geralmente descarregadores no corpo da barragem.

Geralmente, nas barragens de aterro são utilizados descarregadores de poço, que podem ser verticais ou inclinados. Estes são seguidos de túneis ou galerias sob a barragem ou numa das encostas do vale de encaixe da barragem. Este tipo de descarregador torna-se vantajoso na fase de obra, uma vez que os túneis e as condutas são geralmente utilizados para desvio provisório. O escoamento da água no túnel ou galeria prevê-se que seja realizado em superfície livre, por questões de segurança estrutural, para isso é necessário introduzir uma conduita de arejamento, que concentra o escoamento na zona do extradorso e introduz o ar necessário para que o escoamento se apresente como pretendido, imediatamente a jusante do túnel (Lencastre, 2001), Figura 38. Um exemplo da aplicação deste tipo de descarregador é na barragem de Paradela.

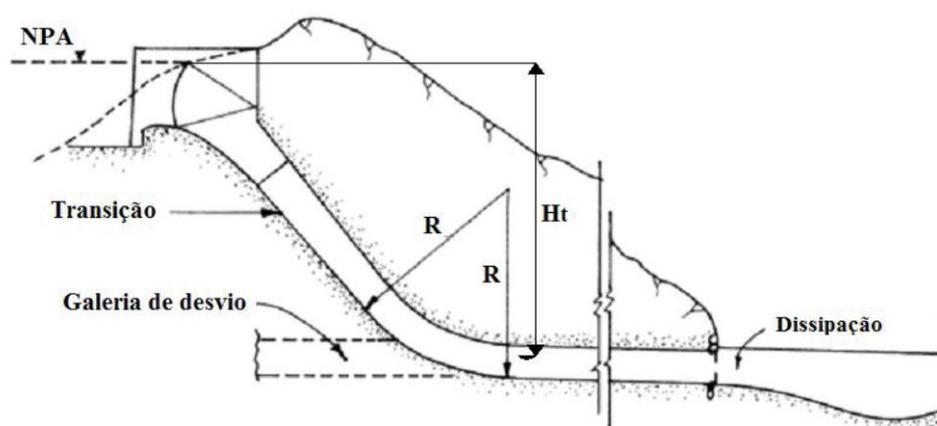


Figura 38: Esquema de um descarregador em túnel (Fonte: Marques, A., 2012).

#### 2.4.1.2 Descarregadores em degraus

O descarregador em degraus é considerado pela ICOLD, (1994), como um descarregador não convencional. Este tipo de descarregador foi desenvolvido para o aumento de dissipação de energia ao longo da própria soleira descarregadora, reduzindo o custo de obra, uma vez que já não é necessário obras de dissipação de energia a jusante do canal.

Este tipo de descarregador é constituído por degraus com alturas variáveis entre 0,6 e 0,9 metros, que provocam uma perda de velocidade no escoamento entre 10 e 20 m/s (Lencastre A., 2001).

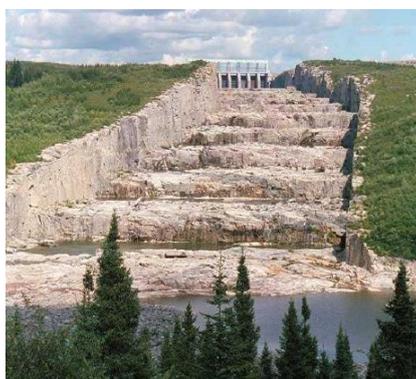
Existe quatro tipos de descarregadores não convencionais, Figura 39, nomeadamente, descarregadores em betão armado *in-situ* (BCC) (a), em gabiões com soleira em degraus (b), sobre terra armada (c) e de blocos de betão pré-fabricado com soleira em degraus (d).



a) Descarregador em betão armado;



b) Descarregador em Gabiões;



c) Descarregador em terra armada



d) Descarregador em blocos de betão pré-fabricado.

Figura 39: Descarregadores não convencionais (Fonte: Antunes, M., 2011).

#### 2.4.1.3 Descargas de fundo e meio-fundo

As descargas de fundo e meio fundo são construídas essencialmente, por um orifício protegido por uma grelha e a jusante da boca existe uma comporta. São necessárias para um melhor controlo do primeiro enchimento e como preconizado na legislação, para em situação de emergência proceder ao esvaziamento da albufeira.

As descargas de fundo, Figura 40, têm como funcionalidade, a eliminação de transporte de substâncias solidas, para baixar o nível da albufeira de modo a permitir a visita e a reparação da barragem e obras anexas e pela eventual necessidade de um rápido esvaziamento. É fundamental a implementação de descargas de fundo e meio-fundo, (Lencastre, 2001).



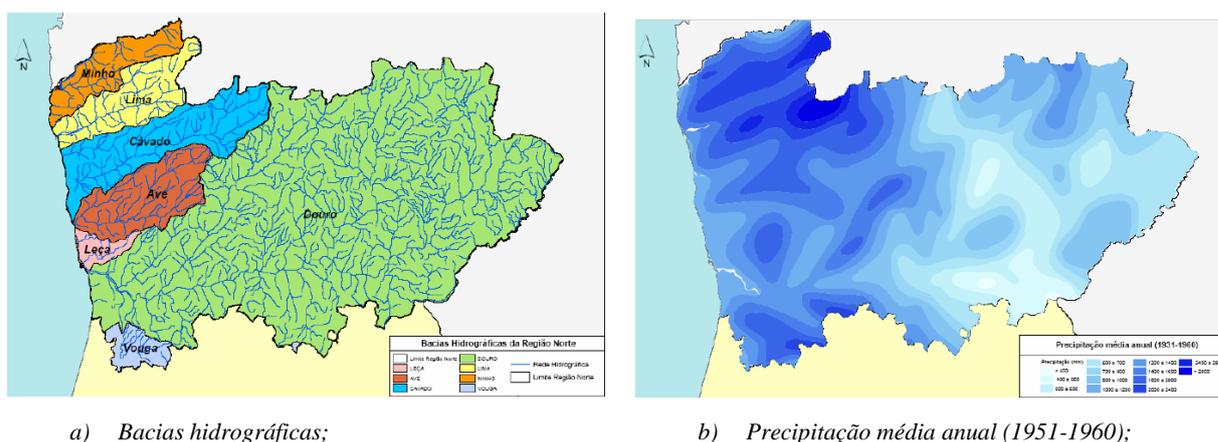
*Figura 40: Descarregador de Fundo – Barragem de Ribeiradio Ermida (Fonte: COBA).*

### 3 Sistema Cávado-Rabagão-Homem

Neste sistema, grande parte das barragens foram projetadas e construídas sem base regulamentar. O primeiro regulamento de segurança em barragens foi publicado em 1990, a 6 de Janeiro, quando já tinham entrado em exploração 104 barragens em todo o território nacional. Este regulamento foi revogado, pelo novo RSB, publicado no Decreto-Lei nº 344/2007 de 15 de Outubro.

Para verificar se estas barragens cumpriam as normas regulamentares, a EDP realizou um estudo hidrológico dos aproveitamentos hidroelétricos já em exploração. Neste estudo, desenvolveram-se simulações hidrológicas para verificar o funcionamento dos órgãos de segurança, para eventos de precipitação reais e com os períodos de retorno fixados nas normas de projeto de barragens.

O sistema hidroelétrico do Cávado-Rabagão-Homem, localiza-se a norte de Portugal continental, Figura 41 a). As bacias hidrográficas que se desenvolvem ao longo do rio Cávado e dos seus afluentes, Homem e Rabagão, localizam-se numa das áreas mais montanhosas e com maior pluviosidade do País, Figura 41 b). As bacias hidrográficas desenvolvem-se nos municípios de de Terras de Bouro, Montalegre, Vieira do Minho e Barcelos.



a) Bacias hidrográficas;

b) Precipitação média anual (1951-1960);

Figura 41: Bacia Hidrográfica da Região Norte (Fonte: PROT-Norte).

O sistema é constituído por 6 escalões distribuídos por toda a bacia hidrográfica, Figura 42, nomeadamente os escalões Alto Rabagão; Paradela e Vila Nova; Venda Nova, Vila Nova e Frades; Salamonde; Caniçada; Vilarinho das Furnas e Penide. Estes escalões, encontram-se ligados por túneis de desvio de caudais entre si. A barragem mais a

montante do sistema é a barragem de Alto Cávado, a mais a jusante é a barragem de Caniçada.

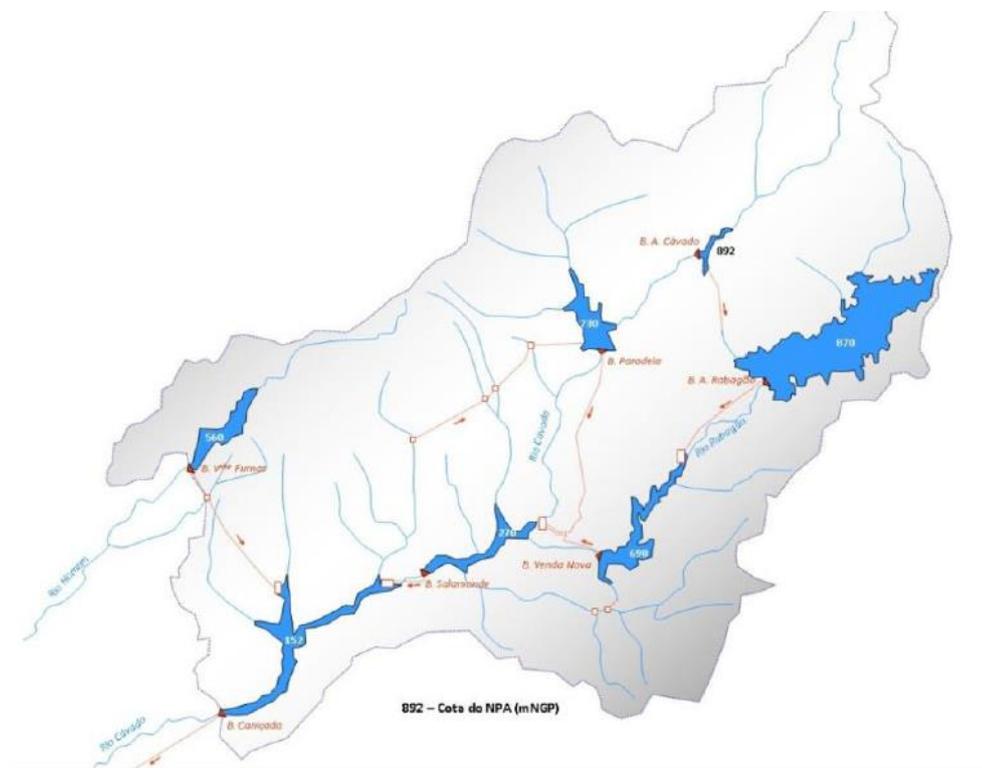


Figura 42: Esquema Geral do Sistema Cávado-Rabagão-Homem (Fonte: EDP).

### 3.1 Escalão Alto Rabagão

O escalão de Alto Rabagão, entrou em exploração em 1964, é constituído por duas barragens. A barragem de Alto Rabagão e Alto Cávado, com 94 e 29 metros de altura, respetivamente.

A barragem de Alto Cávado, também conhecida como barragem de Sezelhe, devido a sua localização, Figura 43, é de betão, do tipo gravidade, com o coroamento situado à cota dos 906.5 m e com 220 m de comprimento. Cria uma albufeira, com o NPA à cota 901.5 m, a que correspondente um volume armazenado de 3.5 hm<sup>3</sup>. O descarregador de cheias situa-se no corpo da barragem, não é controlado, tem uma capacidade de vazão de 410 m<sup>3</sup>/s e a energia é dissipada por ressalto na extremidade do canal do descarregador. A descarga de fundo, com a capacidade de vazão de 27 m<sup>3</sup>/s, é controlada por comporta a jusante.

A albufeira de Alto Cávado desvia os caudais afluentes através de um túnel para a albufeira do Alto Rabagão.

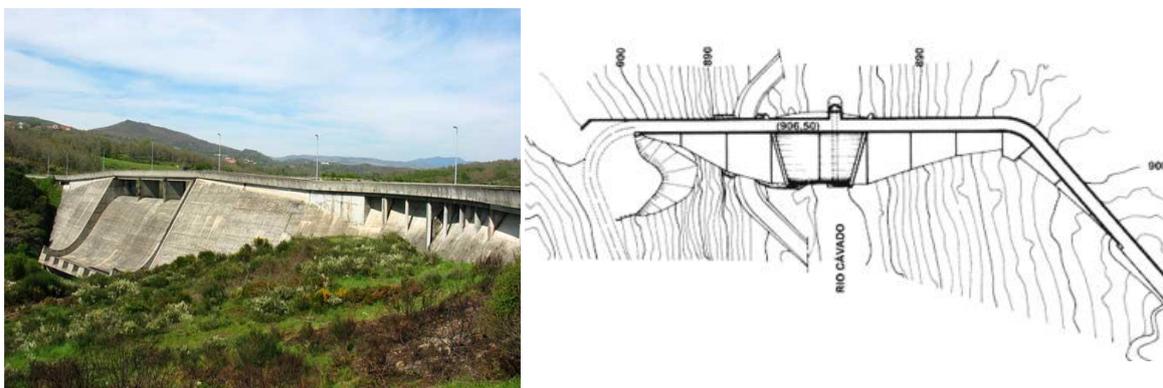


Figura 43: Barragem de Alto Cávado (Fonte: APA, 2016).

A barragem do Alto Rabagão, situada em Pisões, tem um coroamento com a extensão de 1897 m localizado à cota 880.15 m. O corpo da barragem não é uniforme. A zona central tem forma de abóboda dupla com curvatura assimétrica, com encontros artificiais em gravidade, como se mostra na planta da Figura 44. A albufeira criada pelo corpo da barragem, submerge uma área de 2200 ha e tem a capacidade de 569 hm<sup>3</sup>, sendo a cota de NPA de 880,00 m.

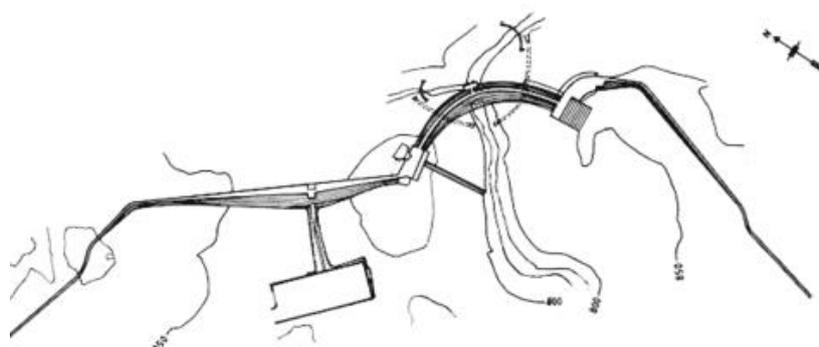


Figura 44: Esquema ilustrativo da Barragem do Alto Rabagão (Fonte: APA, 2016).

O descarregador de cheia, incorporado no corpo barragem, localiza-se na margem direita em canal aberto. A estrutura de entrada localiza-se no encontro artificial da abobada, constituída por dois orifícios, controlados com comportas e com a capacidade máxima total de vazão de 500 m<sup>3</sup>/s. Esta barragem dispõem de dois descarregadores de fundo, controlados a jusante por comporta e cada um com a capacidade de vazão de 180 m<sup>3</sup>/s.

A central subterrânea, junto à barragem, estabelece ligação, em turbinamento e bombagem, com a albufeira de Venda Nova, através de uma extensa galeria de restituição, com cerca de 6 km, onde se inclui uma chaminé de equilíbrio.

### 3.2 Escalão Venda Nova

Este escalão é constituído por uma barragens e duas centrais, Vila Nova e Frades. Este escalão foi recentemente sujeito a dois reforços de potência.

A barragem de Venda Nova é de betão do tipo abóbada espessa, Figura 45, com uma altura de 97 m e 230 m de extensão de coroamento, à cota 701 m. É criada uma albufeira com a capacidade de armazenamento de 95 hm<sup>3</sup> e que submerge uma área de 400 ha. O descarregador de cheia, incorporado na barragem, é do tipo frontal, controlado por comportas, constituído por dois canais, tem a capacidade de vazão de 1200 m<sup>3</sup>/s e termina em salto ski. A descarga de fundo tem a capacidade máxima de vazão de 130 m<sup>3</sup>/s.

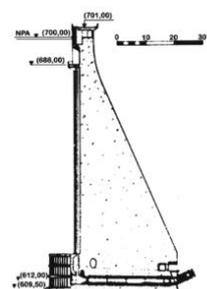
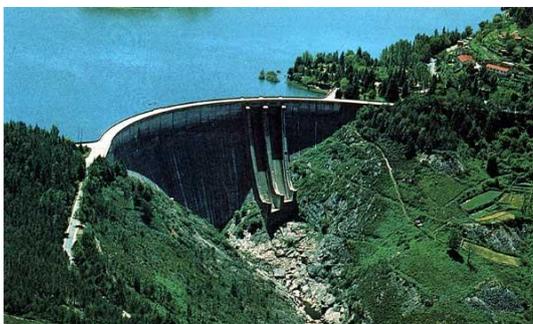


Figura 45: Barragem de Venda Nova (Fonte: APA, 2016).

A central de Vila Nova, Figura 46, está implementada a céu aberto, localiza-se na freguesia de Ferral, concelho de Montalegre. É constituída por um túnel e uma conduta forçada com 3,9 km de extensão.



Figura 46: Localização geográfica da central de Vila Nova (Fonte: GoogleMaps, 2016).

O circuito hidráulico, ilustrado na Figura 47, tem a particularidade de permitir a transferência de água da albufeira de Paradela para a de Venda Nova. Nesta central coexistem dois aproveitamentos hidroelétricos: um alimentado pela barragem de Venda Nova (Vila Nova/Venda Nova), e outro alimentado pela barragem de Paradela (Vila Nova/Paradela).

A central é constituída por um edifício onde se encontra a sala de máquinas (com os 3 grupos do aproveitamento de Vila Nova/Venda Nova e o grupo do aproveitamento de Vila Nova/Paradela), a sala de comando, localizada no piso superior, num dos topos do edifício, e uma subestação exterior, em plataforma sobre parte do edifício da central, onde estão instalados os transformadores principais dos grupos da central.

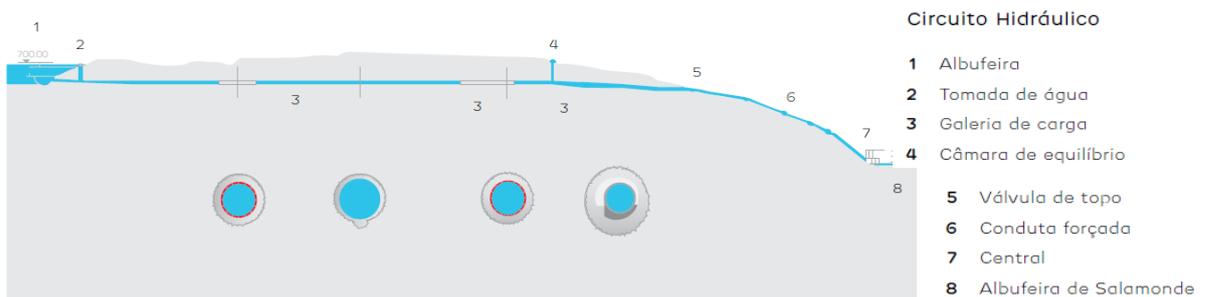


Figura 47: Esquema ilustrativo da Central de Vila Nova (Fonte: EDP, 2013).

A central de Frades, está subterrada a cerca de 350 metros de profundidade, na freguesia de Ruivães, no concelho de Vieira do Minho. O circuito hidráulico dos grupos geradores, tem uma extensão de 2.8 km a montante da central, tem um túnel em carga e a 1.4 km a jusante um túnel de restituição, como ilustrado na Figura 48. Ambos os túneis apresentam uma seção circular com diâmetro de 6.30 m.

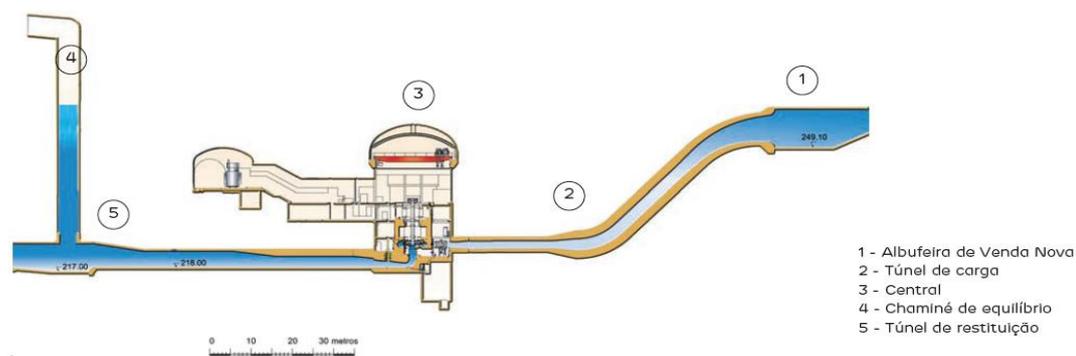


Figura 48: Esquema ilustrativo central de Frades (Fonte: EDP, 2016).

### 3.3 Escalão de Paradela

A barragem de Paradela, situada no rio Cávado, é do tipo enrocamento, tem uma altura de 112 m acima das fundações e um volume total de aterros de 2 700 000 m<sup>3</sup>. O coroamento do corpo de barragem tem uma extensão de 540 m, aproximadamente, a sua cota é de 733.30 m. A cota do NPA de 730.39 m e cria uma albufeira com a capacidade total 164.5hm<sup>3</sup>, que submerge uma área de 380 ha.

Inicialmente, no projeto, a barragem de Paradela, dispunha de dois descarregadores de cheia, Figura 49. O primeiro, em poço sem comportas e com uma estrutura de entrada em tulipa, à cota 730.39 m, com capacidade máxima de vazão de 313 m<sup>3</sup>/s. O segundo, de tipo frontal, equipado com uma comporta automática e com uma capacidade máxima de vazão de 380 m<sup>3</sup>/s. Este segundo descarregador, localizado na margem esquerda da albufeira, descarregava na Ribeira de Cela, próximo a uma povoação. Quando entrava em funcionamento provocava fortes erosões ao longo do curso da ribeira, e para colmatar este efeito agressivo, procedeu-se à sua desativação.

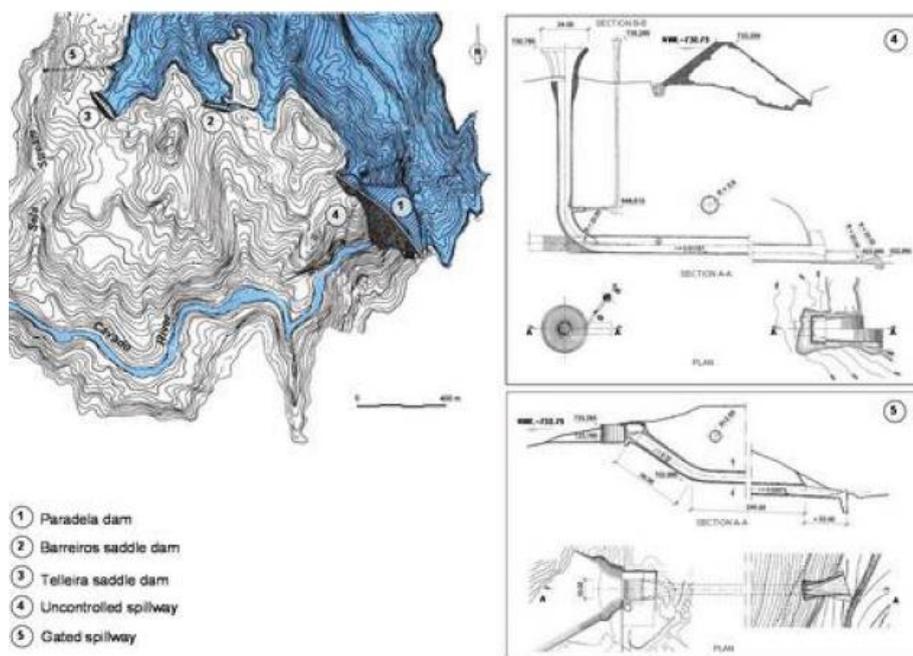


Figura 49: Descarregadores de cheia primários (Fonte: EDP, 2016).

Com os estudos de revisão de cheia, verificou-se que os descarregadores não tinham a capacidade necessária para cheias com período de retorno, de 1000 e 5000 anos. Sendo que para o período de retorno de 5000 anos, a cota se elevava para 733.45 m, o que ultrapassava em 0.16 m, a altura do coroamento da barragem de Paradela.

A solução encontrada foi a construção de um novo descarregador de cheia complementar. Este novo descarregador, Figura 50, em canal aberto, implementado na margem direita, com 400 m de comprimento, é composto por uma estrutura de entrada, controlado por comportas, e termina em salto ski, para dissipação de energia. A sua capacidade máxima de vazão é de  $650 \text{ m}^3/\text{s}$ . Ao longo do canal as velocidades variam entre 25 m/s e 35 m/s, o que provoca erosão e cavitação. Para reduzir estas velocidades, introduziram-se uns arejadores, nos primeiros 200 m do canal.

A descarga de fundo foi prevista para um caudal máximo de  $65 \text{ m}^3/\text{s}$ . O circuito hidráulico estende-se ao longo de 11 km, até a central de Vila Nova.

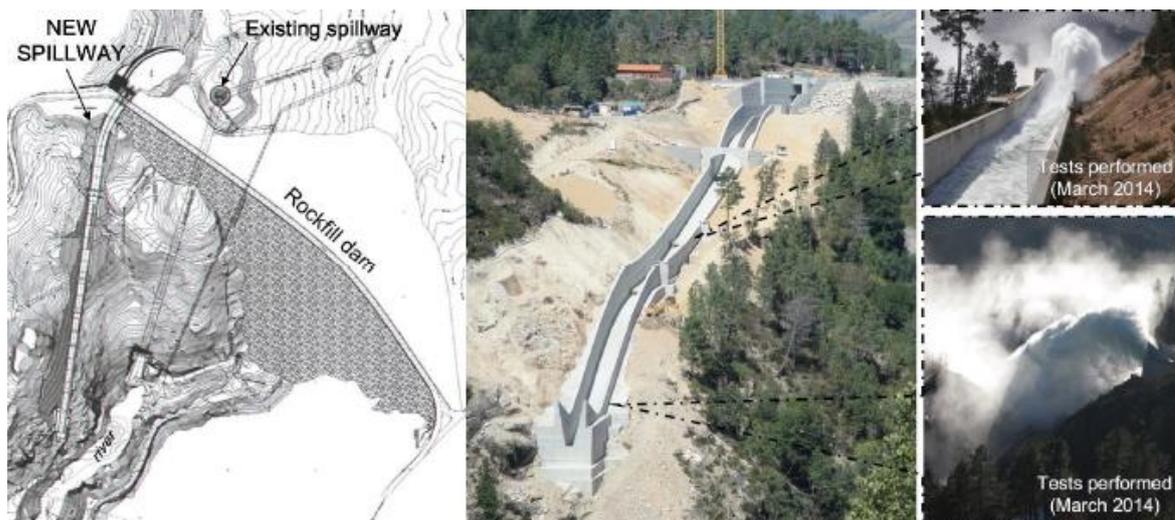


Figura 50: Descarregador de cheias complementar – Barragem de Paradela (Fonte: EDP, 2016).

### 3.4 Escalão de Salamonde

O aproveitamento de Salamonde, Figura 51, situado no rio Cávado, é de betão, do tipo abóbada delgada, com 75 m de altura e 203 m de desenvolvimento de coroamento. O coroamento situa-se à cota 281.0 m, um metro abaixo situa-se o NPA que cria uma albufeira com capacidade total de 63 hm<sup>3</sup> e que submerge 236 ha.



Figura 51: Barragem de Salamonde (Fonte: EDP, 2016).

Inicialmente, a barragem dispunha de um descarregador de cheias do tipo frontal, inserido no corpo da barragem, em lâmina livre, constituído por quatro orifícios

controlados por comportas, com a capacidade de vazão, igual a 1700 m<sup>3</sup>/s. Os jatos de água, dissipavam a energia no impacto com o colchão de água criado por um açude com 17,5 m de altura. No seguimento do estudo de cheias desenvolvido, concluiu-se também para a barragem de Salomonde que os descarregadores existentes não seriam capazes de efetuar a descarga de cheias, para períodos de retorno de 1000 e 5000 anos. A solução encontrada, foi a construção de um descarregador de cheias complementar em túnel na margem direita, controlado por comportas à entrada e um túnel com comprimento de 100 m e com a estrutura de saída em salto ski para dissipação de energia, com a capacidade máxima de vazão de 1233 m<sup>3</sup>/s. Incluída no corpo de barragem, encontra-se a descarga de fundo que tem a capacidade máxima de vazão de 140 m<sup>3</sup>/s.

O circuito hidráulico do aproveitamento de Salomonde foi sujeito a reforço de potência. Este está totalmente implementado na margem esquerda do rio Cávado, freguesia de Salomonde. Na Figura 52, apresenta-se a planta e o perfil longitudinal do circuito hidráulico do qual fazem parte: a tomada de água, o trecho de adução, a central subterrânea, o trecho de restituição, a chaminé de equilíbrio, o túnel de restituição e o canal de restituição, que restitui o caudal a montante da albufeira de Caniçada.

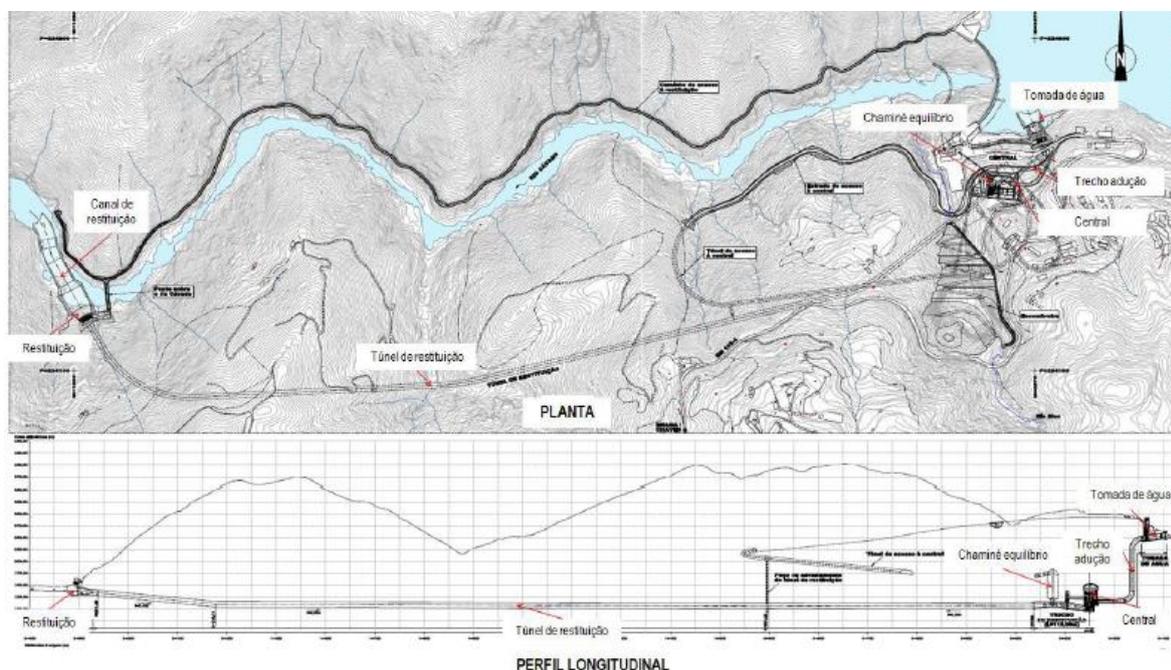


Figura 52: Planta e perfil longitudinal do circuito hidráulico de Salomonde (Fonte: EDP, 2016).

### 3.5 Escalão de Vilarinho das Furnas

A barragem de Vilarinho das Furnas, Figura 53, está localizada no rio Homem, principal afluente do rio Cávado. O corpo de barragem tem 94 m de altura, e à cota 570.00 m localiza-se o coroamento com a extensão de 384,5 m, em betão, do tipo abóbada assimétrica de dupla curvatura com arcos horizontais parabólicos. É criada uma albufeira com a capacidade de 118 hm<sup>3</sup> à cota de 569.50 m e que submerge uma área de 346 ha.

O descarregador de cheia é independente do corpo da barragem, e localiza-se na margem direita do rio Homem, em galeria, controlado por comportas, tem a capacidade máxima de vazão de 280 m<sup>3</sup>/s. A barragem é equipada com uma descarga de fundo, que admite a capacidade máxima de vazão de 180 m<sup>3</sup>/s e está dotada de um dispositivo para libertação de caudal ecológico.



Figura 53: Barragem de Vilarinho das Furnas (Fonte: EDP, 2016).

O circuito hidráulico, é constituído por um túnel com 7,6 km de extensão, que faz a restituição da água turbinada à barragem de Caniçada, pela Central do Gerês, edifício de comando, de descarga e de subestação, Figura 54.

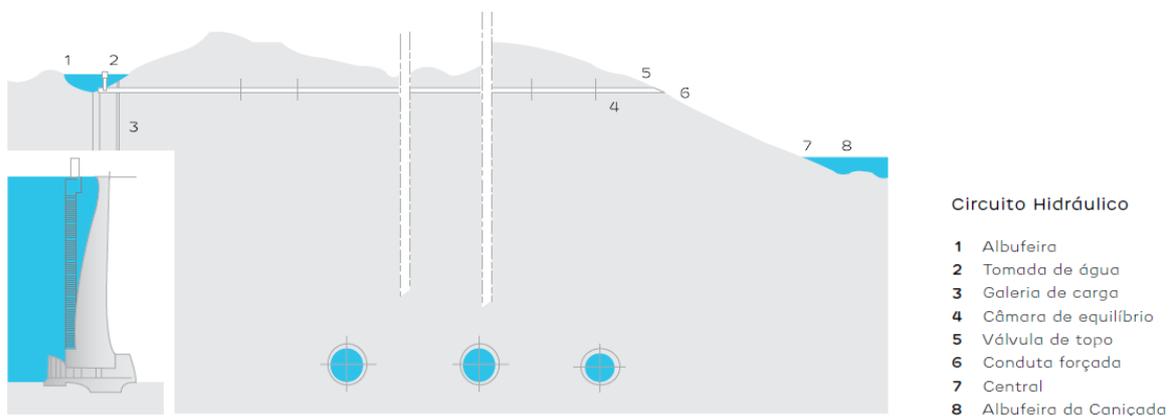
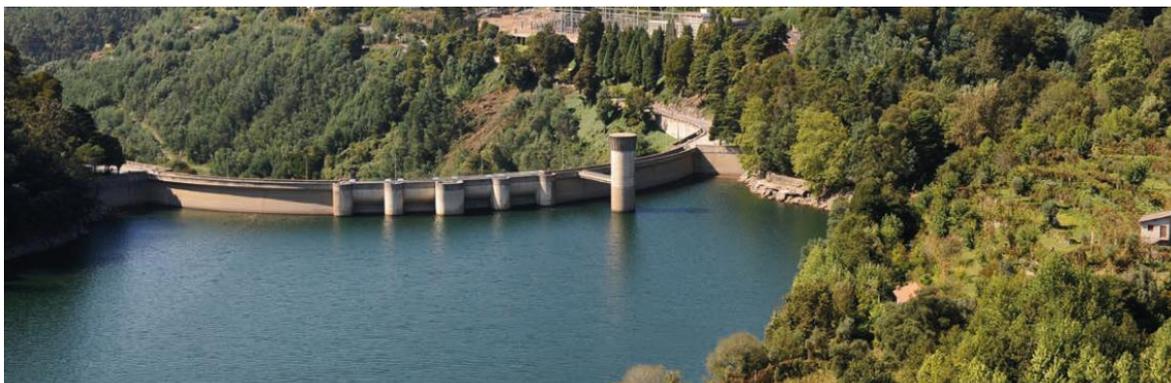


Figura 54: Circuito hidráulico Vilarinho das Furnas (Fonte: EDP, 2013).

### 3.6 Escalão de Caniçada

A barragem de Caniçada, Figura 55, a mais a jusante do sistema, foi construída em dois anos e meio e foram necessário 90 000m<sup>3</sup> de betão para a sua construção. O coroamento do corpo da barragem, com o comprimento de 196 m, faz a ligação entre os concelhos de Terras de Bouro e Vieira do Minho. A barragem é em betão, tem 76 m de altura desde a fundação de granito e é do tipo abóbada de dupla curvatura, com raio de 105 m. Tem uma queda bruta máxima de 121 m e mínima de 76 m.

A albufeira criada à cota de NPA de 162,00 m, um metro abaixo da cota do coroamento da barragem, possui uma capacidade de 153 hm<sup>3</sup> e inunda uma área de 522 ha. Tem um volume para amortecimento de cheias de 3 hm<sup>3</sup>, sendo o volume disponível entre o NPA e o topo de guarda de aproximadamente 14.40 hm<sup>3</sup>.



*Figura 55: Barragem de Caniçada (Fonte: EDP, 2013).*

As obras anexas à barragem de Caniçada são, os descarregadores de cheias, o açude de proteção a jusante da barragem e a descarga de fundo.

O descarregador de cheias, Figura 56, incorporado na barragem, é constituído por quatro orifícios, geometricamente iguais, controlados por comportas. Cada orifício tem 9 m de altura por 4,25 de largura, e a soleira está localizada à cota 153,80 m. Tem a capacidade máxima de vazão de 1700 m<sup>3</sup>/s e a restituição ao leito do rio do caudal descarregado é efetuado por jato livre. A dissipação de energia ocorre por amortecimento no colchão de água criado por um açude a jusante do corpo da barragem e por impacto no leito do rio que se encontra revestido por betão.



*Figura 56: Descarregadores de cheia.*

O açude, Figura 57, é do tipo barragem com arco de curvatura simples, com raio de 36 m e com altura de 15 m tendo a fundação à cota 87,00 m. Este tipo de estruturas são implementadas para que se crie um colchão de água para amortecimento da energia da água descarregada, de forma a reduzir as erosões do solo. É dotado de duas comportas planas de manobra manual para esvaziamento do colchão de amortecimento.



*Figura 57: Açude.*

A descarga de fundo, Figura 58, tem a capacidade máxima de vazão de 140 m<sup>3</sup>/s, (Figura 58), localiza-se à cota 94,00 m e é constituída por uma conduta metálica circular com um diâmetro de 2,60 m manobrada por uma válvula dispensor a jusante e com uma comporta de segurança a montante.



Figura 58: Descarga de Fundo.

O circuito hidráulico, Figura 59, é constituído por uma galeria em carga e uma galeria de fuga, através da qual se restitui o caudal. A chaminé de equilíbrio insere-se na galeria de fuga.

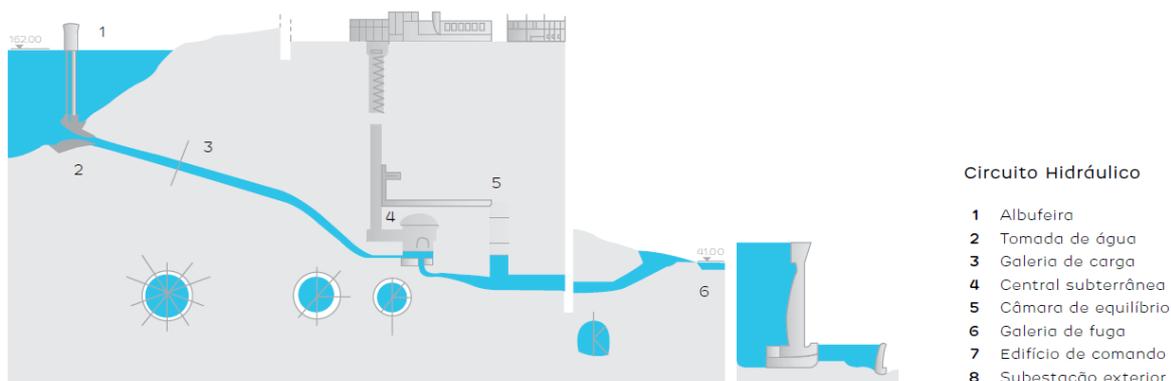


Figura 59: Circuito hidráulico (Fonte: EDP, 2016).

A tomada de água, está implementada na margem direita da albufeira, é constituída por um bocal protegido à entrada por uma grade grossa fixa de betão armado, à qual se segue uma grade fina metálica amovível. Ao bocal da tomada de água segue-se a galeria de carga, que tem 190 m de extensão.

A galeria de fuga, tem 7,5 km de extensão, está simplesmente escavada na rocha. Uma vez que se está a construir o descarregador de cheia complementar, efetuaram-se verificações à galeria de fuga e quando a rocha se apresenta muito fendilhada, opta-se por revestimento a betão simples, de forma a garantir a estabilidade da galeria. Esta galeria, assim como a chaminé de equilíbrio, localizam-se a jusante da central.

A central é subterrânea, em caverna, localizada na margem direita da barragem. A central tem 40 m de comprimento, 18 m de largura e 30 m de altura máxima. O acesso à central é feito por poço vertical.

A albufeira da Caniçada, foi sujeita também a um estudo hidrológico. Na simulação efetuada verificou-se que para um período de retorno de 1000 anos a água eleva-se 3 metros acima do coroamento da barragem de Caniçada.

A solução implementada, foi semelhante à da barragem de Salamonde, a construção de um descarregador de cheias complementar, neste caso na margem esquerda do corpo da barragem.

Este descarregador de cheias complementar consiste numa estrutura de entrada equipada com duas comportas, num túnel com o desenvolvimento de aproximadamente 200 metros, dividido em dois canais por um septo, finalizado com uma estrutura em salto ski, na saída (Figura 60). Este novo descarregador tem uma capacidade de descarga de 2062 m<sup>3</sup>/s.

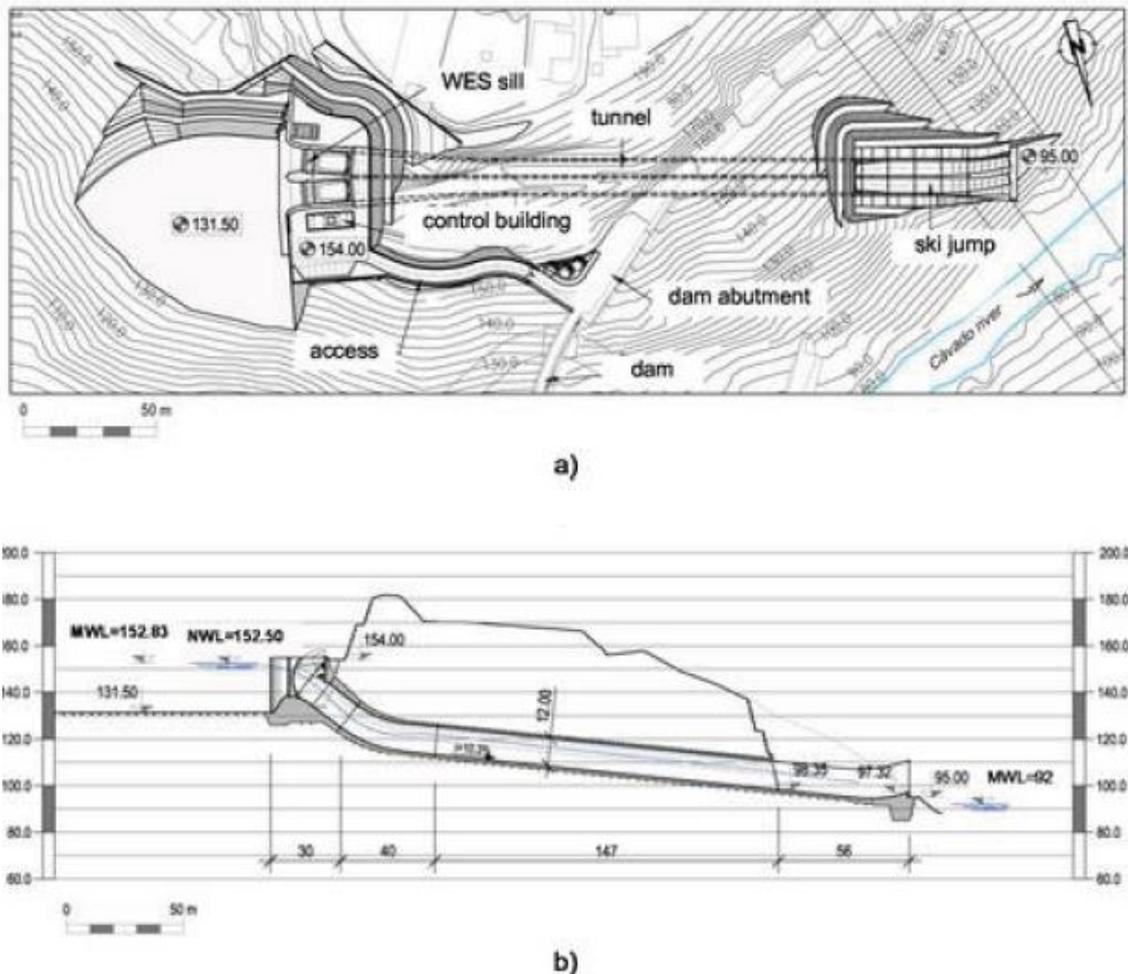


Figura 60: Descarregador de Cheia complementar – (a): vista em planta; (b): vista em corte (Fonte: EDP, 2016)

## 4 Métodos para determinação dos caudais de ponta de cheia

As cheias são fenómenos naturais e aleatórios. Estão associadas a grandes eventos de precipitação que podem causar grandes inundações das margens, danos físicos e prejuízos materiais. De forma a controlar as cheias, é necessário aprofundar os conhecimentos sobre o seu processo de ocorrência e a forma de as controlar, (Silva, J., 2013).

Para o estudo das cheias é necessário quantificar os processos hidrológicos, de forma a simular situações de cheia que podem ocorrer. Para determinar um caudal de ponta de cheia recorre-se à precipitação, geralmente, utilizando-se os valores máximos de intensidade registados, que posteriormente são transformados em caudais máximos instantâneos, (Silva, J., 2013).

O cálculo de caudais de ponta de cheia, depende do período de retorno selecionado e deve ser escolhido, preconizado na legislação, nomeadamente nas Normas de Projeto de Barragens, de acordo com a probabilidade de ocorrência dos caudais e conseqüentemente da sua magnitude.

Para a determinação dos caudais de ponta de cheia foram desenvolvidos métodos teóricos recorrendo a fórmulas cinemáticas, estatísticas e empíricas.

As fórmulas cinemáticas, têm em conta as características do movimento da água na bacia hidrográfica. São expressas através do tempo de concentração,  $t_c$ , e da chuvada crítica. Considera-se uma chuvada crítica, aquela que origina o maior caudal de ponta para um dado período de retorno, (Ribeiro, A., 1987).

A análise estatística é realizada em função dos dados disponíveis e pode realizar-se tendo como base a análise estatística dos valores referentes à secção em estudo, a extensão de uma amostra de valores e a regionalização de valores. Nos cursos de água onde é possível registar os valores referentes a uma dada secção estes valores são utilizados para projetar futuras cheias recorrendo-se à análise estatística dos valores referentes à secção em estudo. Quando se dispõem de uma série de precipitações máximas da bacia, através de um modelo de regressão pode determinar-se a lei que permite, prolongar a amostra dos valores de precipitação associada à bacia hidrográfica em estudo. No caso de uma dada bacia que não dispõe de medições ou rigor nas medições, pode recorrer-se à correlação

de valores obtidos para bacias com características semelhantes ao caso de estudo, efetuando-se uma regionalização dos valores, (Lencastre, A e Franco, F.M., 2003).

As fórmulas empíricas são deduzidas com base na experiência, em que geralmente se entra em conta apenas a área da bacia hidrográfica, (Lencastre, A e Franco, F.M., 2003).

#### 4.1 Determinação do tempo de concentração, $t_c$

O tempo de concentração define-se como sendo o tempo que uma gota, que cai no ponto cineticamente mais a montante da bacia, demora a atingir a seção considerada. Lencastre e Franco, (1992), admitem que o tempo de concentração é constante em toda a bacia hidrográfica e que este não varia em função dos eventos de precipitação ocorridos.

Existem vários métodos para determinação do  $t_c$ , com parâmetros variáveis. Nem todos os métodos consideram os mesmos parâmetros para determinação do tempo de concentração no entanto, os mais comuns são a área da bacia hidrográfica (A), o comprimento da linha de água principal (L), o declive médio da linha de água principal (i), a permeabilização da bacia, o tipo de cobertura e a altura média da bacia (hm).

Para a determinação do tempo de concentração pode recorrer-se às fórmulas de Temez, Kirpich e Giandotti.

Na fórmula de Temez (1) e na fórmula de Kirpich (2), intervêm os mesmos parâmetros, ou seja, relaciona-se o tempo de concentração com o comprimento da bacia e com a sua inclinação, através das expressões:

$$\text{Fórmula de Temez:} \quad t_c = 0.3 \times \left( \frac{L}{i^{0.25}} \right)^{0.76} \quad (1)$$

$$\text{Fórmula de Kirpich:} \quad t_c = 0.0663 \times \left( \frac{L^{0.77}}{i^{0.3883}} \right) \quad (2)$$

Por sua vez, a fórmula de Giandotti (3), relaciona o tempo de concentração com a área da bacia (A), com o seu comprimento (L) e com a altura média da bacia.

Fórmula de Giandotti: 
$$t_c = \frac{4 \times \sqrt{A} + 1.5 \times L}{0.8 \times \sqrt{h_m}} \quad (3)$$

## 4.2 Métodos para a determinação do caudal de ponta de cheia

### 4.2.1 Métodos cinemáticos: Método de Snyder

Os métodos cinemáticos referem-se a uma secção do curso de água. O escoamento e a precipitação são representados através de gráficos cartesianos em que o caudal é dado em função do tempo. A estes gráficos atribui-se a designação de hidrograma de cheia ou diagrama de onda de cheia, (Ribeiro, A., 1987).

O método de Snyder foi desenvolvido para rios desprovidos de estações hidrométricas e é um dos métodos utilizados para obter o hidrograma unitário sintético. Tem como finalidade determinar o hidrograma de escoamento superficial tendo como base as características físicas da bacia hidrográfica, nomeadamente:

- Área da bacia hidrográfica uma vez que o volume escoado é diretamente proporcional à área, A;
- Inclinação da bacia pois a velocidade de escoamento depende da inclinação da bacia, i;
- Dimensão e a rugosidade do canal, porque a onda de cheia está relacionada com a largura dos rios; e com a perda de carga em função da rugosidade;
- Forma da bacia que é fundamental para a determinação da inundação. Se a barragem for em leque vai causar hidrogramas mais acentuados, do que numa bacia de forma alongada.

Para a aplicação deste método, a bacia em estudo tem de garantir uma área compreendida entre 30 km<sup>2</sup> e 30 000 km<sup>2</sup> (Castilho, L.).

O método de Snyder, define o caudal de ponta através das expressões:

$$Q_p = \frac{2.75 \times c_p \times A}{t_p} \quad (4)$$

$$t_l = 0,75 \times c_t \times (L \times L_a)^{0.3} \quad (5)$$

$$t_d = \frac{t_l}{5.5} \quad (6)$$

$$t_{la} = t_l + 0.25 \times (t_c - t_d) \quad (7)$$

$$t_p = t_{la} + 0.5 \times t_d \quad (8)$$

Em que:

A – área da bacia, (km<sup>2</sup>);

c<sub>p</sub> – coeficiente, variável entre 0.56 e 0.69;

t<sub>l</sub> – *time lag*, (h);

t<sub>d</sub> – tempo de duração padrão de escoamento superficial, (h);

t<sub>c</sub> – tempo de concentração, (h);

t<sub>p</sub> – tempo de atraso da bacia ou tempo de pico (h);

t<sub>la</sub> – tempo ajustado,(h);

c<sub>t</sub> – coeficiente variável entre 1.8 e 2.2;

L – comprimento da bacia, (km);

L<sub>a</sub> – distância ao centro de gravidade da bacia, km.

#### 4.2.2 Métodos estatísticos: Gumbel-Chow e Foster Hazen

Os métodos estatísticos utilizados para a determinação do caudal de ponta de cheia, descrevem-se seguidamente:

##### 4.2.2.1 *Método de Gumbel- Chow*

O método de Gumbel-Chow, foi apresentado por Ven Te Chow, com base nos dados estatísticos obtidos por Gumbel, (Ribeiro, A.,1987).

Para determinar o caudal que poderá ser igualado ou excedido num determinado período de tempo (tempo de retorno) através do método de Gumbel-Chow, recorre-se ao seguinte procedimento:

- 1) Introduzir os caudais, por ordem decrescente;
- 2) Determinação do intervalo de ocorrência,  $T_M$ :

$$T_M = \frac{1}{1 - e^{-e^{-\frac{-a+\bar{y}}{c}}}} \quad (9)$$

$$a = \gamma \times c - \bar{y} \quad (10)$$

$$c = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \times \sigma \quad (11)$$

Em que:

$\gamma - 0.577$  (constante Euler)

$\sigma$  – desvio padrão

$\bar{y}$  – média dos caudais

- 3) Determinar a constante de correlação,  $k$  :

$$k = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \times \{\gamma + \log_e [\log_e T_M - \log_e (T_M - 1)]\} \quad (12)$$

Conhecidos os valores de  $y$  e os valores correspondentes de  $k$ , pode definir-se graficamente uma reta que permite a extrapolação de dados, pela equação:

$$y = \sigma \times K + \bar{y} \quad (13)$$

O resultado da equação (13), aproxima-se de uma reta, mas o traçado mais correto é definido pelo método dos mínimos quadrados, através da extrapolação da equação (14):

$$y = A \times K + B \quad (14)$$

Em que:

$$A = \frac{\bar{K} \times \bar{y} - \overline{K \times y}}{\bar{K}^2 - \overline{K^2}} \quad (15)$$

$$B = \frac{\bar{K} \times \overline{K \times y} - \overline{K^2} \times \bar{y}}{\bar{K}^2 - \overline{K^2}} \quad (16)$$

$$\bar{K} = \frac{\sum_i^n k_i}{n} \quad (17)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_i^n y_i}{n} \quad (18)$$

$$\overline{K \times y} = \frac{\sum_i^n k_i \times y_i}{n} \quad (19)$$

$$\overline{K^2} = \frac{\sum_i^n K_i^2}{n} \quad (20)$$

Para facilitar os cálculos procedeu-se à construção de uma tabela, Tabela 5.

Tabela 5: Método de Gumbel-Chow (Fonte: Ribeiro, A., 1987)

Método Gumbel-Chow					
Nº de Ordem	Caudal instantâneo máximo anual $y=Q$	$T_M$	k	$k^2$	$k \times y$

#### 4.2.2.2 Método de Foster-Hazen

O método de Foster-Hazen, consiste na utilização dos eventos de precipitação máximos, para obter caudais de cheia que podem ser igualados ou excedidos no período de retorno, T.

Na aplicação deste método, segue-se a seguinte metodologia:

- 1) Determinar o caudal médio,  $Q_m$ :

$$Q_m = \frac{\sum Q}{n} \quad (21)$$

- 2) Calcular a relação entre o caudal de cheia, Q, e o caudal médio de cheia  $Q_m$ ;

$$\frac{Q}{Q_m} = \frac{\text{caudal de cheia}}{\text{caudal médio de cheia}} \quad (22)$$

- 3) Calcular a percentagem de tempo, t;

$$t (\%) = \frac{100 \times (m - 0.5)}{n} \quad (23)$$

Em que:

m – valor da ordem de cheia

n – número total de valores observados

4) Determinar os desvios,  $v$ ;

$$v = \frac{Q}{Q_m} - 1 \quad (24)$$

5) Determinar o coeficiente de dispersão,  $C_d$ ;

$$C_d = \sqrt{\frac{\sum v^2}{n-1}} \quad (25)$$

6) Determinar o coeficiente de assimetria,  $C_a$ ;

$$C_a = \frac{\sum v^3}{(n-1) \times (C_d)^3} \quad (26)$$

7) Efetuar a correção do coeficiente de correção,  $C_{a,a}$ ;

$$C_{a,a} = C_a \times \left(1 + \frac{8.5}{n}\right) \quad (27)$$

8) Com o auxílio da tabela de Foster-Hazen (Ribeiro, A., 1987), tabela com os valores de referência em função do  $C_{a,a}$  corrigido e a percentagem de tempo, efetuam-se interpolações com o valor de  $C_{a,a}$  obtido pela correção efetuada anteriormente.

9) Os dados obtidos das interpolações são necessários para preencher a Tabela 7, em que se obtém o caudal de ponta,  $Q$ , associado a um período de retorno,  $T$ , através das expressões:

$$\text{Para um período de retorno, } T \text{ (\%): } \frac{1}{T} \times 100 \quad (28)$$

$$\text{O caudal de ponta é dado por: } Q = (V + 1) \times Q_m \quad (29)$$

Para a aplicação deste método, é necessário recorrer à construção de duas tabelas, com estrutura semelhante às apresentadas nas Tabela 6 e 7. Na Tabela 6, os caudais de cheia têm de estar organizados por ordem de decrescente.

Tabela 6: Método de Foster-Hazen.

Método de Foster – Hazen						
Nº de Cheia	Valor da cheia, Q	$\frac{Q}{Q_m}$	% de tempo	Desvios, $v$	$v^2$	$v^3$

Tabela 7: Método de Foster-Hazen. Determinação do caudal de ponta.

Método de Foster - Hazen					
% tempo	Ca,a (ref)	Ca,a (ref)	Ca,a	desvio corrigido $V = Ca,a \times Cd$	$\frac{Q}{Q_m} = V + 1$

#### 4.2.3 Método Semi-empírico: Método de Giandotti

O método semi-empírico de Giandotti<sup>(30)</sup> é o método mais utilizado em Portugal, assim como em Itália (Ferreira, A.,2010), para determinação do caudal de ponta de cheia. Este método está presente no regulamento de pequenas barragens no Anexo IV, do mesmo documento. Para Giandotti o caudal de ponta de cheia, obtém-se através da seguinte equação:

$$Q_p = \frac{\lambda \times A \times h}{T_c} \quad (30)$$

Em que:

$Q_p$  – caudal de ponta em  $m^3/s$ ;

$A$  – área da bacia hidrográfica em  $km^2$ ;

$\lambda$  – Parâmetro em função da Tabela 8;

$h$  – precipitação máxima, em mm, correspondente a um tempo de concentração e a um período de retorno, estatístico;

$T_c$  – tempo de concentração da bacia em horas.

Tabela 8: Parâmetros  $\lambda$  da fórmula de Giandotti para o caudal máximo de cheia

Área da bacia, km <sup>2</sup>	$\lambda$
<300	0.346
300-500	0.277
500-1000	0.197
1000-8000	0.100
8000-20000	0.076
20000-70000	0.055

A precipitação máxima,  $h$ , é obtido através da equação,  $I = a \times t_c^b$ , em que  $a$  e  $b$ , são parâmetros apresentados no Anexo IX, do Decreto Regulamentar n.º23/95 de 23 de Agosto, associados a diferentes períodos de retorno e a diferentes regiões pluviométricas.

## 5 Estudo hidrológico do sistema

### 5.1 Dados de Base

Uma bacia hidrográfica de um curso de água é definida como sendo a área, que contribui com precipitação/escoamento para alimentar o curso de água. A delimitação da bacia é feita, numa carta topográfica e segue as linhas de crista de elevação. Isto é, delimita-se a bacia hidrográfica pela linha de cumeeada que tem as cotas mais altas da bacia. Essa linha divide o escoamento provocado pela precipitação, em duas bacias distintas seguindo o escoamento superficial, as linhas de maior declive do terreno, (Ribeiro, A., 1987). Para o curso de água é encaminhado o escoamento superficial, assim como o escoamento subterrâneo. Por outro lado, o escoamento superficial pode infiltrar-se no solo e concentrar-se em lagos ou toalhas subterrâneas que não contribuem para o caudal do curso de água.

A bacia hidrográfica do Cávado, tem como principal curso de água o Rio Cávado, que nasce na Serra do Larouco, a uma altitude de 1500 m. A bacia hidrográfica apresenta uma configuração retangular, com uma largura média de 16 km e, aproximadamente, 97 km de comprimento, Figura 61. A sua área total é de 1699 km<sup>2</sup>.

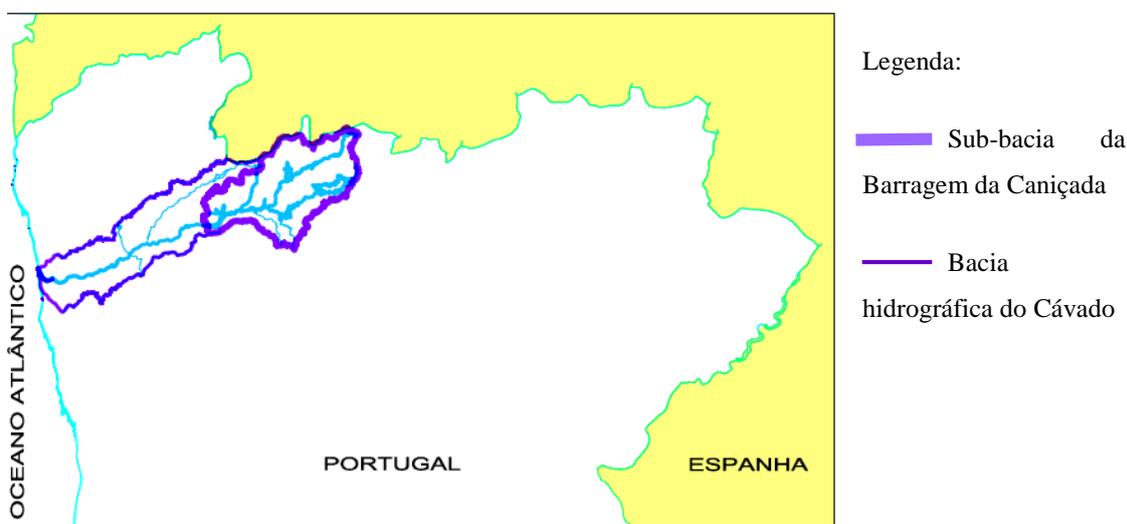


Figura 61: Bacia do Cávado (Fonte: EDP, 2016.)

A bacia do Cávado, referente à seção da sub-bacia da barragem de Caniçada, Figura 62, tem uma área de 774 km<sup>2</sup> e é uma das regiões do país com pluviosidade mais elevada, a média anual é de aproximadamente 2400 mm.



Para o estudo hidrológico da sub-bacia do Alto Cávado, recolheu-se informação relativa aos caudais instantâneos máximos anuais. Presume-se que chuvadas com determinado tempo de retorno dão origem a cheias de igual período de retorno. Por vezes isto pode não ser correto, porque a cheia é condicionada por múltiplos fatores dos quais se destaca a humidade inicial do solo e a variação da intensidade de precipitação. Contudo, muitos autores consideram essa hipótese pode ser considerada, (Silva, J., 2013). Para o estudo desenvolvido posteriormente, consideraram-se períodos de retorno de 10,100,1000 e 5000 anos.

## 5.2 Determinação do Tempo de Concentração e dos Caudais de Ponta de Cheia para a bacia do Alto Cávado

### 5.2.1 Determinação do Tempo de Concentração

Da aplicação das fórmulas à bacia do Alto Cávado, Anexo I, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 9 e considera-se a partir daqui que o tempo de concentração da bacia é igual à média do tempo de concentração obtido pelos três métodos. Os valores obtidos pelos três métodos são bastante diferentes pelo que atendendo à incerteza associada a cada um destes valores se optou pela utilização da média.

*Tabela 9: Tempo de concentração da bacia.*

Cálculo do tempo de concentração – Alto Cávado		
Temez	8	horas
Kirpich	4	horas
Giandotti	3	horas
Média	5	horas

Com base nos resultados considera-se que o tempo de concentração da bacia, seja de 5 horas.

### 5.2.2 Determinação dos caudais de ponta de cheia

Os resultados obtidos por aplicação dos métodos descritos anteriormente, para cálculo dos caudais de ponta de cheia são apresentados na Tabela 10. Os registos dos caudais máximos instantâneos anuais entre 1973 e 2004, Anexos II, estão disponíveis no Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH).

*Tabela 10: Comparação dos resultados obtidos pelos métodos.*

Método	Caudal de Ponta de Cheia			
	10	100	1000	5000
Foster-Hazen	116 m <sup>3</sup> /s	230 m <sup>3</sup> /s	418 m <sup>3</sup> /s	
Gumbel- Chow	106 m <sup>3</sup> /s	179 m <sup>3</sup> /s	251 m <sup>3</sup> /s	301 m <sup>3</sup> /s
Giandotti	72 m <sup>3</sup> /s	311 m <sup>3</sup> /s		

O caudal de ponta de cheia, para um período de retorno de 10 anos, calculado através de diferentes métodos, apresenta valores similares. O maior valor estimado é de 116 m<sup>3</sup>/s, obtido através do método de Foster-Hazen, Anexo III. O valor mais baixo é atribuído pelo método de Giandotti, Anexo IV e apresenta um caudal de ponta de cheia de 72 m<sup>3</sup>/s.

Para um período de retorno de 100 anos, o caudal de ponta de cheia mais elevado é de 311 m<sup>3</sup>/s, estimado pelo método de Giandotti. Os métodos de Gumbel- Chow, Anexo V, e de Foster-Hazen, são os métodos que apresentam resultados mais próximos, com caudais de ponta de cheia de 179 m<sup>3</sup>/s e 230 m<sup>3</sup>/s, respetivamente.

Para um período de retorno de 1000 anos apenas é possível efetuar comparações entre os métodos estatísticos pois são os únicos que permitem a estimativa do caudal de ponta de cheia para este período de retorno. Entre estes dois métodos, o caudal de ponta de cheia, estima valores muito diferentes entre si, quase o dobro, sendo que o método de Foster-Hazen, continua a apresentar o valor mais elevado, 418 m<sup>3</sup>/s.

Para um período de retorno de 5000 anos apenas é possível estimar o caudal de ponta de cheia através do método de Gumbel-Chow, que é de 301 m<sup>3</sup>/s.

Para os períodos de retorno selecionados, 10, 100, 1000 e 5000 anos, não é possível aplicar todos os métodos. Apenas o método de Gumbel-Fisher-Chow, permite a estimativa do caudal de ponta de cheia para todos os períodos de retorno pretendidos.

O único método, utilizado no estudo, que não relaciona o período de retorno com o caudal de ponta de cheia é o método de Snyder. Este método determina um hidrograma de ponta de cheia, o caudal de ponta de cheia, obtido foi de aproximadamente  $30 \text{ m}^3/\text{s}$ , para um tempo de crescimento de 7 horas, Gráfico 3.

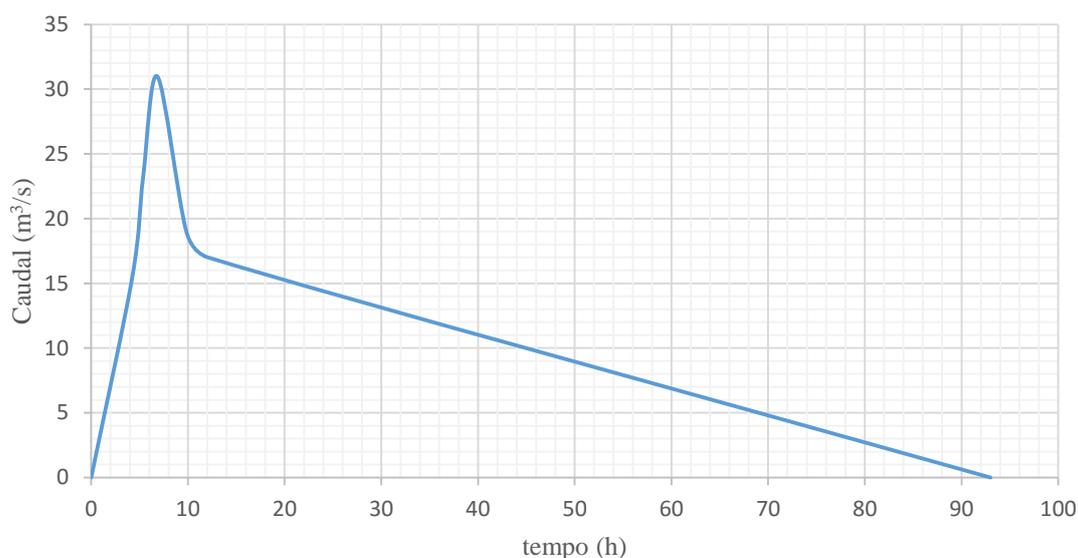


Gráfico 3: Diagrama unitário – Método de Snyder.

Uma das possíveis justificações para a forma alongada do braço descendente do hidrograma de cheia, poderá dever-se ao tempo de duração das chuvadas que ocorrem na bacia em estudo e à forma alongada da mesma. De facto, com uma chuvada prolongada, facilmente se atinge o tempo de concentração e entende-se que continuando a precipitação, o escoamento superficial se mantenha durante um longo período (84 horas).

Como descrito no capítulo 3, a barragem do Alto Cávado foi dimensionada com descarregadores de cheias que não são controlados por comportas e admitem uma capacidade de vazão de  $410 \text{ m}^3/\text{s}$ . Com a aplicação dos métodos, para períodos de retorno de 10 e 100 anos, não se verificam caudais de ponta de cheia superiores à capacidade de vazão dos descarregadores de cheia. Verificou-se que apenas para um período de retorno de 1000 anos, os descarregadores da barragem do Alto Cávado não teriam capacidade de

vazão para o caudal de ponta de cheia de 418 m<sup>3</sup>/s. Este caudal excede em 8 m<sup>3</sup>/s a capacidade de vazão do descarregador de cheia. Contudo, esta situação não é preocupante uma vez que existe derivação de caudal da albufeira do Alto Cávado para a albufeira do Alto Rabagão. Deste modo, se a albufeira do Alto Rabagão tiver capacidade de encaixe nunca se verificará uma sobrecarga dos descarregadores de cheia da barragem do Alto Cávado.

Para garantir a capacidade de encaixe, a entidade gestora dos aproveitamentos hidroelétricos, tem de gerir os níveis de pleno armazenamento da albufeira do Alto Rabagão, com o máximo rigor, para garantir, quando necessário, capacidade de armazenamento para as derivações de caudal proveniente da albufeira do Alto Cávado.

### **5.3 Avaliação da influência das descargas a montante no descarregador da Barragem de Caniçada**

O sistema Cávado-Rabagão-Homem, descrito anteriormente, está na sua maioria interligado por túneis de derivação. Estes túneis transferem caudais das barragens a montante para barragens a jusante por ação da gravidade, produzindo energia elétrica. Em alguns casos, com o avanço tecnológico associado à necessidade de obter energia elétrica mais barata e com recurso a energias renováveis, tem sido crescente a aposta em reforços de potência. Estes reforços, permitem aproveitar a energia eólica, que não é possível armazenar, produzida durante períodos noturnos, em que se verificam menores consumos, para bombear a água de jusante para montante, para posteriormente ser novamente derivado, o que proporciona novamente produção de energia elétrica através de turbinação de caudal, enviado de montante para jusante, este processo denomina-se por reversibilidade.

Este sistema é um dos mais complexos em Portugal, por isso é necessário uma cuidada e rigorosa gestão dos níveis de pleno armazenamento, dos caudais descarregados, derivados e em alguns casos sujeitos a reversibilidade. Neste sistema não é fácil efetuar uma análise da influência das descargas realizadas, no entanto tentou-se de acordo com os dados fornecidos, efetuar uma breve análise dos caudais descarregados nos extremos do sistema (a montante e a jusante).

Na Figura 64, está esquematizada a conexão entre os aproveitamentos hidroelétricos do sistema. Quando são dotados de sistemas reversíveis, isto é, sistemas que têm a capacidade de turbinar e bombear, estão representados com dupla seta, aqueles que apenas estão dotados para realizar turbinagem, está representados apenas com a seta no sentido do escoamento.

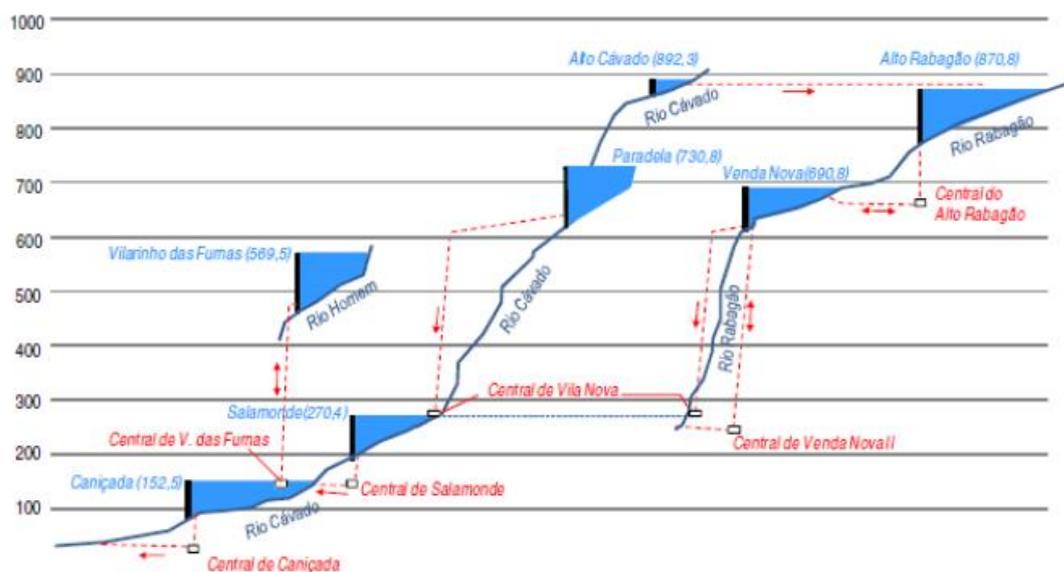


Figura 64: Ligações internas entre aproveitamentos hidroelétricos (Fonte: EDP, 2016).

Numa análise à influência que os caudais de ponta de cheia dos aproveitamentos mais a montante do sistema, têm sobre os aproveitamentos mais a jusante, é necessário ter especial atenção à derivação de caudais entre aproveitamentos. Por vezes as derivações efetuadas são iguais à quantidade de caudal afluyente. O aproveitamento do Alto Cávado, é um exemplo de derivação para o aproveitamento do Alto Rabagão, em que é derivado caudal de montante para jusante.

Na Tabela 11, efetua-se a comparação entre os caudais instantâneos máximos anuais com os caudais derivados para a albufeira do Alto Rabagão. A diferença entre estes dois caudais, dá uma indicação do caudal descarregado pelos órgãos de descarga da barragem do Alto Cávado. É através desta diferença de caudais que se obtêm os valores correspondentes às descargas efetuadas, uma vez que os descarregadores não são

controlados por comportas e efetuam descargas sempre que a cota da crista da soleira do descarregador é atingida, (901,5 m).

Tabela 11: Caudais descarregados. (Fonte: SNIRH, 2016).

Ano	Alto Cávado - afluente		Alto Cávado - derivação		Alto Cávado - Descarregado	
	Data	Q (m3/s)	Data	Q (m3/s)	Data	Q (m3/s)
1966/67	29/05/1967	51,3	29/05/1967	51,3	29/05/1967	0
1967/68	18/04/1968	36,6	18/04/1968	36,6	18/04/1968	0
1968/69	16/03/1969	81,2	16/03/1969	55,3	16/03/1969	25,9
1969/70	05/01/1970	85,3	05/01/1970	55,5	05/01/1970	29,8
1970/71	23/01/1971	40,9	23/01/1971	40,9	23/01/1971	0
1971/72	11/02/1972	55,5	11/02/1972	53,2	11/02/1972	2,3
1972/73	17/01/1973	44,5	17/01/1973	44,5	17/01/1973	0
1973/74	09/01/1974	46,0	09/01/1974	46,0	09/01/1974	0
1974/75	03/03/1975	22,1	03/03/1975	22,1	03/03/1975	0
1975/76	21/02/1976	9,00	21/02/1976	9,00	21/02/1976	0
1976/77	25/01/1977	65,4	25/01/1977	54,3	25/01/1977	11,1
1977/78	02/03/1978	91,5	02/03/1978	55,8	02/03/1978	35,7
1978/79	28/12/1978	133	28/12/1978	57,2	28/12/1978	75,8
1979/80	24/01/1980	37,5	24/01/1980	37,5	24/01/1980	0
1980/81	12/11/1980	20,5	12/11/1980	20,5	12/11/1980	0
1981/82	30/12/1981	99,5	30/12/1981	56,1	30/12/1981	43,4
1982/83	16/05/1983	31,6	16/05/1983	31,6	16/05/1983	0
1983/84	18/12/1983	62,0	18/12/1983	54,0	18/12/1983	8
1984/85	09/02/1985	51,3	09/02/1985	51,0	09/02/1985	0,3
1985/86	17/02/1986	46,5	17/02/1986	46,5	17/02/1986	0
1986/87	07/04/1987	30,1	07/04/1987	30,1	07/04/1987	0
1987/88	15/10/1987	61,3	15/10/1987	54,0	15/10/1987	7,3
1988/89	13/04/1989	9,62	13/04/1989	9,62	13/04/1989	0
1989/90	21/12/1989	74,3	21/12/1989	54,9	21/12/1989	19,4
1990/91	12/03/1991	36,8	12/03/1991	36,8	12/03/1991	0
1991/92	08/01/1992	22,3	08/01/1992	22,3	08/01/1992	0
1992/93	07/12/1992	35,0	07/12/1992	35,0	07/12/1992	0
1993/94	21/05/1994	51,8	21/05/1994	51,5	21/05/1994	0,3
1994/95	01/01/1995	51,3	01/01/1995	51,3	01/01/1995	0
1995/96	08/01/1996	56,6	08/01/1996	53,4	08/01/1996	3,2
1996/97	18/12/1996	21,9	18/12/1996	21,9	18/12/1996	0
1997/98	22/12/1997	37,0	22/12/1997	37,0	22/12/1997	0
1998/99	21/01/1999	11,0	21/01/1999	11,0	21/01/1999	0
1999/00	23/10/1999	73,2	23/10/1999	54,8	23/10/1999	18,4
2000/01	21/03/2001	203	21/03/2001	58,9	21/03/2001	144,1
2001/02	05/02/2002	16,0	05/02/2002	16,0	05/02/2002	0
2002/03	26/12/2002	121	26/12/2002	56,3	26/12/2002	64,7

2003/04	09/12/2003	13,8	09/12/2003	13,8	09/12/2003	0
2004/05	20/10/2004	37,3	20/10/2004	37,3	20/10/2004	0
2005/06	24/03/2006	48,8	24/03/2006	48,8	24/03/2006	0
2006/07	25/11/2006	49,8	25/11/2006	49,8	25/11/2006	0
2007/08	19/04/2008	34,1	19/04/2008	34,1	19/04/2008	0
2008/09	09/02/2009	32,1	09/02/2009	32,1	09/02/2009	0
2009/10	25/02/2010	99,0	25/02/2010	55,4	25/02/2010	43,6
2010/11	06/12/2010	86,0	06/12/2010	54,8	06/12/2010	31,2
2011/12	05/05/2012	23,0	05/05/2012	23,0	05/05/2012	0
2012/13	19/01/2013	52,6	19/01/2013	52,6	19/01/2013	0
2013/14	08/02/2014	66,2	08/02/2014	53,7	08/02/2014	12,5
2014/15	01/11/2014	27,4	01/11/2014	27,4	01/11/2014	0

Como se verifica, grande parte do caudal instantâneo máximo anual afluyente à albufeira do Alto Cávado, é derivado na totalidade para a albufeira do Alto Rabagão, correspondendo a um caudal descarregado de 0 m<sup>3</sup>/s. O elevado registo de derivações deve-se ao facto da barragem do Alto Cávado ser considerada a fio de água, isto significa que tem reduzida capacidade de encaixe enquanto que a do Alto Rabagão, tendo grande capacidade de armazenamento consegue receber os caudais derivados.

Verifica-se que o descarregador de cheias, não controlado por comportas, efetuou 19 descargas, as descargas efetuadas ocorreram sempre que o caudal derivado é superior a 50 m<sup>3</sup>/s, este facto poderá estar relacionado com a capacidade do túnel de derivação.

Dos registos disponíveis em Portugal, a EDP considera três períodos de cheia, correspondentes a Outubro de 1987, Dezembro de 1989 e o mais recente Março de 2001. Na Tabela 11 é possível identificar que os caudais máximos instantâneos afluentes registados nesses períodos de cheia, proporcionaram a necessidade de efetuar derivações e descargas, sendo a cheia de Março de 2001, a que originou o mais elevado caudal descarregado de 144 m<sup>3</sup>/s, a maior descarga de que há registo na barragem do Alto Cávado.

Como descrito anteriormente, o sistema está em cascata e as descargas efetuadas a montante refletem-se a jusante do sistema. A albufeira mais a jusante de todo o sistema é a de Caniçada. Ao efetuar-se uma comparação entre anos hidrológicos, com início a 1 de Outubro e término a 30 de Setembro, das descargas efetuadas na barragem do Alto Cávado com as descargas efetuadas na barragem da Caniçada, Tabela 12, para anos

hidrológicos coincidentes, constata-se que, existiram anos hidrológicos em que não se verificaram descargas na barragem do Alto Cávado, enquanto que, na barragem de Caniçada todos os anos hidrológicos se efetuaram descargas, devido ao facto deste estar mais a jusante e todos os caudais descarregados nas outras barragens do sistema afluíram à sua albufeira.

*Tabela 12: Comparação de descargas efetuadas em Alto Cávado e Caniçada (Fonte: EDP, 2016.)*

Ano Hidrológico	Alto Cávado			Caniçada	
	Data	Caudal instantâneo máximo descarregado Q (m3/s)	Caudal derivado para o Alto Rabagão Q (m3/s)	Data	Caudal instantâneo máximo descarregado Q (m3/s)
2010/11	06/12/2010	31,2	54,8	06/12/2010	527,71
2011/12	05/05/2012	0	23,0	09/05/2012	42,37
2012/13	19/01/2013	0	52,6	19/01/2013	697,28

No ano hidrológico de 2010/11, ocorreram no mesmo dia descargas a montante e a jusante do sistema. Uma vez que não existe registo da hora em que se efetuaram as descargas, é possível que tenha ocorrido inicialmente a descarga no Alto Cávado e posteriormente na Caniçada, uma vez que o sistema funciona em cascata e as descargas efetuadas a montante afluíram a jusante após um período de tempo próximo da soma dos tempos de concentração das albufeiras a montante da secção em análise, a barragem da Caniçada.

Na barragem do Alto Cávado no ano hidrológico de 2011/12 não se verificaram descargas, contudo há registo de derivação de caudal para a albufeira do Alto Rabagão (Tabela 11), barragem que também origina caudal afluente à barragem da Caniçada. Esta situação poderá significar que neste período de tempo, Maio de 2012, existiu afluência de caudais a montante que só se refletiram a jusante passados quatro dias.

No caso do ano hidrológico de 2012/13 verificaram-se situações semelhantes às descritas anteriormente, no mesmo dia ocorreu derivação de caudal do Alto Cávado para o Alto Rabagão e provavelmente como consequência, após um período de tempo, descargas na barragem da Caniçada.

Na gestão deste tipo de sistemas por vezes também poderão ocorrer descargas adicionais a jusante antes de ocorrerem a montante para assegurar a capacidade de encaixe nas albufeiras, uma vez que os caudais de ponta de cheia são aleatórios, difíceis de prever e quantificar.

## 6 Conclusões e perspectivas de trabalho futuro

Em Portugal, grande parte das barragens foram construídas durante o século XX, principalmente para produção de energia, contudo a sua construção apresenta outras vantagens como a mitigação de cheias, a possibilidade de fazer o aproveitamento de água para rega e para atividades de recreio.

O Regulamento de Segurança em Barragens, publicado em 1990 pelo Decreto-Lei nº 11/90 de 6 de janeiro, e posteriormente revogado pelo Decreto-Lei nº 344/2007 de 15 de Outubro, preconiza medidas de segurança para todos os órgãos das barragens, principalmente para os órgãos de segurança e exploração.

Os órgãos de segurança e exploração foram construídos, em grande parte das barragens, num período anterior à publicação dos Regulamentos e tiveram de ser verificados para os novos critérios de segurança. Para isso, desenvolveram-se estudos hidrológicos para avaliar se a capacidade dos descarregadores de cheias existentes é adequado à luz dos atuais conhecimentos.

No caso da EDP, construtora de grande parte das barragens em Portugal, realizaram-se estudos aos aproveitamentos hidroelétricos para verificar quais os aproveitamentos que respeitavam as condições de segurança, e no caso de não serem garantidas essas condições preconizar medidas para restabelecer a segurança pretendida.

O sistema Cávado-Homem-Rabagão, localizado na zona mais pluviosa do país, foi um dos sistemas estudado. Neste sistema, está incluída a barragem do Alto Cávado, barragem mais a montante, em que a capacidade de descarga satisfaz o caudal de ponta de cheia, obtido através de métodos estatísticos, empíricos e fórmulas cinemáticas, tendo em consideração o caudal derivado para a albufeira do Alto Rabagão.

Dos métodos utilizados para determinação do caudal de ponta de cheia, o valor mais elevado foi de 418 m<sup>3</sup>/s, para um período de retorno de 1000 anos. A capacidade de descarga dos descarregadores de cheia, incorporados na barragem do Alto Cávado é de 410 m<sup>3</sup>/s. Neste caso seria a única situação de alerta contudo, a barragem do Alto Cávado tem um túnel de derivação em que uma elevada parte do caudal afluyente é transferido para a albufeira do Alto Rabagão, o que garante o nível de pleno armazenamento e não provoca situações de risco para o corpo da barragem.

Por sua vez, a albufeira da Caniçada é a albufeira mais a jusante de todo o sistema, isto implica que na análise hidrológica realizada a este aproveitamento é necessário ponderar o tempo de concentração de todas as bacias a montante e o amortecimento progressivo do caudal de ponta de cheia. Uma vez que o sistema é de elevada complexidade, devido às derivações de caudal, túneis de reversibilidade e às descargas efetuadas, torna-se de difícil ponderação a influência das descargas efetuadas das várias barragens a montante em relação à barragem da Caniçada.

Os métodos utilizados para determinação dos caudais de cheia são métodos relativamente antigos que devem ser complementados com simulação hidrológica realizada através do recurso a software existente no mercado. Neste seguimento, poderia realizar-se trabalhos para:

- Utilização de softwares de simulação hidrológica, para analisar eventos de precipitação em sub-bacias com albufeiras;
- Estudo dos critérios de dimensionamento de descarregadores de cheia;
- Otimização dos postos udométricos e hidrométricos existentes, evidenciando a sua necessidade para a realização de estudos hidrológicos para o país.

## Referências bibliográficas

Antunes, M. (2011). *Descarregadores de Cheia em Canal, em Betão, Não Convencionais, Tese de mestrado, Universidade do Porto.*

Associação Portuguesa do Ambiente – APA. (2016). *Barragens de Portugal, visitado em 17-01-2016, no endereço: [http://cnpgb.apambiente.pt/gr\\_barragens/gbportugal/Lista.htm](http://cnpgb.apambiente.pt/gr_barragens/gbportugal/Lista.htm).*

Associação Portuguesa do Ambiente – APA. (2016). *Avaliação de Impacte Ambiental, visitado em 26-01-2016: <http://www.apambiente.pt/index.php?ref=17&subref=146>.*

Associação Portuguesa de Recursos Hídricos – APRH. (2016). *Boletim informativo, visitado em 19-01-2016, no endereço: <http://www.aprh.pt/bi/140/n2.html>.*

Carvalho, D. (2013). *Avaliação Técnico-Económica de Aproveitamentos Hidroelétricos – Foz Tua, Tese de mestrado, Universidade do Porto.*

Castilho, L. *Hidrograma Unitario, visitado em 02-05-2016, no endereço: [http://irrigacion.chapingo.mx/planest/documentos/apuntes/hidrologia\\_sup/HIDRO\\_UNITARIO.pdf](http://irrigacion.chapingo.mx/planest/documentos/apuntes/hidrologia_sup/HIDRO_UNITARIO.pdf)*

COBA – *Consultores de Engenharia e Ambiente, visitado em 04-02-2016, no endereço: [http://www.coba.pt/pdf/Portugues/Producao\\_Transport%20Energia/Aprov\\_hidroelectricos.pdf](http://www.coba.pt/pdf/Portugues/Producao_Transport%20Energia/Aprov_hidroelectricos.pdf).*

Decreto-Lei n.º344/2007 de 15 de Outubro, *Regulamento de Segurança em Barragens – RSB.*

Decreto Regulamentar n.º23/95 de 23 de Agosto, *Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de distribuição de Águas Residuais.*

Dias, J. (2015). *Hydraulic-operational safety analysis of edp existing dams. The complementary spillways of Paradela, alamonde and caniçada dams, 29 commission internationale des grands barrages.*

EDP, (2013). *Eletricidade de Portugal – Declaração Ambiental.*

EDP, (2016). *Hydraulic-Operacional Safety Analysis of EDP existing dams. The complementary spillways of Paradela, Salamonde and Caniçada dams.*

Faria, N. (2013). *Barragem na Ribeira da Sertã – Anteprojecto dos órgãos hidráulicos, Tese de mestrado, Instituto Técnico de Lisboa.*

Felix, N. (2010). *Reflexões e Análises Críticas ao Programa Nacional de Barragens de Elevado Potencial Hidroelétrico, Tese de mestrado, Universidade do Porto.*

Felix, P., (2011). *Otimização do Dimensionamento de Projetos de Mini-Hídricas, Tese de mestrado, Universidade do Porto.*

Ferreira, A., (2010). *CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS E ÁREAS INUNDÁVEIS NO CONCELHO DE POMBAL, Tese de mestrado, Universidade de Coimbra.*

Ferreira Lemos Engenharia – FLE. (2016). *Obras de derivação hidráulica, barragem de Pedrogão, visitado em 1-04-2016, no endereço:*

*<http://www.flengenharia.pt/Website/index.php/pt/portfolio/11-portfolio/projectos/30-projecto1-71>*

Figueiredo, N., (2010). *DISSIPACÃO DE ENERGIA A JUSANTE DE UM DESCARREGADOR NÃO CONVENCIONAL, Tese de mestrado, Universidade do Porto.*

International Commission on Large Dams – ICOLD, (2016). *Visitado em: 22-01-2016, no endereço: [http://www.icold-cigb.org/GB/World\\_register/general\\_synthesis.asp](http://www.icold-cigb.org/GB/World_register/general_synthesis.asp).*

IST, 2016. *Aproveitamentos Hidroelétricos, visitado em 05-02-2016, no endereço: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779571249298/IH-2.pdf>.*

Lança, R., (1997). *Tipologias, Condicionamentos e Acções em Barragens de Aterro, Tese de mestrado, Universidade do Algarve.*

Lencastre, A e Franco, F.M., (2003). *Lições de Hidrologia. Fundação Armando Lencastre: Caparica.*

Marques, A., (2013). *Análise do funcionamento e da aplicabilidade de descarregadores de cheias em túnel em aproveitamentos hidroelétricos*, Tese de mestrado, Universidade do Porto.

Meliço, J., (2010). *ESCOLHA DE FORMAS DE BARRAGENS ABÓBADA*, Tese de mestrado, Universidade Nova de Lisboa.

Monteiro, G., (2007). *ANÁLISE SÍSMICA E AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA ESTRUTURAL DE BARRAGENS GRAVIDADE DE BETÃO COMPACTADO COM CILINDRO*, Tese de mestrado, Universidade do Porto.

Moreira, R. (2009). *Potencial hidroelétrico Português desaproveitado*, Tese de mestrado, Universidade do Porto.

Politipédia, (2016). *Campos, Ezequiel de (1974-1965*, visitado em 13-11-2015, no endereço: <http://www.politipedia.pt/campos-ezequiel-de-1874-1965-2/>.

Plano Regional de Ordenamento do Território Norte – PROTN. (2007) *Riscos Extensivos*.

Pinheiro, A., (2010). *Estruturas Hidráulicas: Tomadas de Água em Albufeiras*, Instituto Superior Técnico.

Rede Elétrica Nacional – REN. (2002). *Hidroeletricidade em Portugal – memória e desafio*.

Portaria n.º 8476/93 de 10 de Setembro. *Normas de Projeto de Barragens*.

Portaria n.º 847/93 de 10 de Setembro. *Normas de Observação e Inspeção a Barragens*.

Portaria n.º 246/98 de 21 de Abril. *Normas de Construção de Barragens*.

Ribeiro, A., (1987). *Hidráulica aplicada: Hidrologia, Águas Superficiais*.

Rollo, M. *Engenharia e história: percursos cruzados*.

Santos, F., (2010). *Anteprojecto dos órgãos de segurança e exploração de uma barragem no rio Louredo*, Tese de mestrado, Instituto Superior Técnico.

Silva, J., (2013). *Incerteza associada à falha de registos udométricos/urográficos e respetiva estimativa do escoamento de superfície*, Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos – SNIRH, visitado em: 06-04-2016, no endereço: <http://snirh.apambiente.pt/index.php?idMain=2&idItem=1>.

Wikipedia. (2015). *Emilio Biel*, visitado em 25-10-2015, no endereço: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Em%C3%ADlio\\_Biel](https://pt.wikipedia.org/wiki/Em%C3%ADlio_Biel).

# **Anexos**

Anexo I - Tempo de Concentração

Cálculo do tempo de concentração - sub-bacia					
			Formulas		
			Temez	7,53338171	horas
Dados					
Area, A (km <sup>2</sup> )	103		Kirpich	4,133158385	horas
Comprimento, L (km)	23				
Declive médio, i	0,012		Giandotti	2,873704445	horas
Altura média da bacia, hm (m)	1067				
			Media	4,84674818	horas

Anexo II - Caudal instantâneo máximo anual – Alto Cávado

Ano	Alto Cávado - afluente	
	Data	Q (m <sup>3</sup> /s)
1966/67	29/05/1967	51,3
1967/68	18/04/1968	36,6
1968/69	16/03/1969	81,2
1969/70	05/01/1970	85,3
1970/71	23/01/1971	40,9
1971/72	11/02/1972	55,5
1972/73	17/01/1973	44,5
1973/74	09/01/1974	46,0
1974/75	03/03/1975	22,1
1975/76	21/02/1976	9,00
1976/77	25/01/1977	65,4
1977/78	02/03/1978	91,5
1978/79	28/12/1978	133
1979/80	24/01/1980	37,5
1980/81	12/11/1980	20,5
1981/82	30/12/1981	99,5
1982/83	16/05/1983	31,6
1983/84	18/12/1983	62,0
1984/85	09/02/1985	51,3
1985/86	17/02/1986	46,5
1986/87	07/04/1987	30,1
1987/88	15/10/1987	61,3
1988/89	13/04/1989	9,62
1989/90	21/12/1989	74,3
1990/91	12/03/1991	36,8
1991/92	08/01/1992	22,3
1992/93	07/12/1992	35,0
1993/94	21/05/1994	51,8
1994/95	01/01/1995	51,3
1995/96	08/01/1996	56,6
1996/97	18/12/1996	21,9
1997/98	22/12/1997	37,0
1998/99	21/01/1999	11,0
1999/00	23/10/1999	73,2
2000/01	21/03/2001	203
2001/02	05/02/2002	16,0
2002/03	26/12/2002	121
2003/04	09/12/2003	13,8
2004/05	20/10/2004	37,3
2005/06	24/03/2006	48,8
2006/07	25/11/2006	49,8
2007/08	19/04/2008	34,1
2008/09	09/02/2009	32,1
2009/10	25/02/2010	99,0
2010/11	06/12/2010	86,0

2011/12	05/05/2012	23,0
2012/13	19/01/2013	52,6
2013/14	08/02/2014	66,2
2014/15	01/11/2014	27,4

Anexo III - Método de Foster-Hazen (Caudal máximo instantâneo)

Método de Foster - Hazen						
Nº de Cheia	Valor da cheia, Q (m³/s)	$\frac{Q}{Q_m}$	% de tempo	Desvios, $v$	$v^2$	$v^3$
1	203	3,785986	1,51515	2,78599	7,76172	21,62404624
2	133,4	2,487934	4,54545	1,48793	2,21395	3,294207222
3	121	2,256672	7,57576	1,25667	1,57922	1,984565704
4	99,5	1,855693	10,6061	0,85569	0,73221	0,626547026
5	91,5	1,706491	13,6364	0,70649	0,49913	0,352631111
6	74,3	1,385708	16,6667	0,38571	0,14877	0,057382173
7	73,2	1,365193	19,697	0,36519	0,13337	0,048704349
8	65,4	1,219722	22,7273	0,21972	0,04828	0,010607644
9	62	1,156311	25,7576	0,15631	0,02443	0,003819175
10	61,3	1,143256	28,7879	0,14326	0,02052	0,002939939
11	56,6	1,0556	31,8182	0,0556	0,00309	0,000171881
12	51,9	0,967944	34,8485	-0,0321	0,00103	-3,29394E - 05
13	51,4	0,958619	37,8788	-0,0414	0,00171	-7,08592E - 05
14	51,3	0,956754	40,9091	-0,0432	0,00187	-8,08783E - 05
15	51,3	0,956754	43,9394	-0,0432	0,00187	-8,08783E - 05
16	46,5	0,867233	46,9697	-0,1328	0,01763	-0,002340277
17	46	0,857908	50	-0,1421	0,02019	-0,002868842
18	44,5	0,829933	53,0303	-0,1701	0,02892	-0,004918814
19	37,5	0,699382	56,0606	-0,3006	0,09037	-0,02716728
20	37,3	0,695652	59,0909	-0,3043	0,09263	-0,028191145
21	37	0,690057	62,1212	-0,3099	0,09606	-0,029774677
22	36,8	0,686327	65,1515	-0,3137	0,09839	-0,030862642
23	35	0,652756	68,1818	-0,3472	0,12058	-0,041870027
24	31,6	0,589346	71,2121	-0,4107	0,16864	-0,06925151
25	30,1	0,56137	74,2424	-0,4386	0,1924	-0,084390552
26	25,3	0,47185	77,2727	-0,5282	0,27894	-0,147323832
27	22,3	0,415899	80,303	-0,5841	0,34117	-0,199280067
28	22,1	0,412169	83,3333	-0,5878	0,34555	-0,203122272
29	21,9	0,408439	86,3636	-0,5916	0,34994	-0,207013549
30	16	0,298403	89,3939	-0,7016	0,49224	-0,345353147
31	13,8	0,257372	92,4242	-0,7426	0,5515	-0,409555847
32	9,62	0,179415	95,4545	-0,8206	0,67336	-0,552549463
33	9	0,167852	98,4848	-0,8321	0,69247	-0,576238575
Soma					17,8222	25,04328439

Qm	53,6188
Cd	0,74629
Ca	1,88289
Ca,a	2,36788

Método de Foster - Hazen					
% tempo	Ca,a (ref)	Ca,a (ref)	Ca,a	desvio corrigido V = Ca,a x Cd	$\frac{Q}{Q_m} = V+1$
99	1,07	1,03	1,0552	0,787480586	95,842542
95	0,96	0,94	0,9526	0,710911681	91,737011
80	0,74	0,73	0,7363	0,549490102	83,081781
50	0,3	0,3	0,3	0,223885686	65,623267
20	0,55	0,53	0,5426	0,404934577	75,330889
5	2,07	2,08	2,0737	1,547572489	136,59775
1	4,37	4,48	4,4107	3,291641981	230,11264
0,1	8,95	9,35	9,098	6,789706565	417,67462
0,01	15,25		9,6075	7,169939088	438,06223

Anexo IV – Método de Giandotti

Método de Giandotti				
Dados				
A=	103 km <sup>2</sup>			
$\lambda$ =	0,346			
Tc=	5 h	300 min		
Periodo de Retorno			Caudal de Ponta	
T = 10	I=	10,152 mm	Q=	72,36048 m <sup>3</sup> /s
T = 100	I=	43,646 mm	Q=	311,0916 m <sup>3</sup> /s

Anexo V - Método de Gumbel-Chow (Caudal máximo instantâneo)

Método Gumbel-Chow					
<i>Nº de Ordem</i>	Caudal instantâneo máximo anual $y=Q$ (m <sup>3</sup> /s)	$T_M$	k	$k^2$	$k*y$
1	203	214,28	3,73	13,94	757,826787
2	133,4	23,47	1,99	3,98	265,971067
3	121	15,94	1,68	2,84	203,752115
4	99,5	8,26	1,15	1,31	114,086931
5	91,5	6,51	0,95	0,90	86,6209408
6	74,3	3,98	0,52	0,27	38,401018
7	73,2	3,86	0,49	0,24	35,820248
8	65,4	3,13	0,29	0,09	19,2550947
9	62	2,87	0,21	0,04	12,9860316
10	61,3	2,81	0,19	0,04	11,7670654
11	56,6	2,50	0,07	0,01	4,21684118
12	51,9	2,23	-0,04	0,00	-2,22929517
13	51,4	2,21	-0,06	0,00	-2,85007861
14	51,3	2,20	-0,06	0,00	-2,97273586
15	51,3	2,20	-0,06	0,00	-2,97273586
16	46,5	1,98	-0,18	0,03	-8,27250313
17	46	1,95	-0,19	0,04	-8,75833694
18	44,5	1,89	-0,23	0,05	-10,1408664
19	37,5	1,64	-0,40	0,16	-15,1057253
20	37,3	1,63	-0,41	0,17	-15,2115918
21	37	1,62	-0,42	0,17	-15,3666431
22	36,8	1,62	-0,42	0,18	-15,4675115
23	35	1,56	-0,47	0,22	-16,2853608
24	31,6	1,47	-0,55	0,30	-17,3883521
25	30,1	1,44	-0,59	0,35	-17,6912845
26	25,3	1,33	-0,71	0,50	-17,9049502
27	22,3	1,28	-0,78	0,61	-17,4537095
28	22,1	1,27	-0,79	0,62	-17,4076328
29	21,9	1,27	-0,79	0,63	-17,3595568
30	16	1,18	-0,94	0,88	-15,0419006
31	13,8	1,15	-1,00	0,99	-13,7323561
32	9,62	1,11	-1,10	1,21	-10,5777603
33	9	1,11	-1,12	1,24	-10,0354814